WEEF 2026
(IFEES & GEDC)

CONFERENCE PROCEEDINGS

Engineering Education That Transforms

September 22 – 25, 2026
Cartagena de Indias, Colombia

Powered by

Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI

WEEF (IFEES & GEDC) 2026
Engineering Education that Transforms

September 2026
Bogotá, D.C., Colombia
E-Book / Digital Publication

ISBNe: 978-958-680-104-1

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE FACULTADES DE INGENIERÍA ACOFI
Carrera 68D 25B 86 oficina 205
Edificio Torre Central, Bogotá, D.C., Colombia
Phone: + 57 (601) 696 6285
acofi@acofi.edu.co
www.acofi.edu.co

GRAPHIC DESIGN AND PRODUCTION
TSV Comunicación Gráfica S.A.S.
tsvgrafica@gmail.com / Mobile: 3114855526
www.tsvgrafica.com.co
Bogotá D.C., Colombia

The opinions expressed in these Proceedings are not necessarily those of the Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

ACOFI
Asociación Colombiana
de Facultades de Ingeniería

BOARD OF DIRECTORS

Presidency
Universidad del Norte, Barranquilla — Julián Alberto Arellana Ochoa

Vice-Presidency
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga — Johann Petit Suárez

Board Members
Institución Universitaria Itm, Medellín — Elizabeth Rodríguez
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá — Diego Patiño Guevara
Tecnológico de Antioquia, Medellín — Andrés Felipe Montoya
Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali — Lyda Peña Paz
Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín — Adriana Patricia Villegas
Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias — Mónica Esther Ospino
Universidad del Valle, Santiago de Cali — Fíderman Machuca Martínez
Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta — Adriana Rodríguez Lizcano
Universidad Simón Bolívar, Barranquilla — Claudia Inés Ayala

Executive Directorate
Luis Alberto González Araujo

Fiscal Auditing
Luz Mery Cuervo Garzón

ADMINISTRATIVE ORGANIZATION

Project Assistants: José Miguel Solano Araujo
Simón Andrés De León Novoa
Juan David Hernández Melgarejo
Félix de Jesús Ruiz Ortega
Operations and Treasury Assistant: Janneth Jert Pineda Molina
Commercial Management: Jenny Aidee Quiroga Alarcón
Doctoral Chapter Assistant: Zulma Alejandra Giraldo López
Accountant: Ariel Palomino Ulloa
Accounting Assistant: Karen Julieth Zabala Castañeda
Office Assistant: Marcela Liliana Castiblanco García

REVIEWER COMMITTEE

- **Adolfo León Arenas,** Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
- **Adrián Cardona Sánchez,** Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco, Coacalco, México
- **Adriana Eréndira Murillo,** Instituto Tecnológico de Durango, Durango, México
- **Adriana Isis Cerato,** Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina
- **Agustín Yagüe Panadero,** Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España
- **Alejandra Caicedo,** Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia
- **Alejandro Arredondo Santos,** Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, León, México
- **Alejandro Caroca Navaro,** Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile
- **Alejandro Mejía Dáger,** Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia
- **Alfonso Barbosa Moreno,** Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Ciudad Madero, México
- **Alfredo Quinto Hernández,** Instituto Tecnológico de Zacatepec, Zacatepec, México
- **Alma Leticia Cruz Méndez,** Centro Interdisciplinario de Investigación y Docencia en Educación Técnica (CIIDET), Querétaro, México
- **Alonso García Sánchez,** Universidad Autónoma de Occidente, Mazatlán, México
- **Amaira Corrales,** Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia
- **Ana Karla Aguilera,** Instituto Tecnológico de Parral, Hidalgo del Parral, México
- **Ana Rosa Braña Castillo,** Instituto Tecnológico de Reynosa, Reynosa, México
- **Anabelem Soberanes Martín,** Universidad Autónoma del Estado de México, Valle de Chalco, México
- **Andrea Liliana Fagua Fagua,** Fundación Universitaria Juan de Castellanos, Tunja, Colombia
- **Ángela María Otálvaro,** Universidad de La Salle, Bogotá D.C., Colombia
- **Angélica Burbano Collazos,** Universidad Icesi , Cali, Colombia
- **Angélica Jazmín Vázquez Vallejo,** Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México
- **Angélica Salas Montenegro,** Instituto Tecnológico Superior de Santiago Papasquiaro, Santiago Papasquairo, México
- **Aníbal Sosa,** Universidad Icesi , Cali , Colombia
- **Anny Katherine Lozano Valdés,** Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia
- **Anuar Badillo,** Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte, Río Grande, México
- **Arellys Correa Rodríguez,** Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia
- **Arely Carbajal Fosado,** Universidad Tecnológica de Xicotepec de Juárez, Xicotepec De Juárez, México
- **Argelia Concepción Pumares Chab,** Instituto Tecnológico Superior de Valladolid, Valladolid, México
- **Armando Mares Castro,** Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, Purísima del Rincón, México
- **Beatriz Cardozo Arrieta,** Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia
- **Benigno Alejandro Del Valle Soberanes,** Instituto Tecnológico de Zacatepec, Zacatepec, México
- **Blanca Elvira Oviedo Torres,** Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia
- **Blanca Olivia Vite Del Ángel,** Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache, Álamo Temapache, México
- **Braulio Espino Díaz,** Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, México
- **Brayan José Delgado Cairol,** Universidad Fidélitas, San José, Costa Rica
- **Brenda Leticia Cardona Ferniza,** Instituto Tecnológico Superior de San Pedro de las Colonias, San Pedro, México
- **Brianda Marcella Orozco Juárez,** Instituto Tecnológico Superior de El Mante, El Mante, México
- **Carlos Andrés Galán Pinilla,** Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
- **Carlos Arturo Castillo Medina,** Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia
- **Carlos Efrén Jiménez Acosta,** Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México
- **Carlos Eusebio Mar Orozco,** Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Ciudad Madero, México
- **Carlos Fernando Vega,** Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia
- **Carlos Huber Pinilla Buitrago,** Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Bogotá, Colombia
- **Carlos Javier García Castellanos,** Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Bogotá, Colombia
- **Carlos Lino Rengifo Renteria,** Institución Universitaria Antonio José Camacho, Cali, Colombia
- **Carlos Peralta Olmedo,** Instituto Tecnológico de Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México
- **Carlos Roberto Ibáñez Juárez,** Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México
- **Carlos Rodriguez,** Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

- **Carmen Carey Raygoza,** Instituto Tecnológico de Tijuana , Tijuana, México
- **Carmen Vanesa Morales Alvarino,** Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia
- **César Augusto Álvarez Vargas,** Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia
- **César Primero Huerta,** Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, Valle de Bravo, México
- **Christian Arturo Quiroga Juárez,** Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato, Guanajuato, México
- **Claudia Teresa González Ramírez,** Instituto Tecnológico de Zitácuaro, Zitácuaro, México
- **Claudio Camilo González Clavijo,** Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá D.C., Colombia
- **Daniel Eduardo Paz Pérez,** Instituto Tecnológico Superior de El Mante, Ciudad Mante, México
- **Daniel Fernando León Lara,** Escuela Militar de Cadetes General José María Córdova, Bogotá, Colombia
- **Daniel Mauricio Rodríguez Pinzón,** Corporación Unificada Nacional de Educación Superior, Bogotá, Colombia
- **Daniel Morano,** Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina
- **Darío Martínez Leal,** Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia
- **David Gutiérrez,** Instituto Tecnológico de León, León, México
- **David Madrigal Benavides,** Universidad Fidélitas, San José, Costa Rica
- **Demetrio Castelán Urquiza,** Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, Valle de Bravo, México
- **Diana Berenice Bucio Chong,** Instituto Tecnologico Superior de Ebano S.L.P, Ebano, México
- **Diego Patiño,** Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- **Dolores Ayala Muñoz,** Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, Purisima del Rincón, México
- **Éder Peralta Escobar,** Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, México
- **Edgar Jearvavi Vázquez Moreno,** Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, Pánuco, México
- **Édison Gustavo Cañón Varela,** Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, Colombia
- **Edna Katherine Conde Vega,** Corporación Universitaria Adventista, Medellín, Colombia
- **Edna Rocío Bernal,** Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia
- **Eduardo Jorge Carrone,** CONFEDI, Buenos Aires, Argentina
- **Efraín Rincón Sarmiento,** Centro Interdisciplinario de Investigación y Docencia en Educación Técnica (CIIDET), Querétaro, México
- **Eliana Lobera Peña,** Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia
- **Elizabeth Gutiérrez Gómez,** Instituto Tecnológico Superior de Santiago Papasquiaro, Santiago Papasquiaro, México
- **Elizabeth Rodríguez Acevedo,** Institución Universitaria ITM, Medellín, Colombia
- **Élmer Hugo Arellanos Tafur,** Universidad Continental, Huancayo, Perú
- **Emma Martínez Blanco,** Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Estado de México, México
- **Enrique de Jesús Moreno Carpintero,** Instituto Tecnológico de Zacatepec, Zacatepec, México
- **Enrique Limón Carrillo,** Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México, Estado de México, México
- **Erica Esthela Córdova Gurrola,** Instituto Tecnológico Superior de Santiago Papasquiaro, Santiago Papasquairo, México
- **Eugenio César Velázquez Santana,** Instituto Tecnológico de Zacatepec, Zacatepec, México
- **Evert De los Ríos Trujillo,** Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia
- **Fabián Castillo Peña,** Universidad Libre, Cali, Colombia
- **Fabio García Ramírez,** Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia
- **Fabio Trochez Herrera,** Unidad Central del Valle del Cauca, Tuluá, Colombia
- **Felipe Ángel Álvarez Salgado,** Instituto Tecnológico Superior de Calkiní, Calkiní, México
- **Felipe Augusto López Garduza,** Universidad Aeronáutica en Querétaro, Querétaro, México
- **Fernanda Arciniegas,** Fundación Universitaria de Popayán, Popayán, Colombia
- **Fernando Chávez Valdivia,** Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, México
- **Fernando Montemayor Ibarra,** Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México
- **Francisco Betanzos Castillo,** Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, Valle de Bravo, México
- **Fredy Geny Cortes Montealegre,** Instituto Tolimense de Formación Técnica Profesional, Espinal, Colombia
- **Gabriela Molar Velázquez,** Instituto Tecnológico Superior de Ébano, S.L.P., Ébano, México
- **Germán Domínguez Carrillo,** Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache, Álamo Temapache, México
- **Germán Rodríguez Ávila,** Instituto Tecnológico de Mexicali, Mexicali, México
- **Germán Salas Ojeda,** Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Bogotá, Colombia
- **Gina Marcela Vivas López,** Escuela Militar de Cadetes General José María Córdova, Bogotá, Colombia
- **Gina Mora Arquez,** Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia

- **Gloria Concepción Tenorio Sepúlveda,** Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, Chalco, México
- **Gloria Lucía Ruiz Peña,** Escuela de Ingenieros Militares ESING, Bogotá, Colombia
- **Grey Cecilia Castellar,** Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia
- **Gustavo Eliécer Flórez Diego,** Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia
- **Heber Lazo Méndez,** Instituto Tecnológico de Tuxtepec, Tuxtepec, México
- **Hernán Javier Silva Sosa,** Corporación Universitaria Minuto de Dios, Bogotá, Colombia
- **Hugo Moreno Reyes,** Centro Interdisciplinario de Investigación y Docencia en Educación Técnica (CIIDET), Santiago de Querétaro, México
- **Humberto Dorantes Benavidez,** Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México, Ciudad de México, México
- **Irieri Reyes Scott,** Instituto Tecnológico Superior de Santiago Papasquiaro, Santiago Papasquiaro, México
- **Irma Sánchez,** Instituto Tecnológico de Mazatlan, Mazatlán, México
- **Isaías Daniel Hinojosa Flores,** Universidad Nacional Autónoma de México, León, México
- **Jaime de Jesús Mosquera Orozco,** Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Rionegro, Colombia
- **Jairo Hurtado,** Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- **Javier Arturo Moreno Carvajal,** Institución Universitaria Colegios de Colombia, Chía, Colombia
- **Javier Flores Méndez,** Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México
- **Jenny Paola Lis Gutiérrez,** Fundación Universitaria Konrad Lorenz, Bogotá, Colombia
- **Jessica Beatriz Herrera Ojeda,** Instituto Tecnológico dle Valle de Morelia, Morelia, México
- **Jessica Ivón Cuevas Zapata,** Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente, Zacatecas, México
- **Jesús Antonio Vega Uribe,** Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Bogotá, Colombia
- **Jesús Enrique Osorio Romero,** Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia
- **Jesús Flaminio Ospitia Prada,** Universidad Piloto de Colombia, Girardot, Colombia
- **Jesús Mancera Macedo,** Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, México
- **Joally Yanelly Maldonado López,** Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México
- **Johann Farith Petit Suárez,** Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
- **John Fernando Rincón Flórez,** Escuela de Ingenieros Militares ESING, Bogotá, Colombia
- **Jordán de Jesús Garcia Meza,** Instituto Tecnológico de Frontera Comalapa, Frontera Comalapa, México
- **Jorge Alberto Gálvez Choy,** Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Ciudad Madero, México
- **Jorge Andrés Parra Durán,** Universidad Santiago de Cali, Cali, Colombia
- **José Alfonso Barrera Gómez,** Universidad Simón Bolívar, Cúcuta, Colombia
- **José Bernardo Hernández Morales,** Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
- **José Emilio Sánchez García,** Universidad Autónoma Indígena de México, Sinaloa, México
- **José Luis Calpa Juajinoy,** Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Pasto, Colombia
- **José Martín Carlos Pérez,** Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, El llano, México
- **José Miguel Rodríguez González,** Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, Valle de Bravo, México
- **José Rafael Mendoza Vázquez,** Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México
- **José Ruiz Tamayo,** Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, Purísima del Rincón, México
- **Jover Alonso Cabrales Pineda,** Universidad Simón Bolívar, Cúcuta, Colombia
- **Juan Carlos Acosta,** Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla, Cartagena, Colombia
- **Juan Carlos Castro Medina,** Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia
- **Juan Carlos Cosgalla Zárate,** Instituto Tecnológico de Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México
- **Juan Carlos Veliz Martínez,** Instituto Tecnológico de Iztapalapa, Ciudad de México, México
- **Juan Carlos Zorrilla Aguirre,** Universidad del Quindío, Armenia, Colombia
- **Juan Enrique Palomares Ruiz,** Instituto Tecnológico Superior de Cajeme, Ciudad Obregón, México
- **Juan Ernesto Pérez Pérez,** Universidad Simón Bolívar, Cúcuta, Colombia
- **Juan José Delfín Vázquez,** Instituto Tecnológico Superior de Cajeme, Ciudad Obregón, México
- **Juan Manuel Rúa Áscar,** Universidad Simón Bolívar, Barranquilla, Colombia
- **Juan Sebastián González Sanabria,** Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia
- **Juan Sebastián Sánchez Gómez,** Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- **Juana Hernández Chavarría,** Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Durango, México
- **Julia Patricia Melo Morín,** Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, Pánuco, México
- **Julián Andrés Quimbayo Castro,** Corporación Universitaria del Huila, Neiva, Colombia
- **Julio Alejandro Valdez González,** Instituto Tecnológico de Mexicali, Mexicali, México

- **Kassandra Lizzette Sanabria Acosta,** Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, Purísima del Rincón, México
- **Kenneth Ochoa,** Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia
- **Kenya Franco Maldonado,** Instituto Tecnológico de Ciudad Jiménez, Jiménez, México
- **Laura Daniela Wilches Torres,** Universidad de Boyacá, Tunja, Colombia
- **Leandro Chaires Martínez,** Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache, Tuxpan, México
- **Leidy Verth Viáfara,** Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia
- **Leonardo Saavedra Munar,** Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia
- **Lidia Montserrat Sánchez Ramírez,** Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, Purísima del Rincón, México
- **Lizeth Rodríguez Gómez,** Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Aguascalientes, México
- **Lorena Echavez,** Universidad Piloto de Colombia, Girardot, Colombia
- **Luis Alberto León Bañuelos,** Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, Ciudad de México, México
- **Luis Ángel Avilés Murcia,** Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia
- **Luis Gustavo Cabral R.,** CIIDET, Santiago de Querétaro, México
- **Luis Luján Vega,** Instituto Tecnológico de Delicias, Delicias, México
- **Luisa Fernanda Gonzalez Ramírez,** Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia
- **Luz Piedad Gallego Osorio,** Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia
- **Lyda Peña,** Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia
- **Magda Mireya Salazar Suárez,** Corporación Universitaria Minuto de Dios, Bogotá, Colombia
- **Manuel Luna López,** Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Uriangato, México
- **Marcela Palacios Ortega,** Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, Purísima del Rincón, México
- **Margarita Fuentes Olivares,** Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache, Xoyotitla, México
- María de los Ángeles Ahumada Cervantes, Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, Pánuco, México
- **María Eugenia Guerrero Useda,** ACOFI, Bogotá, Colombia
- **María Luisa Lozano Camargo,** Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México, Ciudad de México, México
- **Maria Nelcy González Ramírez,** Tecnológico de Antioquia, Medellín, Colombia
- **María Teresa Cruz Gordillo,** Tecnologíco de Estudios Superiores de Huixquilucan, Estado de México, México
- **María Teresa Gutiérrez Escajeda,** Instituto Tecnológico de Delicias, Chihuahua, México
- **Mariana Carolyn Cruz Mendoza,** Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, Ciudad de México, México
- **Marianela Paredes Mendoza,** Universidad Tecnológico de Nezahualcóyotl, Ciudad Nezahualcóyotl, México
- **Marlla Dubravka Gutiérrez Botello,** Instituto Tecnológico de Zacatepec, Zacatepec, México
- **Martha Elena Larios Ávila,** Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México
- **Martha Sofía Carrillo,** Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia
- **Mauricio Javier León Tejada,** Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú
- **Mauricio Rincón Ortiz,** Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
- **Mayra Liz Barrios Viñas,** Tecnológico Nacional de México campus La Chontalpa, Nacajuca, México
- **Miguel Chávez Acevedo,** Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México
- **Miguel Enrique Sarmiento Díaz,** Universidad de La Sabana, Chía, Colombia
- **Mikel F. Hurtado Morales,** Corporación Universitaria Minuto de Dios, Bogotá, Colombia
- **Milagro Patrón Noriega,** UnIversidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia
- **Miriam Reyes Tovar,** Universidad de Guanajuato, Celaya, México
- **Miriam Verónica Flores Merino,** Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México
- **Miriam Zulma Sánchez Hernández,** Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, México
- **Mónica Alcalá Narváez,** Fundacion Universitaria Tecnologico Comfenalco, Cartagena, Colombia
- **Mónica Alejandra Hernández Garza,** Instituto Tecnológico Superior de El Mante, Ciudad Mante, México
- **Mónica De León González,** Instituto Tecnológico Superior de San Pedro de las Colonias, San Pedro, México
- **Nancy Cambrón Muñoz,** Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, Morelia, México
- **Natalia Parra Román,** Universidad El Bosque, Bogotá D.C., Colombia
- **Nayda Patricia Arias Duque,** Universidad Santiago de Cali, Cali, Colombia
- **Neider Xavier Vergara Humánez,** Politécnico Grancolombiano, Medellín, Colombia
- **Nelly Camila Yaruro Cáceres,** Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia
- **Nelson Obregón Neira,** Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Colombia
- **Noé Alejandro Mesa Quintero,** Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- **Norma Angélica Caudillo Ortega,** Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato, Guanajuato, México

- **Nury Farelo, Universidad de Santander,** Bucaramanga, Colombia
- **Óscar Daniel Guifo Roldán,** Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil
- **Óscar Fernando Vera Cely,** Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia
- **Óscar Humberto Vega Camacho,** Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia
- **Óscar Segura Quesada,** Universidad Fidélitas, San José, Costa Rica
- **Paola Helena Barros Zarante,** Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia
- **Patricia Paola Zachman,** Universidad Nacional del Chaco Austral, Sáenz Peña, Argentina
- **Pedro Iván Castellanos López,** Instituto Tecnológico de Hermosillo, Hermosillo, México
- **Rafael Andrés Ramírez Alvarado,** Corporación Unificada Nacional de Educación Superior, Bogotá, Colombia
- **Rafael Ángel Cepeda Campo,** Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Bogotá, Colombia
- **Raúl Reyes Bautista,** Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, Purísima del Rincón, México
- **Reina Verónica Román Salinas,** Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, Pánuco, México
- **René Peña Martínez,** Universidad Tecnológica del Valle de Toluca, Lerma, México
- **Ricardo Lara Colón,** Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, Pabellón de Arteaga, México
- **Roberto Rangel Anguiano,** Instituto Tecnológico Superior de El Mante, El Mante, México
- **Robinson Andrés Mancilla Estupiñán,** Universidad de Santander, Bucaramanga, Colombia
- **Rodrigo González Ramírez,** Instituto Tecnológico Superior de Libres, Libres, México
- **Román Guadarrama Pérez,** Instituto Tecnológico Superior de El Mante, Tamaulipas, México
- **Rosemary Herrera Mercado,** Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia
- **Roxana Sarai Marsiglia López,** Fundacion Universitaria Tecnologico Comfenalco, Cartagena, Colombia
- **Rubén Martín Zetina Saravia,** Instituto Tecnológico de Campeche, San Francisco de Campeche, México
- **Samuel Efrén Viñas Álvarez,** Instituto Tecnológico de Zitácuaro, Zitácuaro, México
- **Sandra Del Águila Ríos,** Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú
- **Sandra Judith García Vergara,** Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
- **Sandra Patricia Mosquera Losada,** Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia
- **Sara García Bartolo,** Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, Valle de Bravo, México
- **Sebastián Jaramillo Isaza,** Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia
- **Sheydi Anel Zamudio López,** Instituto Tecnológico de Nuevo León, Guadalupe, México
- **Sneyder José Torrenegra Díaz,** Fundacion Universitaria Tecnologico Comfenalco, Cartagena, Colombia
- **Sofía Johana Gutiérrez Pineda**, Universidad Ecci, Bogotá, Colombia
- **Sofía Ochoa López,** Instituto Tecnológico de Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México
- **Susana Elizabeth García Castro,** Instituto Tecnológico de Hermosillo, Hermosillo, México
- **Tania Méndez Romero,** Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, México
- **Tania Turrubiates López,** Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache, Álamo temapache, México
- **Verónica Raquel Ríos,** Universidad César Vallejo, Lima, Perú
- **Verónica Rosendo González,** Instituto Tecnológico de Toluca, Metepec, México
- **Verónica Sobrevilla Pintor,** Instituto Tecnológico Superior de El Mante, El Mante, México
- **Víctor Manuel Fernández Aguilar,** Escuela de Ingenieros Militares ESING, Bogotá, Colombia
- **Víctor Manuel Velásquez Del Moral,** Instituto Tecnológico Superior de Perote, Perote, México
- **Víctor Manuel Zamudio Rodríguez,** Instituto Tecnológico de León, León, México
- **Viviana Gasull,** Universidad Nacional de San Luis, Villa Mercedes, Argentina
- **Wilder Eduardo Castellanos Hernández,** Pontifica Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- **Wilmar Yovany Rojas Moreno,** Fundación Universitaria Juan de Castellanos, Tunja, Colombia
- **Wilmer Leonardo Velásquez Vargas,** Escuela de Ingenieros Militares ESING, Bogotá, Colombia
- **Yeimmy Peralta Ruiz,** Universidad del Atlántico, Puerto Colombia, Colombia
- **Zoila Erika Sánchez Hernández,** Instituto Tecnologico Superior de Ebano S.L.P, Ebano, México
- **Zorayda Carrillo Caballero,** Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia

PRESENTATION

The International Federation of Engineering Education Societies (IFEES), the Global Engineering Deans Council (GEDC) and the Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI) are honored to present the proceedings of the World Engineering Education Forum (WEEF) 2026.

This publication brings together the intellectual contributions of faculty members, researchers, and undergraduate and doctoral students from Argentina, Bulgaria, Chile, Colombia, the Republic of the Congo, Costa Rica, France, Mexico, Panama, Peru, Spain, and the United States. Collectively, these papers reflect the diversity, vitality, and global reach of the engineering education community, while showcasing innovative approaches to addressing contemporary challenges through research, technology, and education.

The proceedings are organized into the following tracks:

RESEARCH ADVANCES

This track features original research and innovation projects developed through creative processes with a strong commitment to societal impact. Contributions are presented within the following thematic areas:

- Automation and Process Management
- Design, Manufacturing, and Infrastructure
- Digital Technology and Innovation
- Energy

ENGINEERING DOCTORAL STUDENTS

This track highlights the research activities of doctoral students in engineering, providing a platform to showcase emerging knowledge, scientific inquiry, and contributions to the advancement of the discipline.

UNDERGRADUATE STUDENT PROJECTS

This track presents projects developed by undergraduate engineering students, demonstrating their ability to apply engineering knowledge, address relevant challenges, and contribute to the continuous improvement of engineering practice and education. These works represent an important milestone in their academic and professional development.

A total of 187 papers are included in these proceedings and are also available through the ACOFI Papers Open Conference System (OCS) at www.acofipapers.org.

The papers published in this volume were presented in oral and poster formats, according to their respective categories, during WEEF 2026, held in person in Cartagena de Indias, Colombia, from September 21 to 25, 2026.

More than a compilation of conference papers, these proceedings constitute a record of ideas, experiences, and perspectives that contribute to shaping the future of engineering education. They reflect a shared commitment to academic excellence, innovation, sustainability, international cooperation, and the preparation of engineers capable of leading positive transformation in their communities and beyond.

ACOFI extends its appreciation to all authors, reviewers, organizers, and participants whose dedication and expertise made this publication possible. Their contributions enrich the global dialogue on engineering education and strengthen the collective effort to advance the profession.

We trust that this volume will serve as a valuable resource for educators, researchers, students, institutional leaders, and practitioners, inspiring new collaborations, generating fresh insights, and fostering continued progress in engineering education around the world.

TABLE OF CONTENTS

RESEARCH ADVANCES. AUTOMATION AND PROCESS MANAGEMENT..... 21

Galleta a base de harina de arroz con adición de microcápsulas de betacarotenos de ahuyama (Curcubita moschata). 22

Diseño de un Sistema de Pronósticos de la Eficiencia Global de los Equipos (OEE) en Tiempo Real bajo el Marco RAMI 4.0: Caso de estudio. 27

Evaluación de la Amenaza por Inundación en el Sector Urbano de la Cuenca del Río Bugalagrande (Colombia) 33

Sistema De Gestión y Validación Documental para la Vinculación de Personal en las Instituciones de Educación Superior – Caso de Estudio Ucundinamarca. 37

Gestión térmica inteligente en producción avícola: impacto para el bienestar y rendimiento de las aves. 42

Sensores, mapas y agua: HydroSig como sistema IoT de riego de precisión para cultivos de cebolla larga en Ubaté. 47

Aplicación Móvil para la Optimización de la Gestión y Experiencia en el Programa Campamentos Juveniles del Valle de Ubaté. 56

Heavy metals and microplastics identification using electronic tongues. 65

Optimization of Starch Recovery from Potato Waste for Biodegradable Packaging Applications. 70

FusaShop como estrategia de transformación digital y comercio electrónico territorial para la supervivencia de las MiPymes en Fusagasugá. 74

Ecosysgame Wild Forest: Plataforma Didáctica para el Aprendizaje del Ecosistema Terrestre del Páramo Altoandino de la Cuenca Alta del Río Ubaté. 83

Despliegue de modelos eficientes de deep learning en vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo fenológico de cultivos florales. 87

RESEARCH ADVANCES. DESIGN, MANUFACTURING, AND INFRASTRUCTURE 91

Diseño estructural y manufactura del fuselaje de un cohete sonda impulsado por un motor cohete clase K. 92

Socio-Spatial Challenges of Smart Mobility: A Predictive Modeling Approach for Sustainable Urban Traffic Management in Colombia. 101

Diseño de una máquina trituradora de botellas de plástico PET para la Escuela Militar de Aviación EMAVI. 109

Análisis espacial de la accesibilidad turística como apoyo a la infraestructura y la movilidad regional. 118

Validación de una Estrategia Constructiva para el Diseño de Mecanismos tipo Levas Lineales mediante Funciones de Interpolación de Lagrange. 126

Análisis de Nucleación de Grietas de Fatiga por Fretting Considerando Valores de Coeficiente de Fricción Variable. 135

Evaluación sistémica de la seguridad en infraestructura educativa: evolución y aplicación del modelo ISIU Colombia 2.0. 144

Sistema modular de admisión tipo ITB con control electrónico basado en ESP32 para conversión de motores carburados a inyección electrónica (Modular ITB-type intake system with electronic control based on ESP32 for converting carbureted engines to electronic injection). 150

Ecozone: zona de descanso autosostenible. 156

Caso de Estudio: Sistema de Micromovilidad Eléctrica Intermodal bajo el Marco de la Ley 2486 de 2025 en Colombia. 162

RESEARCH ADVANCES. DIGITAL TECHNOLOGY AND INNOVATION 166

Improving Exoplanet Detection with Stacking Meta-Classifiers on CNN Ensembles. 167

Towards a Digital Gap Observatory: Research Advances from Case Studies to National Deployment in Colombia. 176

Integración de Análisis de Sentimientos y Redes Neuronales Artificiales para el Pronóstico del Comportamiento en los Índices S&P 500 y Dow Jones. 184

Avance en metrología eléctrica: construcción y caracterización de un patrón de referencia de baja incertidumbre para magnitudes eléctricas. 193

FPGA-based Hardware Architecture for Data Preprocessing in Electrochemical Signals using PCA. 201

Evaluación de Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLMs) mediante Fine-Tuning para la Optimización de la Geocodificación en Registros de Cáncer. 206

Diseño de un pipeline ETL para la estructuración de información científica sobre la caracterización de nanomateriales derivados de biomasa. 214

Localización de Fuentes Cerebrales a Partir de la Descomposición Multivariada de Modos en Señales Sintéticas de EEG. 223

Evolución de las Tecnologías de Detección de Malware y su Impacto en la Seguridad de la Información: Un Análisis Histórico y Bibliográfico. 231

Oncological Reportability Classification in Spanish: A Comparative Analysis of NLP Algorithms on Pathology Reports. 237

Desarrollo de una interfaz gestual para control vehicular simulado basada en sensores de profundidad y LabVIEW. 245

Prevención cardiovascular con mhealth: retos para el desarrollo de tecnología digital de salud desde un enfoque de innovación tecnológica. 253

Diseño y Validación de una Arquitectura Heterogénea ESP32–FPGA para la Extracción en Tiempo Real del Descriptor LBP con Optimización del Flujo de Datos. 258

Intelligent recommendation platform for sustainable agricultural management in Sampués (Sucre) using fine-tuning techniques. 265

Design and Implementation of an IoT-Based Monitoring and Control System for Precision Agriculture in Tahiti Lime Crops of the Asociación Agropecuaria Arboleda located in Mercaderes – Cauca. 270

Context-Enriched Security Monitoring for OT/ICS Networks Using Cloud SIEM and Passive Telemetry. 276

Manos de aprendizaje: del salón de clase a la vida de los niños a través de la fabricación digital. 280

BLOCKDOCU: Aplicativo web con blockchain para la automatización de recepción y consultas documentales en la Unidad de Gestión Documental y Archivo de la Universidad de Nariño. 286

Smart Modular Solar-Powered Aquaponics Systems for Sustainable Food Production in Rural Communities. 295

Integrated radiofrequency, IoT and Edge computing system for Smart irrigation control in precision agricultura. 304

SAPHIR: Transformación Digital del Ecosistema Docencia-Servicio en Hospitales de Alta Complejidad mediante IA y Automatización. 310

Ecosistema BEMOTIA: Optimización de una Arquitectura Edge-IoT para el Monitoreo en Tiempo Real y la Gestión del Bienestar Emocional en Entornos Escolares. 318

Ecosistemas de gestión del conocimiento en contextos de volatilidad laboral: Modelo híbrido para la sostenibilidad técnica en el sector QA. 325

NUTRIMANÍA: Implementation of a Gamified Serious Video Game for Nutritional Education among Adolescents and Young Adults. 330

An e-Delphi Adapted Process for Expert Knowledge Elicitation in a Prescriptive AI-Hybrid System for Dengue Mitigation: A Case Study in Cali, Colombia. 338

Predicción de la demanda para la gestión de inventarios mediante Machine Learning en una empresa de distribución y comercialización de energía eléctrica. 343

Detección automática de ansiedad y agotamiento: un enfoque basado en la dinámica temporal de regiones faciales. 349

Análisis Multimodal de Gestos Faciales y Manuales, Patrones Habla–Silencio para la Diferenciación de Perfiles de Liderazgo de aspirantes a cargos de dirección. 356

RESEARCH ADVANCES. ENERGY 365

Programa computacional interactivo para evaluar la viabilidad técnica y económica de la integración de energía solar fotovoltaica en instalaciones del sector Oil & Gas en el Perú. 366

Dynamic Simulation of an Oscillating Multibody Wave Energy Converter Under Caribbean Sea Conditions. 374

Control of a modular multilevel converter in the abc reference frame for rectifier stations in HVDC systems. 382

Impacts of Energy Communities: A Case Study of Renewable Energy Appropriation and Energy Efficiency. 391

Evaluación aerodinámica de venas guías omnidireccionales en una turbina Savonius para entornos urbanos utilizando OpenFOAM. 395

Energy Management System for a Hybrid Hospital Microgrid with In-Situ Medical Oxygen and Green Hydrogen Production. 402

Análisis CFD de turbinas eólicas Savonius empleando superficies texturizadas bio-inspiradas en unas de arena tipo Barchanoid. 411

Modelamiento de sistemas de energía renovable usando algoritmos de identificación fuera de línea. 418

Optimality, Equity, and Regulatory Feasibility in Peer-to-Peer Energy Markets: A Game-Theoretic Framework for Colombian Energy Communities. 427

SIU Solar Station: A Decade of Research in Photovoltaic Devices Evaluation and Characterization. 436

Marco conceptual para la evaluación integral de proyectos de energía eólica en Colombia: un enfoque de operacionalización de criterios. 443

Assessment of the Energy Potential of Thermoelectric Generators Derived From Temperature Gradients. 449

Producción de Biohidrógeno a partir de Lactosuero mediante Fermentación Oscura Asistida con Catalizadores Inorgánicos. 455

DOCTORAL STUDENTS IN ENGINEERING 462

Diseño de rutas con drones para vigilancia bajo restricciones operativas. 463

Análisis del comportamiento dinámico de suelos diatomáceos de la ciudad de Tunja – Colombia. 470

Critical Review of Methodologies for Prioritizing Seismic Vulnerability in Reinforced Concrete Frame University Buildings up to Five Stories through Structural Visual Inspection. 476

Infraestructura de transporte y desigualdad territorial: evaluación de la movilidad en márgenes urbanos no planificados en Santiago de Cali. 484

Explicabilidad multidimensional para el análisis de teleconexiones climáticas en sistemas agroproductivos bajo un enfoque de ciencia de datos. 491

Causas raíz de las fallas de interoperabilidad en la gestión de proyectos de construcción: Un análisis temático bajo el marco PMBOK®. 498

Financiarización del café arábica y distribución desigual del valor para los pequeños productores. 507

Innovación en la predicción de contaminantes nanoestructurados en el sector construcción: una revisión de enfoques para la prevención de enfermedades ocupacionales. 516

Desarrollo de un marco metodológico para la estimación del metano entérico y su integración en la huella de carbono de la cadena de suministro del queso costeño en sistemas lecheros tropicales mediante modelación CNCPS y análisis de ciclo de vida. 523

Forecasting Actual Energy Demand in the Colombian Energy Market using N-BEATS. 529

A Literature Review on Anthropomorphic Motion Generation. 537

Arquitectura de cibersalud para el análisis de la marcha y la estimación del riesgo de caídas mediante sensores pasivos Wi-Fi/CSI con IA explicable en la enfermedad de Parkinson. 546

Modelo para la Identificación de Autenticidad en colecciones Arqueológicas en la Cultura del Alto Magdalena apoyado con herramientas de Inteligencia Artificial. 551

Inteligencia Artificial para la Autogestión Energética en Zonas Aisladas: Una Revisión Sistemática de Marcos Metodológicos, Enfoques de Modelado y Aplicaciones de IA. 556

Representatividad Estructural en el Análisis de Datos Geriátricos: Hacia un Modelo de Mitigación de Desbalanceo en el Marco del Proyecto VITALIA. 565

Diseño y fabricación por extrusión de material de aletas porosas de zirconia para biorreactores de rotación/perfusión. 572

Influencia del polvo de residuo cerámico (PRC) en las propiedades de un suelo expansivo. 578

Ciberseguridad en Subestaciones Digitales: De la Caracterización del Sistema IEC 61850 al Despliegue de Controles de Mitigación. 583

Towards a Sustainable Decision-Making Methodology for the Electrification of Isolated Areas: Identification and Prioritization of Key Indicators. 591

UNDERGRADUATE STUDENT PROJECTS 601

Medición de la eficiencia en los departamentos de Colombia enfocado al PIB generado. 602

NeuroTap: implementación y operación de un sistema multisensorial como experiencia formativa CDIO en Ingeniería Electrónica. 610

A Low-Cost Wearable Proof-of-Concept Heater for Thermal Therapy Applications. 614

Influencia de los espacios sociales académicos en el desarrollo de habilidades blandas: un análisis en estudiantes de ingeniería colombianos. 618

Terra Initiative: Un proyecto intergeneracional. 623

Engineering to transform realities: strengthening STEM vocations and female leadership from the ACOFI Student Chapter. 628

Ciclo Autónomo de Observabilidad y Diagnóstico Operativo Mediante LLM Local Sobre Infraestructura Virtualizada 632

Empaques que te hablan, cuidan y protegen: desarrollo de un biomaterial activo-inteligente a base de almidón modificado para envasado de alimentos. 638

Desarrollo de una bebida fermentada tipo kumis saborizada con gulupa (Passiflora edulis) como estrategia de innovación agroalimentaria y fortalecimiento productivo en el eje cafetero. 642

VeriBrief: A Multi-agent Retrieval-augmented Generation System for Decision Support. 646

Low-Cost Unidirectional Seismic Table for Reproducing NSR-10 Type-D Soil Accelerograms. 654

Metodología para el fortalecimiento de la ciberresiliencia en el Sistema de Vigilancia Aeronáutica Colombiano. 658

Implementación de un entorno terapéutico interactivo como apoyo complementario en salud mental bajo el enfoque CDIO 667

Sistema de monitorización postural en tiempo real y gestión de productividad basado en visión artificial para trabajadores remotos y estudiantes. 672

Modelo BiLSTM para detección de mentiras basado en expresiones faciales. 679

Diseño y Desarrollo de una Silla de Ruedas Inteligente Controlada por Voz para Personas con Cuadriplejía. 684

Marco operacional para una solución basada en proxy-caché en la infraestructura del grupo de investigación GRID de la Universidad del Quindío. 691

VDC/BIM-Driven Design and Stabilization of Regolith-Based Martian Roads and Landing Pads. 698

Propuesta de Prototipo para Laboratorio de Energías Renovables. 707

Hybrid Machine Learning Approaches for Rainfall Forecasting and Hydrometeorological Alert Support in a Tropical Colombian Basin. 716

Sistema de Generación de Hojas de Ruta Basadas en COBIT 2019® a Partir de Técnicas de Inteligencia Artificial: Avances Preliminares. 720

Solución Basada en Inteligencia Artificial para la Automatización de los Flujos de Trabajo en el Soporte al Servicio de Gestión de Máquinas Virtuales del Grupo de Investigación GRID. 724

Desarrollo de aplicación móvil Ruta Violeta para la activación de protocolos de atención en caso de Violencia de Genero o Discriminación 731

Ecodiseño como estrategia de formación en ingeniería para el desarrollo de soluciones sostenibles en contextos urbanos. 736

On the Development of a Progressive Web Application Integrating Generative AI and Intelligent Systems for Personalized Learning in Mathematics and STEM Education. 741

Desarrollo de una bebida fermentada a partir del mesocarpio del copoazú (Theobroma grandiflorum) utilizando kéfir de agua como fuente de microorganismos con potencial probiótico 750

Uso de biomasa residual de café (Coffea arabica) proveniente de la Asociación de Mujeres Amucapa (Caquetá) para la obtención de una bebida aromática. 751

Evaluación Multitemporal de la Deforestación y Transición de Uso del Suelo en la Cuenca Quebrada La Zorra, Armero (2015-2024). 759

Determination of the Subgrade Reaction Coefficient (Ks) Using the CBR Test: Validation of the Al-Shayea (2025) Method, for Colombian Soils. 768

Bibliometric Analysis of Generative Artificial Intelligence in Higher Education Using Automation, Algorithmic Techniques, and Natural Language Processing. 774

Evaluación experimental de la energía vibratoria en suelos intervenidos con zanjas ante una detonación. 782

Analysis of the Presence of Emerging Micropollutants in Domestic Wastewater from Cúcuta and Strategies for Treatment Using Advanced Oxidation Processes. 790

Proposal for an Indicator to Measure the Adoption of AI in Research: The LATAM Case. 802

Modelo de automatización para la gestión de la infraestructura de TI del Grupo de Investigación GRID de la Universidad del Quindío. 811

Análisis del ciclo de vida de baterías para motocicletas eléctricas en Medellín: comparativo ambiental frente a motocicletas de combustión interna. 817

Análisis Bibliométrico Enfocado en Pensamiento Computacional. 823

Modelación hidrológica e hidráulica orientada al trazado de zonas de inundación en el sector ribereño del municipio de Flandes, Tolima mediante el uso de herramientas SIG. 831

Apropiación Social del Conocimiento para la Gestión del Riesgo de Desastres en la Cuenca Río Quilichao. 838

Definición de Aspectos de Seguridad: Caso de estudio Grupo de Investigación GRID. 843

Diseño y análisis estructural de un chasis tipo Formula SAE. 850

Design of a serious game for education in circular economy applied to construction and demolition waste (CDW) management. 856

Análisis computacional de la actividad solar a partir de imágenes de alta resolución. 861

Diagnóstico comparativo de la cultura organizacional en las empresas TSP Ltda. y TTC S.A.S del sector transporte ubicadas en el municipio de Yopal: Características, Semejanzas y diferencias. 867

Desarrollo y evaluación de un material de compuesto híbrido semiflexible con incorporación de residuos termoplásticos de cascos de motocicleta para la implementación de componentes de infraestructura. 874

Aprendizaje Basado en Problemas como Estrategia para el Desarrollo de Competencias de Orden Superior en Ingeniería Industrial: una Propuesta para la Universidad de Córdoba. 881

Gestión del conocimiento, sostenibilidad y capital natural en la educación superior: un análisis bibliométrico y cualitativo de sus implicaciones para la formación en ingeniería (2021-2026). 887

Diseño de pavimentos flexibles en Aguascalientes, México: comparación entre las metodologías INVIAS, AASHTO 93 y la normativa mexicana. 895

Definición de un Modelo Operacional de Firewall Mediante Tecnologías de Software Libre para el Fortalecimiento de la Seguridad de Red en el Grupo de Investigación GRID. 900

Safe-Motion: An AI-Based Wearable for Enhancing Women's Safety through Stress Detection. 906

IA sin código: sistema análogo para la generación y exploración de patrones RGB. 913

Design and construction of a machine to optimize the processing and production of commercial peanut. 919

A comparison of satellite sources of solar radiation: Copernicus vs NASA POWER. 926

SmartGrid Telemetry System (SGTS). 930

Development of power generation models based on meteorological data and solar radiation in the Coffee Region. 939

Levelized Cost Assessment of Green Hydrogen Production from Renewable Energy in the Colombian Caribbean. 945

Sistema Inteligente de Control de Tráfico Mediante Semáforo Automatizado con IA. 954

Design and Construction of a Computer Numerical Control Machine for Rapid Prototyping of Printed Circuit Boards. 957

PDe lo tradicional a lo digital: Spotlight como puente transmoderno para el emprendimiento local en Ubaté (Colombia) y Puebla (México) 967

Respuesta empática para robots sociales: una propuesta basada en modelo de empatía. 973

MangroveSense IoT: Intelligent Monitoring of Mangrove Ecosystems. 981

Misión 2030: Gamificación con IA como herramienta transformadora para el desarrollo de competencias en los ODS en Ingeniería Industrial en la Universidad de Córdoba. 987

De los prototipos académicos al software funcional: Un marco de pruebas para transformar los proyectos finales de Ingeniería de Sistemas. 994

IoT GoLab: Kit Modular Portátil para Experimentación IoT. 1000

Determinación de aflatoxina M1 en leche bovina cruda producida en áreas rurales del municipio de Florencia, Caquetá. 1005

Percepción del estrés laboral docente y efectividad percibida de las estrategias institucionales de bienestar: un estudio en la Universidad de Córdoba. 1010

Design and Development of an Artificial Intelligence-Based Platform for the Early Detection of Anxiety Symptoms. 1017

Sonic Branding con IA en Publicidad: Percepciones del Público en un Estudio Cualitativo de Escucha. 1025

Revisión Sistemática bajo Metodología PRISMA: Viabilidad Técnica y Sostenibilidad de la Ceniza de Bagazo de Caña como Adición Puzolánica. 1030

Aplicación del aprendizaje automático para evaluar la viabilidad de la microgeneración hidroeléctrica en zonas rurales de Colombia mediante instrumentos de medición de caudal de bajo coste basados en el IoT. 1037

Desarrollo de un módulo didáctico SCADA de código abierto para la formación técnica en sistemas de supervisión y control. 1043

Identificación de factores críticos en labores de precosecha de Banano mediante Análisis Factorial en el departamento del Magdalena. 1051

SIANNA: Mano Robótica de Bajo Costo para Asistencia Quirúrgica Mediante Visión Artificial e Inteligencia Artificial 1058

Optimización Industrial y Escalamiento de la Producción de Bioetanol a partir de Yuca (Manihot esculenta): Un Enfoque en Modelos VHG, SSF y la Variedad Copiblanca 163. 1062

Análisis comparativo de materias primas para la producción de bioetanol: evaluación química e industrial de caña de azúcar, algas marinas y residuos de café. 1075

Análisis del Potencial de Captación y Aprovechamiento de Aguas Lluvias en Ecosistemas de Bosque Seco Tropical como Estrategia de Gestión Sostenible del Recurso Hídrico en el Municipio de Nilo, Cundinamarca. 1081

Diseño de mortero con residuos reciclados para reducir el sobrecalentamiento en parques de Girardot, Cundinamarca. 1087

A Digital Twin Framework with Hybrid CC–UKF Algorithm for Accurate State-of-Charge Estimation in Lithium-Ion Batteries. 1091

Guía Metodológica Conceptual para el Desarrollo de un Emulador: Un Enfoque Práctico Basado en el Hardware de la Game Boy. 1100

Central de Información para la Salud en Colombia: Propuesta de Mockup de aplicación multiplataforma. 1105

Diseño de una Metodología Basada en AMEF para la Gestión y Mitigación de Riesgos en Solicitudes de Renovación de Registro Calificado en Programas de Pregrado en la Universidad del Magdalena. 1111

Influencia del riesgo percibido en la intención de compra de productos circulares: un estudio exploratorio en el Eje Cafetero, Colombia. 1117

Análisis y control de un convertidor Dual Active Bridge para el intercambio de energía entre microrredes en corriente continua. 1122

Fermentation of coffee cherry: impact on drying kinetics. 1128

Modelo matemático del crecimiento de la fresa como componente de un Gemelo Digital agrícola. 1132

Diagnóstico integral de sistemas integrados de gestión para el fortalecimiento organizacional. 1147

Building a satellite catalog and SDA system from publicly available sources. 1155

Diseño e implementación de un nodo inteligente para monitoreo distribuido de variables microambientales en cultivos mediante comunicación LoRa P2P. 1164

Diseño de un CubeSat para el Monitoreo de Variables Ambientales y la Protección de Carga Crítica. 1167

Análisis sistemático de la literatura sobre el uso de Sargassum como adición cementante: Una revisión bajo el enfoque PRISMA. 1175

Diseño y Validación de una Metodología para la Renovación del Registro Calificado en la Universidad del Magdalena. 1179

ECOSORT: Design and Evaluation of a Low-Cost AI-Based System for Automated Solid Waste Classification. 1184

Desarrollo de una Aplicación Web para la Predicción y Gestión de Pacientes con Diabetes en Clínicas de Barranquilla. 1191

Sinergia entre Electromagnetismo y Espectroscopia: La Bobina de Tesla como Catalizador de Aprendizaje Experiencial en Ingeniería y Astronomía. 1198

ExamWatch: A Real-Time Academic Surveillance System for Detecting Irregular Behavior in Computer-Assisted In-Person Examination. 1203

Red de Sensores para Monitoreo Agrícola. 1207

Implementación de un detector óptico de CO_2 basado en grafeno oxidado. 1215

Sistema Inteligente de Evaluación Psicopedagógica Basado en Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático para la Detección Temprana de Trastornos del Aprendizaje en Educación Inicial. 1223

Modelo de Evaluación basado en Inferencia Difusa para el Fortalecimiento de Trayectorias Inclusivas en la Enseñanza de la Ingeniería para Estudiantes con Discapacidad Visual. 1227

Plataforma de simulación interactiva para la enseñanza de la ciencia de los materiales en ingeniería. 1235

Information System for Efficient Energy Management at Tecnológico de Antioquia through Statistical Characterization and Consumption Pattern Analysis. 1241

Prototipo de Seguidor Solar de Doble Eje de Bajo Costo para Optimización Fotovoltaica. 1245

Effect of Outlier Treatment on the Performance of Machine Learning Classifiers for Diabetes Detection. 1253

Normalización de los procesos judiciales en Bogotá a través de la Inteligencia Artificial: un enfoque desde la ingeniería industrial. 1259

Assessment of a Dust Control Additive for Unpaved Roads in Panama. 1264

Multisalto: A mobile application for post-disaster communication based on a multihop ad-hoc network of smartphones. 1269

WEEF 2026
(IFEES & GEDC)

Engineering Education That Transforms

September 22 – 25, 2026
Cartagena de Indias, Colombia



RESEARCH ADVANCES

AUTOMATION AND PROCESS MANAGEMENT

Powered by

Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI

Galleta a base de harina de arroz con adición de microcápsulas de betacarotenos de ahuyama (*Curcubita moschata*)

1st María Alejandra Romero Guarin
Facultad de Inteligencia Arificial e Ingenierias
Universidad de Caldas
Manizales, Colombia
maria.romero34535@ucaldas.edu.co

2nd Adolfo Alberto Camargo Blanco
Facultad de Inteligencia Arificial e Ingenierias
Universidad de Caldas
Manizales, Colombia
adolfo.801917059@ucaldas.edu.co

3rd Cristina Inés Álvarez Barreto
Facultad de Inteligencia Arificial e Ingenierias
Universidad de Caldas
Manizales, Colombia
cristina.alvarez@ucaldas.edu.co

Resumen

Este estudio tiene como objetivo evaluar la aplicación tecnológica de microcápsulas de extracto de ahuyama recubiertas con almidón modificado de ñame con presencia de compuestos bioactivos como carotenoides, de tal manera que puedan ser empleadas como ingredientes bioactivos dada su alta actividad antioxidante, por medio de la elaboración de una galleta sin gluten a base de harina de arroz, frijol y salvado que funcionen como alternativa para el consumo de personas con algún tipo de afectación como la enfermedad celíaca. Como uno de los resultados esperados con la adición de las microcápsulas, es mantener la estabilidad antioxidante de los carotenoides de la ahuyama, sin afectar las características de calidad y sensorial del producto final, para ello se evaluarán diferentes formulaciones, considerando como parte de los criterios de escogencia los resultados que se obtengan del análisis sensorial y la cuantificación de la actividad antioxidante.

Palabras claves: *Galleta sin gluten, agentes bioactivos, microcápsulas, arroz, ahuyama.*

I. Introducción

En los últimos años se ha evidenciado un incremento significativo en la incidencia de trastornos asociados al consumo de gluten, incluyendo la enfermedad celíaca, la alergia al trigo y la sensibilidad al gluten no celíaca. La enfermedad celíaca se define como un trastorno autoinmune sistémico desencadenado por la ingestión de gluten en individuos genéticamente susceptibles, caracterizado por daño en la mucosa intestinal que provoca malabsorción de nutrientes y diversas manifestaciones gastrointestinales y sistémicas [1]. Estas condiciones obligan a la eliminación permanente del gluten en la dieta, impulsando el desarrollo y la diversificación global de productos alimenticios libres de esta proteína. Se estima que la prevalencia de la enfermedad celíaca alcanza aproximadamente el 1 % de la población mundial, con una tendencia creciente en América Latina y países en desarrollo [2].

A pesar del aumento en la disponibilidad comercial de alimentos sin gluten, diversos estudios han reportado que estos productos presentan deficiencias nutricionales estructurales, tales como bajo contenido proteico, reducida cantidad de fibra dietaria y limitada presencia de vitaminas del complejo B, minerales esenciales y compuestos bioactivos antioxidantes [3]. Esta situación genera la necesidad de diseñar alimentos funcionales libres de gluten con mayor valor nutricional, especialmente dirigidos a poblaciones vulnerables como niños en crecimiento y personas con requerimientos nutricionales específicos. Además, las matrices sin gluten suelen presentar propiedades reológicas deficientes debido a la ausencia de la red estructural glutenina–gliadina, lo que afecta negativamente la textura, el volumen y la aceptabilidad sensorial de productos horneados [4].

La harina de arroz constituye una de las alternativas tecnológicas más empleadas en la elaboración de productos libres de gluten debido a su alta digestibilidad, sabor neutro, baja alergenicidad y amplia aceptación por parte de consumidores celíacos. El arroz carece de las fracciones prolámicas tóxicas presentes en trigo, cebada y centeno, lo que lo convierte en un ingrediente seguro para dietas sin gluten. Sin embargo, las matrices alimentarias basadas exclusivamente en arroz presentan limitaciones nutricionales importantes, incluyendo baja capacidad antioxidante, escaso contenido de fibra, perfil incompleto de aminoácidos y limitada presencia de micronutrientes esenciales como vitamina A, hierro y zinc [3], [4]. Estas limitaciones han motivado la incorporación estratégica de ingredientes funcionales provenientes de fuentes vegetales ricas en fitoquímicos bioactivos.

Entre dichas fuentes, la ahuyama *(Cucurbita moschata)* destaca por su elevado contenido de carotenoides, particularmente β-caroteno, luteína y zeaxantina, compuestos lipofílicos asociados con actividad antioxidante, propiedades antiinflamatorias y función provitamina A esencial para la salud visual y el adecuado funcionamiento del sistema inmune [5]. Los carotenoides contribuyen a la reducción del estrés oxidativo celular mediante la neutralización de especies reactivas de oxígeno y la protección de membranas celulares frente a procesos de peroxidación lipídica [5], [6]. Asimismo, el aprovechamiento agroindustrial de la ahuyama representa una estrategia sostenible para la valorización de cultivos locales, la reducción de pérdidas postcosecha y la generación de productos alimentarios innovadores con valor agregado.

A pesar de sus beneficios biológicos, los carotenoides presentan baja estabilidad frente a factores ambientales como la exposición a la luz, el oxígeno, variaciones de pH y temperaturas elevadas [6]. Durante procesos térmicos de horneado y almacenamiento, estos compuestos pueden sufrir isomerización y degradación oxidativa, generando pérdidas significativas de actividad antioxidante y reduciendo su biodisponibilidad en el alimento final. Esta susceptibilidad limita su incorporación directa en matrices alimentarias funcionales.

En respuesta a esta problemática, la microencapsulación ha emergido como una estrategia tecnológica eficaz para la protección de compuestos bioactivos mediante su inclusión dentro de materiales pared que actúan como barrera frente a agentes degradativos y permiten una liberación controlada durante la digestión gastrointestinal [7], [8]. Entre las técnicas disponibles, el secado por aspersión se destaca por su escalabilidad industrial, eficiencia económica y capacidad para encapsular compuestos termolábiles conservando su funcionalidad [8], [9].

Diversas investigaciones han demostrado que la microencapsulación incrementa la estabilidad térmica de carotenoides y favorece su incorporación en productos de panificación, logrando mayores tasas de retención de compuestos bioactivos después del procesamiento térmico en comparación con la adición directa del carotenoide libre [8], [9]. Además, la incorporación de antioxidantes encapsulados ha mostrado mejorar la actividad antioxidante y la estabilidad oxidativa de productos horneados sin afectar significativamente sus propiedades sensoriales [10].

En matrices tipo galleta, la incorporación de compuestos bioactivos encapsulados ha mostrado resultados promisorios en términos de aceptación del consumidor, calidad tecnológica y funcionalidad nutricional. Estudios recientes reportan incrementos significativos en el contenido de β-caroteno y en la actividad antioxidante en galletas elaboradas con derivados de ahuyama, manteniendo adecuados niveles de aceptabilidad sensorial [11].

El enriquecimiento de productos libres de gluten mediante compuestos bioactivos protegidos tecnológicamente representa una línea emergente dentro de la ingeniería de alimentos, alineada con las tendencias actuales orientadas al desarrollo de alimentos que combinen seguridad alimentaria y beneficios para la salud. Este enfoque responde a la creciente demanda de consumidores que buscan productos nutricionalmente mejorados sin comprometer restricciones dietarias.

En este contexto, el presente trabajo propone el desarrollo de una galleta libre de gluten a base de harina de arroz enriquecida con microcápsulas de carotenoides provenientes de ahuyama *(Cucurbita moschata),* evaluando las propiedades fisicoquímicas del sistema encapsulado, la retención de β-caroteno durante el horneado, la actividad antioxidante del producto final, la aceptabilidad sensorial y su estabilidad durante el almacenamiento, con el propósito de contribuir al diseño de alimentos funcionales innovadores y nutricionalmente mejorados.

II. Materiales y Métodos

A. *Diseño experimental para la selección de la formulación base*

El estudio se desarrollará en dos etapas experimentales. La primera etapa tiene como finalidad definir la formulación base de galleta libre de gluten adecuada para la posterior incorporación de microcápsulas de carotenoides.

Se evalúan cuatro formulaciones de galletas elaboradas a partir de harina de arroz como materia prima principal:

1. Galleta control sin gluten (GC): formulada únicamente con harina de arroz.

2. Formulación con salvado (FS1): sustitución parcial de harina de arroz por salvado vegetal.

3. Formulación con salvado (FS2): mayor nivel de sustitución con salvado vegetal.

4. Formulación alta en proteína (FP): incorporación parcial de harina de frijol rojo como fuente proteica.

Las formulaciones serán diseñadas con el propósito de mejorar el perfil nutricional y tecnológico de productos libres de gluten mediante el incremento del contenido de fibra dietaria y proteína vegetal.

TABLE I. Tratamientos experimentales para la selección de la formulación base

CÓDIGO	TIPO DE FORMULACIÓN	MATERIA PRIMA DIFERENCIAL	PROPÓSITO NUTRICIONAL
GC	Galleta control sin gluten	100% harina de arroz	Control experimental
FS1	Galleta con salvado (nivel bajo)	Sustitución parcial con salvado	Incremento de fibra
FS2	Galleta con salvado (nivel alto)	Mayor sustitución con salvado	Alto contenido de fibra
FP	Galleta alta en proteína	Harina de frijol rojo	Incremento proteico

B. *Elaboración de las galletas*

La preparación de las galletas se realiza siguiendo un procedimiento estandarizado de batido en tres etapas:

1. Cremado: mezcla de grasas (margarina y mantequilla) con azúcar durante 1 min a velocidad baja y 3 min a velocidad media.

2. Incorporación de ingredientes líquidos: adición de huevo, miel y extracto de vainilla, seguida de mezclado durante 1 min a velocidad baja y 3 min a velocidad media.

3. Adición de harinas: incorporación de la mezcla de harinas correspondiente a cada tratamiento hasta obtener una masa homogénea.

Posteriormente, la masa será moldeada en galletas de 3 cm de diámetro y sometida a horneado a 165 °C durante 5 minutos, seguido de reposo a temperatura ambiente durante 30 minutos.

C. *Diseño experimental y tratamientos*

Se emplea un diseño experimental unifactorial completamente aleatorizado, donde el factor evaluado correspondió al tipo de formulación de galleta.

Cada tratamiento será elaborado en tres réplicas independientes, obteniéndose entre tres y cinco unidades experimentales por réplica para los análisis fisicoquímicos.

Para la evaluación sensorial se plantea una prueba por tratamiento, considerando una prueba hedónica de cinco puntos.

TABLE II. DISEÑO EXPERIMENTAL UNIFACTORIAL

Factor evaluado	Niveles	Tipo de diseño	Número de réplicas
Formulación de galleta	GC, FS1, FS2, FP	Diseño completamente aleatorizado	3

TABLE III. DISTRIBUCIÓN EXPERIMENTAL DE MUESTRAS

Tratamiento	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Número total de muestras
GC	3–5 unidades	3–5 unidades	3–5 unidades	9–15
FS1	3–5 unidades	3–5 unidades	3–5 unidades	9–15
FS2	3–5 unidades	3–5 unidades	3–5 unidades	9–15
FP	3–5 unidades	3–5 unidades	3–5 unidades	9–15

D. Variables de respuesta

Las formulaciones serán evaluadas mediante análisis fisicoquímicos y sensoriales con el fin de seleccionar la galleta base óptima para la incorporación posterior de microcápsulas.

Las variables a analizar son:

TABLE IV. VARIABLES DE RESPUESTA EVALUADAS

Tipo de análisis	Variable	Método general
Fisicoquímico	Humedad	Método gravimétrico
Fisicoquímico	Actividad de agua (aw)	Medidor de actividad de agua
Fisicoquímico	pH	Potenciómetro digital
Fisicoquímico	Color	Colorímetro (CIELab)
Fisicoquímico	Textura	Análisis instrumental de textura
Sensorial	Aceptabilidad	Prueba hedónica

La formulación base de galleta se seleccionará considerando los siguientes criterios técnicos y sensoriales:

- Aceptabilidad sensorial: se priorizará la formulación que presente mayor aceptación global por parte de los evaluadores, considerando atributos como sabor, aroma, textura y apariencia general del producto.
- Textura adecuada: se seleccionará la formulación que presente características texturales propias de una galleta horneada, incluyendo firmeza, crocancia y estructura homogénea, garantizando calidad tecnológica.
- Estabilidad fisicoquímica: la formulación deberá mostrar valores estables en los parámetros fisicoquímicos evaluados, evidenciando comportamiento adecuado durante el procesamiento.
- Actividad de agua y contenido de humedad: se considerarán valores que favorezcan la estabilidad microbiológica y contribuyan a una mayor vida útil del producto.
- pH del producto: se seleccionará la formulación con valores de pH compatibles con la estabilidad del alimento y la conservación de sus propiedades funcionales.

La formulación que cumpla integralmente estos criterios será definida como galleta base para la posterior incorporación de microcápsulas de carotenoides provenientes de ahuyama (Cucurbita moschata).

E. Obtención del microencapsulado de ahuyama

Las microcápsulas empleadas en el estudio serán obtenidas a partir de extractos de pulpa de ahuyama (Cucurbita moschata), empleando almidón modificado de ñame como material pared con el fin de proteger los carotenoides frente a condiciones ambientales adversas y procesos térmicos.

Para la obtención del extracto, se empleará una relación pulpa:solvente de 1:3 (p/v). Se pesarán 2 g de pulpa fresca de ahuyama en tubos de centrifugación de 15 mL y se adicionarán 6 mL de metanol al 70 %. Posteriormente, las muestras serán sometidas a agitación a 100 rpm durante 15 min a una temperatura de 20 ± 2 °C.

Las muestras serán centrifugadas a 6000 rpm durante 15 min para la separación del sobrenadante. Este procedimiento se repetirá hasta obtener extractos libres de residuos sólidos. Los extractos obtenidos serán almacenados en congelación hasta su posterior utilización, siguiendo la metodología reportada por Rodrigues et al. [10].

Para la obtención de las microcápsulas se considerará el estudio realizado por Rodríguez [12], donde se empleó para la microencapsulación un secador por aspersión de escala piloto de referencia PSALAB 1,5, para ello se preparará la suspensión de alimentación al equipo de secado, que consistirá en el extracto de ahuyama que sea obtenido, al cual se le adicionará maltodextrina en una proporción de la formulación entre 0 al 3%, así mismo se tendrán en cuenta como parámetros de operación la temperatura de entrada al secador (140-180°C), la temperatura de salida del secador (75-95°C) y la velocidad del disco de atomización [18000-22000rpm].

F. Incorporación de microcápsulas en la galleta base

Una vez seleccionada la formulación óptima de galleta libre de gluten, se procederá a la incorporación de microcápsulas de carotenoides con el propósito de evaluar su aplicación como ingrediente funcional antioxidante.

Se establecerán tres niveles de adición del microencapsulado:

- F1: 3 % (p/p) de microcápsulas
- F2: 6 % (p/p) de microcápsulas
- F3: 9 % (p/p) de microcápsulas

Las microcápsulas serán incorporadas durante la etapa de mezcla de ingredientes secos, con el objetivo de garantizar su distribución homogénea dentro de la matriz alimentaria y minimizar pérdidas de compuestos bioactivos durante el proceso de horneado

G. *Diseño experimental para la etapa funcional*

Para esta etapa se empleará un diseño experimental unifactorial completamente aleatorizado, donde el factor evaluado corresponderá al porcentaje de microcápsulas adicionadas.

TABLE V. TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES CON ADICIÓN DE MICROCÁPSULAS

Tratamiento	Formulación base	Nivel de microcápsulas
FB–F1	Galleta base seleccionada	3 %
FB–F2	Galleta base seleccionada	6 %
FB–F3	Galleta base seleccionada	9 %

Cada tratamiento realizado contará con tres réplicas independientes. Las muestras obtenidas serán utilizadas para evaluar la estabilidad de los compuestos bioactivos y el comportamiento antioxidante del producto durante almacenamiento.

H. *Determinación de la actividad antioxidante*

La actividad antioxidante de las galletas enriquecidas será determinada mediante los métodos de eliminación de radicales libres DPPH y ABTS, ampliamente utilizados en matrices alimentarias enriquecidas con compuestos bioactivos [11].

Previo al análisis, las muestras serán acondicionadas mediante la obtención de extractos metanólicos.

I. *Evaluación durante almacenamiento*

Las galletas enriquecidas con microcápsulas serán evaluadas durante almacenamiento con el propósito de determinar la estabilidad de los carotenoides encapsulados y la conservación de la actividad antioxidante.

Durante este periodo se monitorearán:

- actividad antioxidante,
- contenido de carotenoides,
- parámetros fisicoquímicos del producto.

Este análisis permitirá evaluar el efecto protector del microencapsulado sobre los compuestos bioactivos bajo condiciones de almacenamiento.

III. RESULTADOS ESPERADOS Y DISCUSIÓN PROYECTA

Before El presente estudio permitirá evaluar el potencial tecnológico y funcional de galletas libres de gluten enriquecidas con microcápsulas de carotenoides provenientes de ahuyama (*Cucurbita moschata*). A partir del diseño experimental propuesto, se espera identificar una formulación base que presente adecuada estabilidad fisicoquímica, propiedades texturales aceptables y alta aceptación sensorial, constituyendo una matriz alimentaria apropiada para la incorporación de compuestos bioactivos.

Diversos estudios han demostrado que la sustitución parcial de harinas refinadas por ingredientes ricos en fibra o proteína vegetal mejora la calidad nutricional de productos libres de gluten sin comprometer significativamente sus características tecnológicas cuando las proporciones son adecuadamente optimizadas [3], [4]. En este sentido, se espera que las formulaciones que incorporen salvado vegetal o harina de frijol presenten mejoras en textura estructural y perfil nutricional respecto a la galleta control basada únicamente en harina de arroz.

En relación con las propiedades fisicoquímicas, se prevé que las formulaciones seleccionadas presenten valores de actividad de agua y humedad compatibles con productos horneados estables, favoreciendo la conservación del alimento durante almacenamiento. Estudios previos han reportado que la incorporación de ingredientes ricos en fibra contribuye a modificar la retención de agua y la estructura de la matriz alimentaria, influyendo positivamente en la estabilidad del producto final [8].

Respecto a la incorporación de microcápsulas, se espera que el proceso de encapsulación permita proteger los carotenoides frente a degradación térmica durante el horneado, incrementando su estabilidad y biodisponibilidad en comparación con la adición directa del extracto vegetal. La microencapsulación mediante matrices polisacáridas ha demostrado ser una estrategia efectiva para preservar compuestos lipofílicos sensibles como los carotenoides frente a oxidación, luz y temperatura [7], [9].

Se anticipa que el aumento progresivo del porcentaje de microcápsulas genere un incremento significativo en la actividad antioxidante determinada mediante los ensayos DPPH y ABTS, comportamiento previamente observado en productos de panificación enriquecidos con compuestos bioactivos encapsulados [10], [11]. No obstante, niveles elevados de incorporación podrían afectar atributos sensoriales como color, sabor o textura, por lo cual el análisis integral permitirá establecer un equilibrio entre funcionalidad nutricional y aceptación del consumidor.

Durante el almacenamiento, se espera evidenciar una reducción gradual del contenido de carotenoides y de la actividad antioxidante, fenómeno ampliamente descrito en matrices alimentarias enriquecidas con compuestos naturales. Sin embargo, la presencia del material encapsulante debería retardar dichos procesos de degradación, demostrando el efecto protector del microencapsulado y su viabilidad como estrategia tecnológica para el desarrollo de alimentos funcionales [5], [8].

En conjunto, los resultados esperados permitirán validar la aplicación de microcápsulas de ahuyama como ingrediente funcional en productos libres de gluten, contribuyendo al diseño de alimentos innovadores con propiedades antioxidantes mejoradas y potencial impacto en la salud del consumidor. Asimismo, el aprovechamiento de materias primas vegetales locales podría fortalecer procesos de valorización agroindustrial y promover alternativas sostenibles dentro del sector alimentario [6].

IV. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de una galleta libre de gluten enriquecida con microcápsulas de carotenoides provenientes de ahuyama (*Cucurbita moschata*), se busca integrar estrategias de reformulación nutricional y tecnologías de encapsulación orientadas al diseño de alimentos funcionales. La metodología

planteada permitirá establecer una formulación base adecuada mediante la evaluación fisicoquímica y sensorial de diferentes matrices libres de gluten, definiendo condiciones tecnológicas apropiadas para la incorporación de compuestos bioactivos.

El diseño experimental propuesto permitirá analizar el efecto del nivel de incorporación de microcápsulas sobre las propiedades tecnológicas del producto y su capacidad antioxidante, contribuyendo a la generación de una matriz alimentaria funcional con potencial aplicación en poblaciones que requieren alternativas libres de gluten.

Se espera que la aplicación de microencapsulación favorezca la protección de los carotenoides durante el procesamiento térmico y el almacenamiento, permitiendo conservar su funcionalidad dentro del alimento y sentando bases para el desarrollo de productos horneados con valor agregado nutricional.

Como proyección del estudio, se plantea la realización de investigaciones futuras orientadas a evaluar la bioaccesibilidad y potencial biodisponibilidad de los carotenoides presentes en las galletas enriquecidas, mediante modelos de digestión gastrointestinal simulada. Estos estudios permitirán determinar el grado de liberación y disponibilidad de los compuestos bioactivos tras el consumo, consolidando el enfoque funcional del producto desarrollado.

En conjunto, el proyecto establece fundamentos experimentales para el desarrollo de alimentos innovadores que integren estabilidad tecnológica, funcionalidad nutricional y aprovechamiento de materias primas vegetales, contribuyendo al avance de investigaciones en alimentos funcionales libres de gluten.

REFERENCIAS

[1] Polanco Allué, "Enfermedad celíaca," Revista del Laboratorio Clínico, vol. 7, no. 4, pp. 141–144, 2014. https://doi.org/10.1016/J.LABCLI.2014.10.003

[2] R. Tormo, Intolerancias y alergias alimentarias, II Congreso de Alimentación, Nutrición y Dietética, 2018. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6595858.pdf

[3] A. S. M. Saleh, P. Wang, N. Wang, S. Yang, y Z. Xiao, "Technologies for enhancement of bioactive components and potential health benefits of cereal and cereal-based foods: Research advances and application challenges," Crit. Rev. Food Sci. Nutr., vol. 59, no. 2, pp. 207–227, 2019, doi: 10.1080/10408398.2017.1363711.

[4] O. Gorach, O. Dzyundzya, y N. Rezvykh, "Innovative Technology for the Production of Gluten-free Food Products of a New Generation," Curr. Nutr. Food Sci., vol. 20, no. 6, pp. 734–744, jul. 2024, doi: 10.2174/0115734013280307231123055025.

[5] A. Aziz, S. Noreen, W. Khalid, A. Ejaz, I. Faiz ul Rasool, Maham, A. Munir, Farwa, M. Javed, S. Ercisli, Z. Okcu, R. A. Marc, G. A. Nayik, S. Ramniwas, y J. Uddin, "Pumpkin and Pumpkin Byproducts: Phytochemical Constitutes, Food Application and Health Benefits," ACS Omega, vol. 8, no. 26, pp. 23346–23357, jul. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c02176.

[6] W. Roongruangsri y J. Bronlund, "Drying characteristics and carotenoid retention in pumpkin," Int. J. Food Eng., vol. 11, no. 6, pp. 507–519, 2015, doi: 10.1515/ijfe-2014-0263.

[7] M. Mohammadian, M. Waly, M. Moghadam, Z. Emam-Djomeh, M. Salami, y A. Moosavi-Movahedi, "Nanostructured food proteins as efficient systems for the encapsulation of bioactive compounds," Food Sci. Hum. Wellness, vol. 9, no. 3, pp. 199–213, sept. 2020, doi: 10.1016/j.fshw.2020.04.009.

[8] P. D. F. Santos, F. T. V. Rubio, M. P. da Silva, L. S. Pinho, y C. S. Fávaro-Trindade, "Microencapsulation of carotenoid-rich materials: a review," Food Res. Int., vol. 147, art. 110571, pp. 1–25, 2021, doi: 10.1016/j.foodres.2021.110571.

[9] X. Y. Li, M. B. Wu, M. Xiao, S. H. Lu, Z. M. Wang, J. M. Yao, y L. R. Yang, "Microencapsulated β-carotene preparation using different drying treatments," J. Zhejiang Univ. Sci. B, vol. 20, no. 11, pp. 901–909, nov. 2019, doi: 10.1631/jzus.B1900157.

[10] R. Rodrigues, D. Bilibio, M. S. V. Plata-Oviedo, E. A. Pereira, M. L. Mitterer-Daltoé, E. C. Perin, y S. T. Carpes, "Microencapsulated and lyophilized propolis co-product extract as antioxidant synthetic replacer on traditional Brazilian starch biscuit," Molecules, vol. 26, no. 21, art. 6400, oct. 2021, doi: 10.3390/molecules26216400.

[11] 3A. W. Indrianingsih, V. T. Rosyida, C. Darsih, W. Apriyana, A. C. Iwansyah, Y. Khasanah, A. Kusumaningrum, A. Windarsih, E. R. N. Herawati, D. Muzdalifah, y M. I. Sulistyowaty, "Physicochemical properties, antioxidant activities, β-carotene content, and sensory properties of cookies from pumpkin (Cucurbita moschata) and modified cassava flour (Manihot esculenta)," Bioact. Carbohydr. Diet. Fibre, vol. 31, art. 100398, 2024, doi: 10.1016/j.bcdf.2023.100398.

[12] J. A. Rodríguez Manrique, "Desarrollo de ingredientes funcionales con capacidad antioxidante a partir de la ahuyama (Cucurbita moschata) y el almidón de ñame (Dioscorea rotundata) mediante el uso del secado por aspersión y la extrusión como tecnologías de procesamiento," Tesis Doctoral, Univ. Caldas, Manizales, Colombia, 2024.

Diseño de un Sistema de Pronósticos de la Eficiencia Global de los Equipos (OEE) en Tiempo Real bajo el Marco RAMI 4.0: Caso de estudio

1st Camilo A. Herrera
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Antonio Nariño
Bogotá, D.C., Colombia
cherrera25@uan.edu.co

2nd Jariser J. Núñez
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Antonio Nariño
Bogotá, D.C., Colombia
jnunez05@uan.edu.co

3rd Freddy A. Pérez
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad Antonio Nariño
Bogotá, D.C., Colombia
fperez271@uan.edu.co

***Resumen*—Este estudio establece el diseño un sistema de pronóstico en tiempo real del Overall Equipment Effectiveness (OEE) basado en la arquitectura RAMI 4.0 mediante el protocolo OPC UA. Supera las métricas descriptivas tradicionales al incorporar análisis predictivo que anticipa fallos y optimiza el desempeño operativo. El sistema recolecta, organiza y analiza datos operativos en tiempo real para pronosticar los tres componentes del OEE (disponibilidad, rendimiento y calidad) mediante un enfoque cuantitativo y un modelo de aprendizaje automático. La arquitectura garantiza interoperabilidad con capas superiores de planificación empresarial (ERP). Como resultado, se desarrolla una arquitectura preliminar y una validación inicial del sistema de pronóstico del OEE que predice pérdidas de productividad y facilita la toma de decisiones orientada a la mejora continua. Además, fortalece la formación académica en Industria 4.0, promoviendo competencias en análisis de datos, automatización y sistemas ciberfísicos. El sistema se valida en la estación FESTO Storage Station en un entorno académico, con potencial aplicación industrial. Al integrar RAMI 4.0 y OPC UA, se validan soluciones tecnológicas para la predicción de indicadores y la mejora de la eficiencia operativa, contribuyendo al fortalecimiento de capacidades institucionales en automatización y al desarrollo de talento en manufactura inteligente.**

***Index Terms*—Industria 4.0, RAMI 4.0, OPC UA, OEE**

I. Introducción

La Eficiencia Global de los Equipos (OEE, por sus siglas en inglés), es un indicador clave de desempeño (KPI) ampliamente adoptado en la industria manufacturera para medir la productividad integral de un sistema productivo. Este indicador sintetiza el impacto de las pérdidas operacionales al evaluar tres componentes críticos: disponibilidad, rendimiento y calidad [1], [4]. Gracias a su capacidad para evaluar el desempeño de los procesos industriales, el OEE se ha consolidado como una herramienta esencial dentro de las estrategias de Mantenimiento Productivo Total (TPM) [5].

No obstante, aunque el OEE es ampliamente utilizado para medir la eficiencia de los sistemas productivos, la incorporación de capacidades de pronóstico en tiempo real aún es limitada en plataformas académicas y de entrenamiento industrial. En la mayoría de los casos, el indicador se emplea únicamente con fines de monitoreo y análisis histórico, sin aprovechar los datos operacionales para anticipar comportamientos futuros del proceso, detectar posibles fallos o apoyar estrategias de mantenimiento predictivo y toma de decisiones en tiempo real [6], [8].

Con el advenimiento de la Industria 4.0, se han impulsado marcos de referencia como el Modelo de Arquitectura de Referencia para Industria 4.0 (RAMI 4.0), que proporciona una estructura tridimensional para organizar sistemas ciberfísicos (CPS) y garantizar su interoperabilidad [9], [11]. El protocolo de comunicación OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) se ha consolidado como un estándar para el intercambio de datos seguro, confiable y estandarizado en tiempo real entre dispositivos industriales y sistemas de software [12], [13]. A pesar de estos avances tecnológicos, persiste una brecha entre la disponibilidad de datos industriales y la implementación de modelos predictivos aplicados a indicadores de desempeño como el OEE, particularmente en entornos académicos. Muchos laboratorios disponen de infraestructura automatizada y mecanismos de adquisición de datos; sin embargo, carecen de herramientas que permitan transformar dicha información en capacidades de análisis predictivo y soporte inteligente para la toma de decisiones.

El laboratorio de automatización industrial de la Universidad Antonio Nariño dispone de una estación FESTO Storage Station (ver Fig. 1), la cual funciona como una plataforma ciberfísica orientada a la enseñanza de procesos de almacenamiento y gestión de inventarios. No obstante, esta estación presenta una limitación metodológica y práctica: carece de un sistema capaz de pronosticar el OEE en tiempo real. Esta ausencia genera un vacío en dos niveles: (1) académico, al limitar la formación de los estudiantes en tecnologías de Industria 4.0, análisis de datos y toma de decisiones basada en datos; y (2) aplicativo, al no disponer de un modelo de pronóstico transferible a entornos productivos reales, afectando la planificación de la producción, la anticipación de fallos y la reducción de pérdidas operativas.

Ante esta problemática, el presente estudio busca responder a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo debe ser estructurado un sistema de pronósticos del OEE en tiempo

real, bajo el marco de la arquitectura RAMI 4.0, mediante el protocolo de comunicación OPC UA, que permita la toma de decisiones orientadas a la optimización del desempeño en la estación FESTO Storage Station?

Para ello, se propone el diseño de un sistema que integre la recolección de datos operativos vía OPC UA, su estructuración bajo RAMI 4.0, y la aplicación de modelos de Machine Learning (ML) para el pronóstico de los componentes del OEE. Este trabajo se justifica desde el ámbito social/académico (formación de profesionales competentes en transformación digital), económico/industrial (replicabilidad en empresas para anticipar fallas y optimizar recursos [14]) y profesional/productivo (conexión entre la investigación universitaria y las necesidades del sector). Investigaciones previas han demostrado las limitaciones de los enfoques descriptivos del OEE [15], [16] y la necesidad de utilizar ML para la toma de decisiones inteligente [17], [19], así como la importancia de protocolos estandarizados como OPC UA para garantizar la fiabilidad de los datos [20]. Sin embargo, la literatura actual carece de un sistema de pronóstico del OEE completamente integrado bajo RAMI 4.0 y validado en un entorno académico-industrial.



Figura 1. Estación Automatizada: FESTO Storage Station

II. Metodología

Para sentar las bases conceptuales y metodológicas, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura en bases de datos académicas (Scopus, Google Scholar, ScienceDirect) utilizando gestores bibliográficos (Mendeley). La búsqueda se centró en el pronóstico del OEE, la arquitectura RAMI 4.0 [9], el protocolo OPC UA [12], los modelos de machine learning aplicados a manufactura [18], [19] y los Sistemas de Producción Ciberfísicos (CPPS) [21], [22]. Este análisis permitió construir un marco teórico sólido y un estado del arte que justifica el uso de RAMI 4.0 y OPC UA como habilitadores del modelo de pronóstico.

Paralelamente, se definieron las necesidades tecnológicas y de datos para la implementación del sistema en la estación FESTO Storage Station. Esto implicó la identificación de las variables operativas clave necesarias para calcular los tres componentes del OEE, así como la ubicación del sistema propuesto dentro del modelo de referencia RAMI 4.0 [23]. Se estableció una estructura de datos alineada con este marco, garantizando la interoperabilidad con capas superiores de planificación de recursos empresariales (ERP).

- Obtención de datos: Los datos operativos empleados en esta fase fueron proporcionados a razón de un estudio titulado “Application of Industrial Agents for Availability and OEE Improvement in Cyber-Physical Production Systems” [24] de la Universidad Antonio Nariño. Dicho estudio implementó una celda Pick & Place emulada bajo una arquitectura de CPPS con control distribuido basado en sistemas multiagente [21], [25]. El dataset resultante contiene 2520 ciclos de producción continua, registrando las variables `Disponibilidad_%`, `Rendimiento_%`, `Calidad_%` y `OEE_Global_%`. Los datos fueron generados en condiciones controladas que incluyen fallos inducidos en sensores para evaluar la resiliencia del sistema, lo que los hace adecuados para la validación inicial del modelo de pronóstico.
- Adaptación del modelo de Machine Learning: Sobre el dataset suministrado, se desarrolló una etapa de modelado predictivo orientada al pronóstico de los tres componentes fundamentales del OEE. El proceso, implementado en Python mediante un cuaderno Jupyter, sigue el flujo de trabajo ilustrado en la Fig. 2.
  - Preprocesamiento de datos: Se diseñó una función de limpieza denominada `extract_number`, encargada de extraer valores numéricos a partir de columnas que presentaban formatos mixtos (por ejemplo, cadenas con comas decimales o caracteres no numéricos). Dicha función reemplazó las comas decimales por puntos y forzó la conversión a tipo float. Posteriormente, se generó un índice temporal secuencial `(period)` para conferir estructura de serie temporal a las observaciones, dado que el registro original no contenía una marca de tiempo continua.
  - Modelado y entrenamiento: Para cada componente del OEE (Disponibilidad, Rendimiento, Calidad), se construyó un conjunto de datos con 5 rezagos (lags) como variables predictoras. Se entrenaron y evaluaron cuatro tipos de modelos de regresión supervisada y un modelo de series temporales: Regresión Lineal, Random Forest (200 estimadores), Gradient Boosting (200 estimadores) y ARIMA(2,0,2). El rendimiento se evaluó mediante el Error Absoluto Porcentual Medio (MAPE) sobre un conjunto de prueba que representaba el 15 % de los datos, siguiendo practicas recomendadas en la literatura [18], [26].
  - Selección del mejor modelo y pronóstico: Para cada variable, se seleccionó el modelo con menor MAPE. Con el mejor modelo de cada variable, se realizó un

pronóstico recursivo para los siguientes 5 periodos (H=5). A partir de las predicciones de disponibilidad, rendimiento y calidad, se calculó el OEE futuro mediante la fórmula:

$$\text{OEE}_{\text{pred}} = \frac{\text{Disp}_{\text{pred}} \times \text{Rend}_{\text{pred}} \times \text{Cal}_{\text{pred}}}{10000{,}0} \quad (1)$$

A. Steven Ortiz et al. [24], señala que la captura de los registros temporales necesarios para estimar los componentes del OEE se apoya en un entorno experimental no invasivo implementado sobre un CPPS. Como paso inicial, se examina la programación del PLC y el comportamiento de sus sensores clave, estableciendo situaciones de avería programada. La conexión del agente resiliente (RA) se efectúa mediante OPC UA, posibilitando una supervisión asincrónica de las señales del proceso sin interferir en la lógica cíclica del PLC. Los agentes reactivos, situados en el plano físico y asociados directamente a sensores y actuadores, documentan momentos específicos como la detección de anomalías, el inicio de la falla y la actuación del RA. Mientras tanto, los agentes proactivos, localizados en el plano cibernético, agregan y alinean estas referencias temporales para una evaluación integral del sistema. Esta disposición basada en sistemas multiagente (MAS) permite registrar los tiempos de detención imprevistos y los intervalos de producción mediante una vigilancia ininterrumpida.

Para medir cuantitativamente el efecto del MAS, se enfrentan dos configuraciones: una línea base (sin RAs) y otra con RAs, enfocándose en la variación del MTTR (tiempo medio de reparación) y su influencia en la disponibilidad. En los ensayos con fallos inducidos, los RAs corrigen señales y resuelven discrepancias; el sistema anota los momentos de detección del error, comienzo y término de la corrección, y restablecimiento de la operativa normal. Con estas referencias se determinan los períodos de inactividad y los ciclos productivos reales. El enfoque emplea Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE) con SysML para organizar el registro de sucesos temporales, garantizando la rastreabilidad de cada métrica del OEE. El estudio de la continuidad operativa, gracias al monitoreo asincrónico y la acción compensadora del RA, permite estimar la mejoría en disponibilidad y rendimiento, contrastando directamente los lapsos transcurridos entre la aparición de una falla y la recuperación en ambas situaciones.

III. Resultados

La ejecución del modelo de ML sobre el dataset proporcionado arrojó los siguientes resultados:

En la Tabla I se resumen los valores del Error Absoluto Porcentual Medio (MAPE) obtenidos para cada componente del OEE tras el entrenamiento y validación de los cuatro modelos implementados. Para cada variable se seleccionó el modelo con menor MAPE (resaltado en negrilla), el cual se utilizó para el pronóstico recursivo.

- Rendimiento de los modelos: La Tabla I presenta los valores de MAPE para cada modelo y variable.
  Interpretación:

Tabla I
Comparación del MAPE (%) por modelo y variable.

Variable	RL	RF	GB	ARIMA
Disponibilidad	1.094	0.734	**0.607**	6.345
Rendimiento	**43.240**	47.881	51.838	51.581
Calidad	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**0.000**

RL: Regresión Lineal; RF: Random Forest; GB: Gradient Boosting.

  - El modelo de Gradient Boosting logra un error mínimamente bajo para la disponibilidad (0.607 %), demostrando una alta precisión en la predicción de esta variable.
  - Para el rendimiento, el mejor modelo fue la regresión lineal, pero con un MAPE del 43.24 %, lo que indica una mayor incertidumbre en las predicciones. Esto sugiere que el rendimiento podría estar influenciado por factores no lineales o patrones temporales más complejos no capturados completamente por los modelos lineales o basados en árboles con pocos rezagos.
  - La calidad mostró un MAPE de 0.00 % en todos los modelos, debido a que en el dataset suministrado esta variable permanece constante (valor fijo de 93.37 % a lo largo de todos los registros). Esto no refleja la variabilidad típica de un entorno productivo real [27], pero simplifica su pronóstico.
- Pronóstico a futuro: La Tabla II muestra las predicciones para los próximos 5 periodos.

Tabla II
Pronóstico para los próximos 5 periodos.

Periodo	Disp. (%)	Rend. (%)	Cal. (%)	OEE (%)
2516	82.438	93.114	93.37	71.672
2517	82.438	91.180	93.37	70.183
2518	82.438	90.114	93.37	69.363
2519	82.438	89.728	93.37	69.066
2520	82.518	89.070	93.37	68.626

Interpretación del pronóstico:

- La disponibilidad se mantiene prácticamente constante en torno a 82.44 %, con una ligera subida a 82.52 % en el último periodo, lo que indica una operación estable en cuanto a tiempos de parada programados y no programados.
- El rendimiento presenta una tendencia decreciente sostenida, pasando de 93.11 % a 89.07 % en cinco periodos. Esta disminución podría estar asociada a una pérdida gradual de velocidad del proceso o a la aparición de micro-paradas que no afectan la disponibilidad pero sí la eficiencia operativa [28].
- La calidad se mantiene invariable (93.37 %), coherente con la constancia observada en los datos históricos.

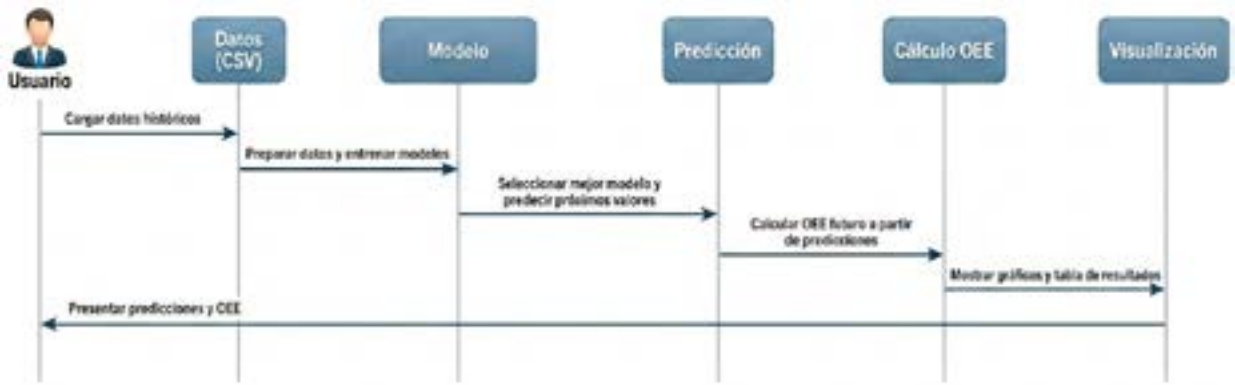


Figura 2. Predicción de OEE: Disponibilidad, Rendimiento y Calidad

- Como consecuencia, el OEE Global proyecta una reducción paulatina desde 71.67 % hasta 68.63 % en el horizonte de pronóstico. Aunque el valor sigue siendo moderadamente aceptable, la tendencia a la baja constituye una alerta temprana que permitiría tomar acciones correctivas (por ejemplo, ajustes de velocidad, mantenimiento preventivo) antes de que el indicador caiga por debajo de umbrales críticos (<65 %) [1].

- Visualización: Las gráficas generadas por el modelo (ver Fig. 3-6) muestran la serie histórica completa de las cuatro variables (periodos 1 a 2515) y la proyección para los siguientes 5 periodos. En dichas figuras se observa claramente la estabilidad de la disponibilidad y la calidad, así como la tendencia descendente del rendimiento y del OEE global, validando visualmente los resultados numéricos de la Tabla II.
  Estos resultados constituyen la base para la integración futura del sistema de pronóstico en la estación FESTO Storage Station bajo la arquitectura RAMI 4.0, demostrando la viabilidad de anticipar el comportamiento del OEE mediante técnicas de aprendizaje automático.

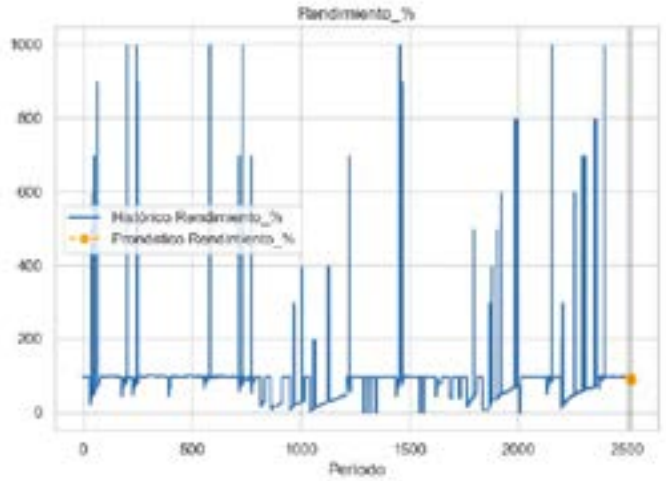


Figura 4. Evolución historica y pronostico del rendimiento

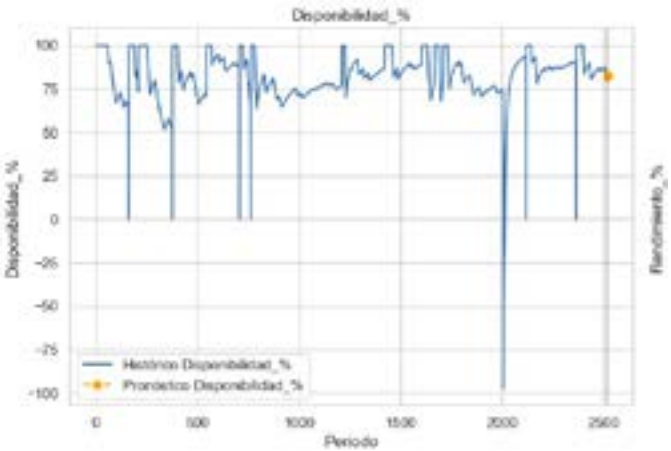


Figura 3. Evolución historica y pronostico de la disponibilidad

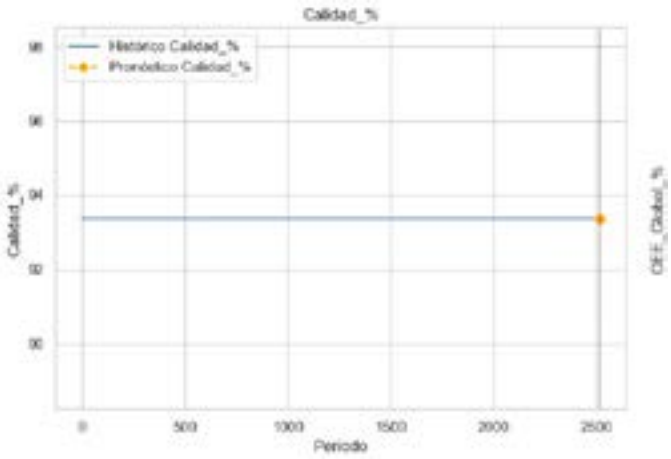


Figura 5. Evolución historica y pronostico de la calidad

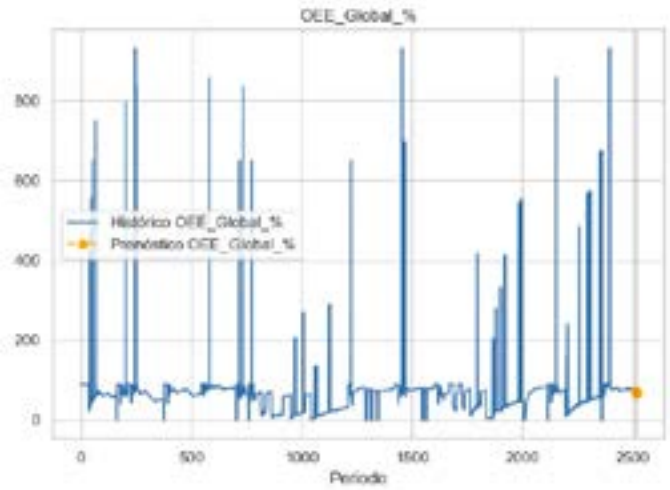


Figura 6. Evolución historica y pronostico del OEE global

IV. Conclusiones

En el presente estudio, se ha logrado diseñar la base de un sistema de pronóstico del OEE en tiempo real alineado con la arquitectura RAMI 4.0 y el protocolo OPC UA. Si bien el proyecto se encuentra en su fase inicial, los resultados obtenidos permiten extraer las siguientes conclusiones:

- Viabilidad del enfoque: La integración de un dataset operativo (simulado, pero realista) con un pipeline de Machine Learning ha demostrado ser factible para generar pronósticos del OEE y sus componentes. Los modelos de ML (Gradient Boosting y Regresión Lineal) mostraron un rendimiento adecuado para la disponibilidad y el rendimiento, con MAPE aceptables dentro del contexto industrial [18], [19].
- Importancia del preprocesamiento de datos: La heterogeneidad en los formatos de datos provenientes de sistemas legacy (como los PLC) requiere de una capa robusta de limpieza y estandarización. La función de extracción numérica implementada es un primer paso hacia la interoperabilidad que ofrece OPC UA [12].
- Identificación de fortalezas y debilidades del dataset: El dataset suministrado presentó una calidad constante (calidad siempre en 93.37 %), lo que simplificó el pronóstico,pero no refleja la variabilidad del mundo real [27]. Esto resalta la necesidad de contar con datos más diversos y con ruido para entrenar modelos más robustos. La colaboración con la FIMEB es crucial para acceder a datos de mayor fidelidad en futuras fases.
- Cumplimiento parcial de objetivos: Se ha completado la fundamentación teórica y la definición de requisitos, así como la adaptación y validación inicial del modelo de ML. El siguiente paso será integrar este modelo con la estación física mediante OPC UA y bajo la estructura de RAMI 4.0 (ver Fig. 7).

Trabajo futuro: En la segunda fase del proyecto, se desarrollará un Asset Administration Shell (AAS) escalable, basado en la norma IEC 63278, para la estación FESTO Storage Station [29]. Este AAS permitirá la interoperabilidad semántica y la estandarización de la información de la estación, facilitando su integración en ecosistemas de Industria 4.0 y su replicabilidad en otras plantas similares. El modelo de ML desarrollado se desplegará como un servicio dentro del AAS, desacoplando la lógica de pronóstico del hardware subyacente. Además, se integrará el modelo con un gemelo digital de la estación para validar en tiempo real las predicciones y cerrar el lazo de control predictivo [30], [31].



Figura 7. RAMI 4.0

References

[1] R. T. Alnounou et al., İmproving automated pallet handling procedures at a Saudi milk factory through overall equipment effectiveness,"Benchmarking, vol. 30, no. 10, pp. 3953–3981, Dec. 2023.
[2] L. Lucantoni, S. Antomarioni, F. E. Ciarapica, and M. Bevilacqua, .ª rule-based machine learning methodology for the proactive improvement of OEE: a real case study,İnt. J. Qual. Reliab. Manag., vol. 41, no. 5, pp. 1356–1376, Apr. 2024.
[3] F. Durán Hernández and L. A. Guerrero Chávez, .ºVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE): UNA HERRAMIENTA CLAVE PARA LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN,Çiencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, vol. 9, no. 3, Jul. 2025.
[4] M. M. Schiraldi and M. Varisco, .ºverall Equipment Effectiveness: consistency of ISO standard with literature,Çomput. Ind. Eng., vol. 145, Jul. 2020.
[5] S. Nakajima, Introduction to TPM. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988.

[6] P. Dobra and J. Jósvai, "Predicting the Impact of Product Type Changes on Overall Equipment Effectiveness through Machine Learning,"Period. Polytech. Mech. Eng., vol. 67, no. 1, pp. 81–86, 2023.
[7] K. Gunasekaran et al., "Smart Decision-Making and Communication Strategy in Industrial Internet of Things,ÏEEE Access, vol. 11, pp. 28222–28235, 2023.
[8] M. Canizo, A. Conde, S. Charramendieta, R. Miñon, R. G. Cid-Fuentes, and E. Onieva, Ïmplementation of a large-scale platform for cyber-physical system real-time monitoring,ÏEEE Access, vol. 7, pp. 52455–52466, 2019.
[9] Bitkom e.V., VDI/VDE, and ZVEI, Ïmplementation Strategy Industrie 4.0: Report on the results of the Industrie 4.0 Platform,"Frankfurt, 2016.
[10] L. F. Baptista and J. Barata, "Piloting industry 4.0 in SMEs with RAMI 4.0: An enterprise architecture approach,"Procedia Comput. Sci., vol. 192, pp. 2826–2835, 2021.
[11] C. Binder et al., "Bridging the Gap: Deriving Specific Reference Architectures from RAMI 4.0 for Flexible Production Systems,ÏFAC-PapersOnLine, vol. 59, no. 10, pp. 1119–1124, 2025.
[12] B. Wally, C. Huemer, A. Mazak, and M. Wimmer, ÏEC 62264-2 for AutomationML,"2018. [Online]. Available: https://www.automationml.org/
[13] X. Ye and S. H. Hong, .An AutomationML/OPC UA-based Industry 4.0 Solution for a Manufacturing System,ïn 2018 IEEE 23rd Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2018, pp. 543–550.
[14] T. Facchinetti and G. Citterio, .Application of the Overall Equipment Effectiveness to a Service Company,ÏEEE Access, vol. 10, pp. 106613–106640, 2022.
[15] O. Arpacik and M. M. Ankarali, .An Efficient Implementation of Online Model Predictive Control with Field Weakening Operation in Surface Mounted PMSM,ÏEEE Access, vol. 9, pp. 167605–167614, 2021.
[16] B. Silva et al., .Enhance the Injection Molding Quality Prediction with Artificial Intelligence to Reach Zero-Defect Manufacturing,"Processes, vol. 11, no. 1, Jan. 2023.
[17] L. A. Cruz Salazar and B. Vogel-Heuser, Ïndustrial Artificial Intelligence: A Predictive Agent Concept for Industry 4.0,ïn IEEE Int. Conf. Ind. Informatics (INDIN), 2022, pp. 27–32.
[18] C. I. Valero, F. Boronat, M. Esteve, and C. E. Palau, .AI for detecting variations in the OEE data reception rate in the manufacturing industry,ïn ECCOMAS, 2023, pp. 1185–1195.
[19] M. Kikolski, "Determination of ISO 22400 Key Performance Indicators using Simulation Models: The Concept and Methodology,ïn Int. Conf. Model-Driven Engineering and Software Development, 2020, pp. 92–99.
[20] H. Lu, L. Zhang, M. J. Deen, K. Wang, H. Cheng, and L. T. Yang, .Online Credibility Assessment of Equipment Digital Twin for Discrete Manufacturing,ÏEEE Trans. Autom. Sci. Eng., vol. 22, pp. 14763–14774, 2025.
[21] L. A. Cruz Salazar, D. Ryashentseva, A. Lüder, and B. Vogel-Heuser, Çyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern—comparison of selected approaches mapping four agent patterns,Ïnt. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 105, no. 9, pp. 4005–4034, Dec. 2019.
[22] B. Vogel-Heuser, J. Lee, and P. Leitão, .Agents enabling cyber-physical production systems,.at - Automatisierungstechnik, vol. 63, no. 10, pp. 777–789, Oct. 2015.
[23] DIN, Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0)", DIN SPEC 91345, Apr. 2016.
[24] J. P. Rueda Loaiza et al., .Application of Industrial Agents for Availability and OEE Improvement in Cyber-Physical Production Systems,"LACCEI International Multi-Conference, 2026 (en prensa).
[25] B. Vogel-Heuser, M. Seitz, L. A. Cruz Salazar, F. Gehlhoff, A. Dogan, and A. Fay, "Multi-agent systems to enable Industry 4.0,.at - Automatisierungstechnik, vol. 68, no. 6, pp. 445–458, Jun. 2020.
[26] R. Singh, D. B. Shah, A. M. Gohil, and M. H. Shah, .Overall equipment effectiveness (OEE) calculation - Automation through hardware & software development,"Procedia Engineering, vol. 51, pp. 579–584, 2013.
[27] H. Li, H. Nian, B. Hu, and Z. He, Ïmpedance Dataset Optimization Method for Data-Driven Modeling of Renewable Power Generation Equipment Considering Multi-Operation Conditions,"J. Mod. Power Syst. Clean Energy, vol. 13, no. 5, pp. 1642–1652, 2025.
[28] J. Mund, M. Junker, S. Bougouffa, S. Cha, and B. Vogel-Heuser, "Model-based availability analysis for automated production systems,ïn *Proc. 15th ACM-IEEE Int. Conf. Formal Methods and Models for System Design*, 2017, pp. 46–55.
[29] E. Chacon et al., "Towards a Digital Twin-Based Evaluation Framework for Cyber-Physical Production Systems: Latin America SMEs Guideline,ïn 2025 IEEE 30th Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2025, pp. 1–6.
[30] I. C. Fantozzi, A. Santolamazza, G. Loy, and M. M. Schiraldi, "Digital Twins: Strategic Guide to Utilize Digital Twins to Improve Operational Efficiency in Industry 4.0,"Future Internet, vol. 17, no. 1, Jan. 2025.
[31] M. G. Khan et al., "PerfCam: Digital Twinning for Production Lines Using 3D Gaussian Splatting and Vision Models,ÏEEE Access, vol. 13, pp. 85390–85406, 2025.

Evaluación de la Amenaza por Inundación en el Sector Urbano de la Cuenca del Río Bugalagrande (Colombia)

Julián Garzón Barrero
Programa de Ingeniería Topográfica y Geomática
Universidad del Quindío
Armenia (Q.), Colombia
https://orcid.org/0000-0002-4871-3726

José Joaquín Vila Ortega
Programa de Ingeniería Topográfica y Geomática
Universidad del Quindío
Armenia (Q.), Colombia
https://orcid.org/0000-0001-9358-4903

Jhon Jairo Duque Arango
Programa de Ingeniería Topográfica y Geomática
Universidad del Quindío
Armenia (Q.), Colombia
https://orcid.org/0000-0002-0871-1486

***Resumen*—El incremento en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos ha convertido a las inundaciones en uno de los fenómenos naturales con mayor impacto social y económico en entornos urbanos y periurbanos, donde la expansión territorial no planificada y la ocupación de zonas próximas a los cauces incrementan de manera significativa la exposición de población, infraestructura y servicios esenciales.**

Esta propuesta se enfoca en la estimación de la amenaza por inundación en el sector urbano de la cuenca del río Bugalagrande (Colombia), mediante la integración de modelación hidrológica, simulación hidráulica y análisis geoespacial bajo escenarios de diseño, con el fin de delimitar zonas potencialmente inundables.

Los caudales de diseño se estimarán en HEC-HMS mediante el método SCS-CN, parametrizado con información de cobertura del suelo y grupos hidrológicos, empleando tormentas asociadas a periodos de retorno de 50 y 100 años. Posteriormente, se implementará HEC-RAS para la simulación hidráulica unidimensional, con el fin de determinar profundidades de flujo y velocidades. La integración en un entorno SIG permitirá la delimitación espacial y la clasificación de la amenaza con base en criterios combinados de profundidad–velocidad.

Se espera identificar la extensión y alcance de las áreas inundables, así como las profundidades y velocidades de flujo, particularmente en sectores con condiciones de confinamiento hidráulico. El análisis comparativo entre distintos periodos de retorno permitirá evaluar la sensibilidad del sistema fluvial frente a variaciones en la magnitud de los eventos extremos y caracterizar su respuesta hidráulica bajo diferentes condiciones de diseño.

La contribución principal de este estudio radica en la estructuración de una metodología replicable que se consolida como herramienta técnica de soporte para la planificación territorial, orientada a fortalecer la resiliencia urbana y la adaptación frente eventos de amenaza por inundación.

Palabras clave—evaluación de la amenaza por inundación; modelación hidrológica; simulación hidráulica.

I. Introducción

Las inundaciones urbanas representan uno de los principales problemas asociados a la ocupación de planicies aluviales y al crecimiento de asentamientos en zonas con restricciones hidráulicas [1][2]. En cuencas intervenidas, la expansión urbana, la modificación de coberturas superficiales y la reducción de áreas de regulación natural incrementan la escorrentía y favorecen procesos de desbordamiento durante eventos hidrometeorológicos extremos. Estas condiciones generan impactos directos sobre infraestructura, vivienda y conectividad urbana, particularmente en municipios localizados sobre corredores fluviales de respuesta rápida [3].

La evaluación espacial de amenaza por inundación requiere integrar procesos hidrológicos, comportamiento hidráulico del cauce y representación geoespacial de las áreas potencialmente afectadas [4]. En este contexto, la combinación de modelos hidrológicos e hidráulicos con herramientas SIG permite estimar caudales de diseño, simular dinámicas de flujo y delimitar espacialmente profundidades, velocidades y extensión de inundación bajo distintos escenarios de recurrencia [5]. Este tipo de aproximaciones resulta especialmente relevante en entornos urbanos donde pequeñas variaciones topográficas y restricciones geométricas del cauce condicionan la propagación lateral del flujo.

La cuenca del río Bugalagrande, en el departamento del Valle del Cauca, ha presentado históricamente eventos de desbordamiento que afectan sectores urbanos localizados sobre las márgenes del río [6]. La configuración geomorfológica del valle, junto con la presencia de zonas de baja pendiente y sectores con limitada capacidad hidráulica, favorece procesos recurrentes de inundación durante eventos de precipitación extrema.

En este contexto, el presente estudio propone diseñar un flujo metodológico integrado para la evaluación espacial de amenaza por inundación urbana, orientado a la delimitación de sectores críticos mediante la articulación de información hidrológica, simulación hidráulica y análisis geoespacial. La cuenca del río Bugalagrande se emplea como caso demostrativo

para verificar la coherencia del procedimiento y ejemplificar su aplicación bajo escenarios de diseño.

II. Métodos

A. Área de Estudio

La cuenca del río Bugalagrande se localiza en el centro del departamento del Valle del Cauca, Colombia, como parte del sistema tributario del río Cauca. El análisis se centra en el corredor fluvial que atraviesa el sector urbano del municipio de Bugalagrande, donde se han presentado desbordamientos asociados a eventos intensos de precipitación y aumentos súbitos del caudal.

La cuenca presenta un fuerte gradiente altitudinal entre la Cordillera Central y las planicies aluviales del valle del Cauca, condición que favorece la concentración rápida de escorrentía hacia el cauce principal [7]. En el tramo urbano predominan superficies de baja pendiente, márgenes ocupadas y sectores con limitada capacidad de drenaje, lo que incrementa la susceptibilidad frente a inundaciones.

La zona de estudio fue delimitada sobre el tramo urbano con mayor exposición potencial, considerando su relevancia para la simulación hidrológica, hidráulica y la delimitación espacial de áreas inundables.

B. Datos y Flujo Metodológico

La metodología se estructuró como un flujo integrado para estimar la amenaza por inundación urbana a partir de la articulación entre información hidrometeorológica, variables geoespaciales, modelación hidrológica y simulación hidráulica. El diseño metodológico buscó mantener trazabilidad entre las condiciones físicas de la cuenca, la generación de caudales de diseño y la delimitación espacial de las áreas potencialmente inundables.

La información de entrada se organizó en dos grupos principales. El primero correspondió a datos geoespaciales utilizados para caracterizar la cuenca y parametrizar la respuesta hidrológica: modelo digital de elevación, cobertura del suelo y características texturales de los suelos. El segundo grupo correspondió a información hidrometeorológica, conformada por registros de precipitación provenientes de estaciones del IDEAM, empleados para la construcción de escenarios de lluvia extrema. Adicionalmente, se incorporó información topográfica de detalle en el tramo urbano del río, necesaria para representar la geometría hidráulica del cauce y sus márgenes.

El componente hidrológico inició con la delimitación de la cuenca, la red de drenaje y las subcuencas de aporte, a partir del modelo digital de elevación. Esta sectorización permitió organizar espacialmente las unidades de respuesta hidrológica y establecer la relación entre precipitación, escorrentía y tránsito de caudales hacia el cauce principal. La precipitación de diseño fue estimada a partir del análisis de registros históricos, la ponderación espacial de estaciones mediante polígonos de Thiessen, el ajuste de eventos extremos y la construcción de hietogramas asociados a periodos de retorno de 50 y 100 años.

La generación de escorrentía se representó mediante el método SCS-CN, parametrizado con información de cobertura del suelo y grupos hidrológicos derivados de las características texturales. Los valores de número de curva fueron calculados para cada subcuenca como insumo para estimar pérdidas, tiempos de respuesta y caudales de diseño. Posteriormente, los hidrogramas fueron simulados en HEC-HMS, incorporando la transformación lluvia–escorrentía y el tránsito de flujo en la red hidrográfica.

Los caudales resultantes constituyeron la condición hidrológica de entrada para la simulación hidráulica del tramo urbano. En esta fase se implementó HEC-RAS para representar el comportamiento del flujo en el cauce y las áreas adyacentes, considerando la geometría topográfica disponible y condiciones hidráulicas asociadas a los escenarios de diseño. La simulación permitió estimar variables hidráulicas relevantes para la evaluación de amenaza, principalmente profundidad, velocidad y extensión espacial de la inundación.

Finalmente, los resultados hidráulicos fueron integrados en un entorno SIG para delimitar las áreas potencialmente inundables y analizar su distribución espacial en relación con el tejido urbano, la configuración del cauce y las condiciones topográficas locales. Este último componente permitió pasar de la estimación hidrológica e hidráulica a una lectura territorial de la amenaza, identificando sectores críticos bajo escenarios extremos y permitiendo estructurar un flujo metodológico aplicable a cuencas urbanas con información disponible de precipitación, relieve, cobertura del suelo y topografía de detalle.

III. Resultados y Discusión

A. Integración Metodológica para la Evaluación Espacial de la Amenaza

La integración entre información geoespacial, análisis hidrometeorológico, simulación hidrológica y modelación hidráulica permitió estructurar un flujo metodológico orientado a la evaluación espacial de amenaza por inundación urbana. La articulación secuencial entre los distintos componentes facilitó la transferencia de variables físicas de la cuenca hacia escenarios hidráulicos espacialmente explícitos, permitiendo representar procesos de generación de escorrentía, tránsito de caudales y propagación lateral del flujo en el corredor urbano del río Bugalagrande.

La metodología integró información de cobertura del suelo, características texturales y modelos digitales de elevación para parametrizar la respuesta hidrológica de las subcuencas y estimar caudales de diseño asociados a escenarios hidrometeorológicos extremos. Posteriormente, los resultados hidrológicos fueron incorporados en la simulación hidráulica para representar la dinámica del flujo y delimitar espacialmente áreas potencialmente inundables. La integración final en un entorno SIG permitió relacionar variables hidráulicas como profundidad, velocidad y extensión de inundación con la configuración urbana y geomorfológica del área de estudio.

La estructura metodológica propuesta permitió mantener coherencia entre las condiciones hidrológicas de entrada y la representación espacial de la amenaza, integrando escalas de análisis asociadas tanto a la respuesta de la cuenca como al

comportamiento hidráulico del tramo urbano. Asimismo, el flujo metodológico facilitó la trazabilidad entre datos de entrada, simulación hidrológica, modelación hidráulica y delimitación territorial de sectores críticos, proporcionando un esquema metodológico aplicable en cuencas urbanas con disponibilidad de información hidrometeorológica y topográfica básica.



Fig. 1. Flujo metodológico integrado para la evaluación espacial de amenaza por inundación urbana en la cuenca del río Bugalagrande.

B. Respuesta Hidrológica e Hiráulica Bajo Escenarios de Diseño

La simulación hidrológica evidenció una respuesta diferenciada de la cuenca frente a los escenarios de precipitación extrema asociados a periodos de retorno de 50 y 100 años. Los caudales pico obtenidos alcanzaron valores de 518,8 m^3/s y 727,3 m^3/s, respectivamente, reflejando un incremento significativo en la magnitud de la respuesta hidrológica bajo condiciones de mayor recurrencia.

La simulación hidráulica permitió representar espacialmente el comportamiento del flujo en el tramo urbano del río Bugalagrande y evaluar la dinámica de inundación bajo ambos escenarios de diseño. Los resultados mostraron aumentos progresivos en profundidad, velocidad y extensión del área inundada a medida que se incrementó el caudal de entrada al sistema hidráulico.

En términos hidrodinámicos, las profundidades máximas alcanzaron valores cercanos a 2,5 m para el escenario de 50 años y aproximadamente 3 m para el escenario de 100 años, principalmente en sectores de baja pendiente y limitada capacidad de drenaje. Las velocidades del flujo aumentaron desde valores próximos a 0,55 m/s hasta aproximadamente 0,65 m/s, evidenciando una mayor capacidad de propagación lateral y acumulación superficial del agua bajo eventos extremos de mayor magnitud.

La extensión espacial de la inundación también presentó un incremento considerable entre escenarios, pasando de aproximadamente 27 ha en el escenario de 50 años a 35 ha para el escenario de 100 años. Estos resultados reflejan la sensibilidad hidráulica del corredor urbano frente a variaciones en la magnitud de los eventos hidrometeorológicos extremos y evidencian la capacidad del flujo metodológico para representar espacialmente cambios en la respuesta hidráulica del sistema fluvial.

C. Delimitación Espacial de Sectores Críticos

La representación espacial de la amenaza permitió identificar sectores urbanos con mayor susceptibilidad frente a procesos de desbordamiento e inundación. Las zonas más críticas se localizaron principalmente sobre el margen izquierdo del río, donde las condiciones topográficas favorecen la expansión lateral del flujo hacia áreas urbanizadas de menor elevación relativa.

Los resultados mostraron que los procesos de inundación estuvieron condicionados por la combinación entre estrechamientos de la sección hidráulica, cambios en la geometría del cauce y presencia de superficies urbanas con limitada capacidad de infiltración y drenaje. En varios sectores, el confinamiento hidráulico del flujo favoreció incrementos locales en profundidad y velocidad, intensificando la acumulación superficial del agua durante los escenarios extremos analizados.

Asimismo, las curvas pronunciadas del cauce generaron redistribuciones laterales del flujo que incrementaron la exposición de áreas urbanas localizadas sobre las márgenes externas de las curvas fluviales. Estas condiciones favorecieron procesos recurrentes de desbordamiento y propagación del flujo hacia sectores ocupados por infraestructura y vivienda.



Fig. 2. Profundidad de inundación y sectores críticos en el área urbana de Bugalagrande (TR = 100 años).

La delimitación espacial obtenida evidencia la utilidad de integrar modelación hidrológica, simulación hidráulica y análisis geoespacial dentro de un flujo metodológico único, permitiendo transformar variables hidrológicas e hidráulicas en información territorialmente explícita para la identificación de sectores críticos. Desde esta perspectiva, la metodología propuesta constituye una herramienta técnica de apoyo para procesos de planificación territorial y gestión del riesgo en entornos urbanos expuestos a amenaza por inundación.

IV. Conclusiones

El estudio permitió estructurar un flujo metodológico integrado para la evaluación espacial de amenaza por inundación urbana mediante la articulación de simulación hidrológica, modelación hidráulica y análisis geoespacial. La integración entre HEC-HMS, HEC-RAS y herramientas SIG facilitó la transición desde la estimación hidrológica hasta la delimitación espacial de sectores críticos bajo escenarios hidrometeorológicos extremos.

La aplicación demostrativa en la cuenca del río Bugalagrande evidenció la capacidad del flujo metodológico para representar diferencias en la respuesta hidráulica asociadas a distintos periodos de retorno. Los escenarios de 50 y 100 años generaron caudales pico de 518,8 m^3/s y 727,3 m^3/s, respectivamente, produciendo incrementos en profundidad, velocidad y extensión de la inundación dentro del corredor urbano analizado. Las profundidades máximas alcanzaron valores cercanos a 3 m y la superficie inundada se expandió hasta aproximadamente 35 ha bajo el escenario de mayor recurrencia.

La delimitación espacial permitió identificar sectores urbanos con mayor susceptibilidad hidráulica asociados a superficies de baja pendiente, estrechamientos del cauce y zonas con limitada capacidad de drenaje. Asimismo, la geometría fluvial y las variaciones topográficas locales condicionaron la propagación lateral del flujo y favorecieron procesos recurrentes de desbordamiento sobre áreas urbanizadas.

Desde una perspectiva metodológica, el flujo propuesto permitió integrar variables hidrológicas, hidráulicas y territoriales dentro de un esquema de análisis espacial orientado a la identificación de sectores críticos. En este sentido, la metodología constituye una herramienta de apoyo para procesos de planificación territorial y gestión del riesgo, con potencial de aplicación en otras cuencas urbanas con disponibilidad de información hidrometeorológica y topográfica básica.

Referencias

[1] R. M. Ashley, D. J. Balmforth, A. J. Saul, and J. D. Blanskby, “Flooding in the future—predicting climate change, risks and responses in urban areas,” *Water Sci. Technol.*, vol. 52, no. 5, pp. 265–273, 2005.

[2] B. Jongman, “Effective adaptation to rising flood risk,” *Nat. Commun.*, vol. 9, p. 1986, 2018.

[3] H. Wheater and E. Evans, “Land use, water management and future flood risk,” *Land Use Policy*, vol. 26, suppl. 1, pp. S251–S264, 2009.

[4] J. Teng, A. J. Jakeman, J. Vaze, B. F. W. Croke, D. Dutta, and S. Kim, “Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis,” *Environ. Model. Softw.*, vol. 90, pp. 201–216, 2017.

[5] H. Apel, G. T. Aronica, H. Kreibich, and A. H. Thieken, “Flood risk analyses—how detailed do we need to be?” *Nat. Hazards*, vol. 49, pp. 79–98, 2009.

[6] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), “Emergencias en Tuluá, Bugalagrande y Andalucía por creciente súbita del río Bugalagrande,” [Online]. Available: https://cvc.gov.co/2021063. [Accessed: Dec. 4, 2024].

[7] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), *Caracterización de la calidad ambiental urbana municipio de Bugalagrande, Valle del Cauca*, 2019.

Sistema De Gestión y Validación Documental para la Vinculación de Personal en las Instituciones de Educación Superior – Caso de Estudio Ucundinamarca

Lina Yulieth Ballesteros Pachón
Facultad de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad de Cundinamarca
Ubaté, Colombia
lyballesteros@ucundinamarca.edu.co

Rafael Ortega Ortega
Facultad de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad de Cundinamarca
Ubaté, Colombia
rortegao@ucundinamarca.edu.co

***Resumen*—Dentro de las Instituciones de Educación Superior (IES), el área de Recursos Humanos (RR. HH) presenta un desafío dentro del proceso de vinculación de personal, debido a los tiempos destinados para la verificación de documentación. En el caso de la Universidad de Cundinamarca, en la seccional Ubaté, este proceso se desarrolla actualmente de forma manual dentro de la plataforma institucional, la cual no tiene los canales de retroalimentación suficientes para antes o después de la carga documental; generando así retrasos y reprocesos debido a documentos mal diligenciados o vencidos, afectando la eficiencia del área de talento humano. En este contexto, el siguiente proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema de gestión y validación documental, con el fin de optimizar la eficiencia en revisión y de igual forma reducir la carga operativa del área de RR. HH. Además, el sistema integra un acompañamiento al postulante, mediante instructivos, validaciones guiadas y retroalimentación simultánea, para orientar de manera clara al postulante con respecto a cómo obtener, diligenciar y cargar de forma correcta cada documento requerido. La investigación adopta un enfoque cualitativo, mediante entrevistas y encuestas. Para el desarrollo, se adopta un enfoque ágil, haciendo uso de la metodología Scrum para la gestión iterativa del proyecto. El ecosistema tecnológico está basado en Microsoft Power Automate, en el cual se integra el procesamiento inteligente de documentos (IDP), para automatizar la validación. En conjunto, se trabaja un desarrollo con Django y React que permite implementar un sistema de control visual, mediante un "semáforo" el cual identifica el estado de los documentos (aprobado, rechazado, vigente o vencido), lo cual mejorara el seguimiento. Con el sistema se espera reducir los tiempos de incorporación de personal, con un aumento en la percepción de eficiencia en el área de Recursos Humanos. Así mismo, se orienta y acompaña a los postulantes dentro del proceso de cargue de información. Este se propone como un modelo que pueda ser replicado dentro de otras IES o demás organizaciones con características y necesidades similares. Permitiendo que las tecnologías actuales minimicen el error humano, permitan una retroalimentación y canales de comunicación directa, así como fortalecer los procesos de gestión documental, aportando a la transformación digital dentro de las áreas administrativas de las organizaciones.**

***Palabras Clave*—Automatización de Procesos, Gestión Documental, Procesamiento Inteligente de Documentos (IDP), Recursos Humanos, Transformación Digital.**

I. Introducción

En las instituciones de educación superior (IES), el proceso de contratación de personal se realiza en diferentes etapas, dentro de las cuales están el reclutamiento, la selección y vinculación. El presente proyecto se centra en la fase de vinculación, específicamente dentro del proceso de validación documental necesario para formalizar el contrato. De acuerdo con el Politécnico Jaime Isaza Cadavid [1], los requisitos administrativos, legislativos y profesionales que se deben cumplir para formalizar el proceso de contratación a docentes y personal administrativo incluyen documentos como cédula de ciudadanía, certificados de seguridad social y antecedentes fiscales; los cuales representan un gran volumen de documentos que deben ser revisados rigurosamente. Según McKinsey & Company [2], los empleados pueden dedicar hasta el 20 % de su jornada laboral a la búsqueda y gestión de información en documentos físicos o digitales no estructurados, lo cual evidencia como la gestión de documental es una parte fundamental para la eficiencia, en especial, dentro del área de talento humano.

Es así como, la incorporación de tecnologías orientadas a la automatización de tareas administrativas se define como una alternativa para mejorar la eficiencia del área de talento humano en las IES; debido a que permite liberar espacios de tiempo que antes estaban destinados a tareas operativas, así mismo, los procesos son más rápidos, estandarizados y con una menor probabilidad de errores humanos. Es por esto, que es de importancia implementarla como apoyo en tareas administrativas.[3]

Actualmente, en la Universidad de Cundinamarca el proceso de gestión documental para la vinculación se realiza dentro de la plataforma institucional, en donde los postulantes cargan los documentos requeridos sin contar con mecanismos de validación previa, ni un acompañamiento para el proceso de

obtención y carga. Posteriormente, la verificación de esta información es realizada por un único funcionario, quien debe revisar de forma manual los criterios de aceptación de cada documento, con el fin de determinarlos válidos y continuar con la formalización del contrato.

Cuando un documento es identificado con errores como: información incompleta, inconsistencias o tiempo de expedición mayor a 30 días; este es devuelto al postulante con correcciones y debe ser cargado nuevamente hasta cumplir con los requisitos. Las observaciones se realizan por canales de mensajería instantánea no oficiales, ya que permiten aclarar las correcciones de forma visual, debido a que en la plataforma las notas solo textuales son ambiguas o no eficientes; constando así un inconveniente en el proceso de retroalimentación.

Aunque se han implementado capacitaciones para orientar a los postulantes sobre la forma correcta de cargar la documentación, los errores persisten. Provocando revisiones repetitivas y un alto nivel de reprocesos, que aumentan la carga operativa en recursos humanos, afectando la eficiencia y limitando la disponibilidad del personal para el desarrollo de otras funciones estratégicas.

De este modo, el uso de tecnologías basadas en procesamiento inteligente de documentos (IDP) y reconocimiento óptico de caracteres (OCR) representa una solución que permitirá la extracción, validación y verificación automática de la información que se encuentra dentro de los documentos digitales. Estas herramientas ayudan con la reducción de errores, mejoran la calidad de los datos desde su origen y fortalecen la eficiencia operativa, en el marco de los procesos de transformación digital en las IES. [4]

El sistema propuesto integra la automatización de flujos de trabajo mediante Microsoft Power Automate, con una arquitectura orientada a servicios y un despliegue web desarrollado con Django y React; está enfocado en mejorar la trazabilidad de los documentos, reducir reprocesos y optimizar la eficiencia de recursos humanos en la etapa de vinculación de personal.[5]

Mediante el diseño de una solución inteligente para la validación documental que incluye en su despliegue la automatización y el procesamiento inteligente de documentos, se busca transformar actividades manuales en procesos automáticos que puedan tener una validación y seguimiento en tiempo real. Por lo cual, no se busca solo optimizar una etapa de la contratación, sino apoyar los procesos de transformación digital en IES con estas herramientas.

En esta línea, la presente investigación tiene como objetivo desarrollar un sistema inteligente de gestión y validación documental para optimizar el proceso de vinculación de personal en la Universidad de Cundinamarca, Seccional Ubaté.

II. Marco Referencial

En el planteamiento de un “Modelo de gestión tecnológica digital para el proceso de contratación inteligente en las Instituciones de Educación Superior de la ciudad de Medellín” [6], se señala la importancia de incluir dentro de las áreas de talento humano una gestión tecnológica digital mediante la contratación inteligente de personal. En el análisis presentado, se identifican variables que también corresponden con las descritas en este trabajo, como lo son los reprocesos, el incremento de costos, los tiempos prolongados y la falta de información en tiempo real del proceso de contratación.

El autor plantea la incorporación de Blockchain con el fin de mejorar el sistema de contratación actual en las IES de Medellín. Adicionalmente, en la investigación se realizó una caracterización de los manuales de contratación de varias instituciones, lo cual facilita identificar que la contratación se hace de manera tradicional, usando el correo electrónico para el intercambio de documentos [6]; además en la solución no se proyecta la validación documental, lo cual complementaría la contratación inteligente en las instituciones.

De igual forma, en la universidad EAN se realizó el planteamiento de un “Sistema inteligente para la automatización de procesos documentales usando IA, OCR y recuperación semántica de información” [7], en el cual, con el uso de las tecnologías listadas anteriormente, se permite interpretar documentos en diversos formatos para poder responder consultas específicas sobre su contenido de forma rápida. En este trabajo, se plantea como el sistema busca optimizar los procesos de gestión documental mediante el uso de inteligencia artificial, presentado así una solución innovadora que con la combinación de estas herramientas facilita la interacción con una alta cantidad de documentos de forma “automatizada y semántica, reduciendo los tiempos de consulta y mejorando la accesibilidad de la información”. [7]

Estos aspectos se relacionan directamente con la necesidad de optimizar la verificación documental en el proceso de vinculación de personal en la Universidad de Cundinamarca. Aunque, el proyecto no se centra específicamente dentro del área de recursos humanos, lo cual hace que sea una solución integral que abarca varios procesos, sin un respectivo análisis de cada área en la cual se usa el sistema.

Finalmente, en el trabajo de Ruales Aldas [8] se expone como la problemática presentada esta basada en cómo mejorar la eficiencia, la calidad y la satisfacción de los usuarios en la gestión documental. Cabe destacar que dentro del proyecto las soluciones planteadas son en su mayoría desarrolladas en un stack tecnológico de Microsoft, donde se desarrollan flujos de trabajo en Power Automate con la integración de Power Apps, así como el uso de SharePoint para el almacenamiento, SQL database de Azure y Power Bi para las gráficas, en conjunto con herramientas de inteligencia artificial. [8]

Con la implementación del proyecto se observó una mejora significativa en la gestión documental, al facilitar la integración, colaboración y comunicación de los actores. La investigación cuenta con un análisis AS-IS y TO-BE, donde se definen y crean flujos de trabajo actuales y propuestos, lo cual permite realizar la identificación de puntos de mejora y la definición de funcionalidades planteadas para el sistema en el desarrollo. Además, se presenta un aumento del 20% en la productividad, lo cual indica la mejora en la eficiencia de los procesos documentales. El resultado del trabajo permite considerar que las mejoras son significativas al implementar tecnologías de este tipo en gestión documental, se proyecta una mejora en la eficiencia de la verificación documental para la validación de personal.

Los antecedentes estudiados evidencian avances importantes en la automatización documental y la contratación inteligente mediante tecnologías como IA, OCR y herramientas de automatización. Pero, se distinguen restricciones con respecto a la validación documental automatizada, debido a que no se analiza de forma específica la solución en términos de trazabilidad, retroalimentación en tiempo real y la integración de desarrollos web con herramientas de IDP. Por lo cual, en la presentación del proyecto se busca proponer una solución orientada hacia los requerimientos de validación documental en entornos universitarios. [9]

III. Marco Metodológico

El presente estudio se enfoca en un análisis cualitativo con alcance aplicado, está orientado a analizar y mejorar el proceso de validación documental en el área de recursos humanos de una institución de educación superior. En una primera etapa se realizó un diagnóstico del proceso actual con el fin de identificar reprocesos, ineficiencias y limitaciones en las tareas del área. Con base en estos resultados, se diseña una solución tecnológica que está orientada hacia la automatización del proceso de validación documental.

La investigación se desarrolla bajo un diseño no experimental de tipo transversal, dado que los datos son recolectados en un único periodo de tiempo sin modificar las variables. Con este enfoque se permite definir el estado actual del proceso y establecer una base, para las mejoras que se proyectan en la solución. En el proyecto, se presenta como variable independiente una plataforma automatizada de gestión documental basada en IDP y como variables dependientes, para medir la eficiencia en el proceso de vinculación se estudia la reducción de reprocesos documentales y la mejora en la calidad de los datos.

La población se constituye por los actores involucrados en el proceso de vinculación a la seccional, centrando el estudio en el responsable del proceso de validación documental. La muestra tomada corresponde a los expedientes del periodo de contratación académico 2026-1, los cuales son seleccionados mediante un muestreo no probabilístico.

Para la recolección de datos se emplearon entrevistas semiestructuradas que fueron aplicadas al responsable del proceso para identificar la problemática y obtener los criterios de validación por documento, también se aplicaron encuestas orientadas a los postulantes o usuarios del proceso, para evaluar la percepción de eficiencia, dificultades y el nivel de satisfacción con el proceso de validación documental en el periodo académico. Además, se identifica la disposición de los actores del sistema con incorporar en las actividades de cargue documental la automatización.

Para el desarrollo del proyecto, se enmarca el uso de Scrum, con el objetivo de obtener mejoras iterativas e incrementales. Se implementan artefactos como el Product Backlog, el Sprint Backlog e incrementos, con una duración por ciclo de 3 semanas. El sistema propuesto integra herramientas de Microsoft Power Automate para la automatización de flujos, en conjunto con tecnologías como Django y React para la gestión y visualización del proceso.

Debido a que la solución actualmente está en fase de prototipo, la validación realizada actualmente se enfoca en evaluar la viabilidad de la automatización. En etapas posteriores, se proyecta realizar pruebas dentro del proceso de vinculación para medir su impacto en la eficiencia.

IV. Resultados

Durante la fase de diagnóstico del proceso actual, se encontró que la validación documental presenta una alta cantidad de reprocesos dentro del área de recursos humanos. Con base en las entrevistas realizadas al responsable del proceso de contratación, se evidenció como un mismo documento se revisa entre dos y seis veces antes de ser aprobado, lo cual incrementa su carga de trabajo.

De la misma manera, se identificó que el proceso de revisión documental está conformado por doce documentos que cada postulante debe presentar, generando múltiples ciclos de validación manual. Entre las principales dificultades identificadas se observaron inconsistencias en la información cargada por los postulantes, errores en el diligenciamiento de formatos y documentos con fechas no validas, afectando la calidad de la información y dificultando la aprobación de los expedientes. De igual forma, durante las entrevistas se identificó la aprobación por parte del líder del proceso para realizar la automatización de esta validación, con el fin de mejorar la eficiencia en sus actividades.

A. Desarrollo

La solución propuesta se desplegó con una arquitectura orientada a servicios, con el fin de que el prototipo en un futuro pueda ser integrado en plataformas institucionales. El frontend del proyecto se construyó usando React y el backend se desarrolló con Django. La arquitectura del sistema se presenta en la Fig.1, como un diagrama UML realizado en draw.io. Se incorporan módulos de: registro de usuarios, gestión de convocatorias, administración documental, gestión de expedientes y un dashboard.

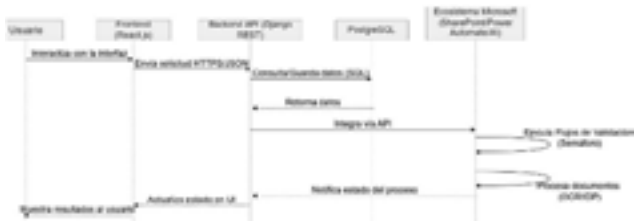


Fig. 1. Arquitectura del Sistema. Fuente: Elaboración Propia con Draw.io.

También, se incluyó un módulo de seguimiento visual tipo “semáforo”, el cual define el estado del documento según si han sido aprobados, rechazados o vencidos. Para el diseño de la Interfaz de Usuario (UI) se realizaron Wireframes preliminares en Figma presentados en Fig. 2; a fin de definir la estructura visual y funcional del sistema. Con la aprobación del dueño del producto (Product Owner) se inició con la implementación.



Fig. 2. Wireframes del Sistema. Fuente: Elaboración Propia en Figma.com.

En la Fig. 3 se muestra el desarrollo del prototipo mediante un despliegue local, evidenciando el funcionamiento del sistema para la fase de pruebas. El proyecto se encuentra alojado en la herramienta GitHub, donde se puede revisar el código dentro del repositorio.



Fig. 3. Prototipo funcional de la Plataforma UNI SIGEA. Fuente: Elaboración Propia

B. *Automatización*

Como componente del prototipo, se realizó en flujo inicial de automatización con Microsoft Power Automate, mediante su herramienta para IDP. El evento que inicia el flujo de trabajo es cuando un documento es cargado en la biblioteca de SharePoint, la cual es usada para almacenar los documentos y así pasar a realizar la extracción y validación de la información.

Adicionalmente, se realizó un primer entrenamiento utilizando AI Builder para procesar documentos, el cual está centrado en el reconocimiento de documentos de identidad. En esta parte se emplearon diez documentos de prueba, de los cuales cinco entrenan a cédula amarilla con hologramas y cinco a cédula digital en policarbonato. Lo cual permitió evaluar la viabilidad y efectividad de usar modelos de inteligencia artificial dentro del flujo de automatización documental.

Continuando con el flujo, cuando el modelo es aplicado, extrae los campos para los cuales fue entrenado: número de documento, nombres y apellidos. Finalmente, se realiza una condición, donde se verifica que la información extraída del documento corresponde con la ingresada en la base de datos del sistema, si la información corresponde, el estado del documento cambia a aprobado y en caso contrario, se notifica y el estado del documento cambia a rechazado o ilegible según el caso.

Es así como, con el modelo Fig. 4, se establece la base funcional para las siguientes etapas del proyecto; como lo es el entrenamiento de modelos para certificados y formatos.

C. *Resultados esperados*

Aunque el sistema actualmente está en la fase de prototipo, los resultados que se obtuvieron en la fase de diagnóstico y desarrollo permiten formular mejoras significativas dentro del proceso de validación documental. En etapas futuras, se quiere ampliar el entrenamiento del modelo a los 12 tipos de documentos requeridos dentro del proceso de contratación, para automatizar los criterios específicos en validación por documento. De esta forma, se proyecta que la automatización permitirá reducir los reprocesos documentales, mejorar la trazabilidad de los expedientes, disminuir la carga operativa de recursos humanos y optimizar los tiempos derivados de la revisión manual.

Finalmente, se plantea como en etapas posteriores, se realizará una evaluación cualitativa en el antes y después de la implementación, para medir el impacto de la solución en la percepción de eficiencia sobre el proceso de vinculación

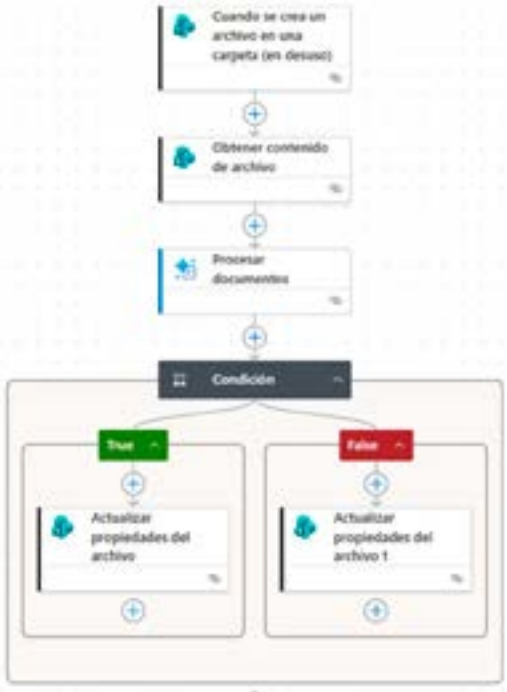


Fig. 4. Prototipo de automatización para validación de documentos de identidad. Fuente: Elaboración Propia en Microsoft Power Automate

CONCLUSIONES

La investigación permitió identificar que el proceso de vinculación de personal en la Universidad de Cundinamarca – Seccional Ubaté, presenta múltiples reprocesos que son causados en su mayoría por la revisión manual, inconsistencias en información y la ausencia de mecanismos de validación previa. Generando así un aumento en la carga operativa dentro del área de recursos humanos y afectando la eficiencia en el proceso de vinculación.

A partir del diagnóstico realizado mediante entrevistas y análisis del flujo de trabajo actual, definiendo así los requisitos

necesarios para implementar el diseño de una solución tecnológica orientada a la automatización documental. Así, se permitió estructurar una arquitectura basada en servicios, integrando tecnologías como Django y React para un desarrollo web y Microsoft Power Automate en conjunto con herramientas de procesamiento inteligente de documentos (IDP) para la automatización en el proceso de validación.

Como resultado del desarrollo preliminar, se implementaron módulos relacionados con la gestión de postulantes, convocatorias, expedientes y seguimiento documental, así como una revisión visual de estados, la cual facilita la trazabilidad de los documentos dentro del proceso de contratación. Así mismo, se desarrolló un flujo inicial de automatización utilizando SharePoint, Power Automate y AI Builder, los cuales permiten validar la viabilidad de integrar modelos de inteligencia artificial en el reconocimiento y validación de documentos.

Los resultados obtenidos en la fase de prototipo demuestran como el uso de estas tecnologías constituyen una alternativa que optimiza los procesos administrativos dentro de las IES. Aunque la solución aún se encuentra en fase de prueba y no ha sido evaluada en un periodo de contratación, con la investigación y desarrollo realizado se permite proyectar mejoras relacionadas con la reducción de reprocesos y la disminución de carga operativa en recursos humanos.

Finalmente, como trabajo futuro, se va a realizar el entrenamiento del modelo a los diferentes tipos de documentos requeridos en la vinculación, así como realizar pruebas en los escenarios de contrataciones, para medir el impacto de la solución en términos de eficiencia, tiempos de revisión y calidad de información.

Referencias

[1] Politécnico Jaime Isaza Cadavid, “Documentos para contratación - Institución Universitaria Pascual Bravo”, 2025. Consultado: el 25 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://pascualbravo.edu.co/new_pits/documentos-para-contratacion/

[2] McKinsey & Company, “The social economy: Unlocking value and productivity through social technologies”, jul. 2012. [En línea]. Disponible en: www.mckinsey.com/mgi.

[3] Cidei, “Automatización de Procesos Administrativos”, 2026. Consultado: el 6 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://cidei.net/servicio-automatizacion-de-procesos

[4] P. García Bolívar, “Document intelligence: Universal document analysis”, Madrid, 2025. Consultado: el 25 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/101040/1/TFM%20-%20Garcia%20Bolivar,%20Pablo.pdf

[5] Microsoft, “Microsoft Power Platform,” 2020. [En línea]. Disponible en: https://powerplatform.microsoft.com/.

[6] A. J. Montoya Acevedo, “Modelo de gestión tecnológica digital para el proceso de contratación inteligente en las Instituciones de Educación Superior de la ciudad de Medellín”, Medellin, 2023.

[7] C. A. Cascativa, Y. K. Rodriguez, y U. Niño, “Sistema inteligente para la automatización de procesos documentales usando IA, OCR y recuperación semántica de información.”, Bogota, 2025. Consultado: el 3 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://repository.universidadean.edu.co/server/api/core/bitstreams/ca215b03-dbdb-4f36-9ed6-1b3baf8b7826/content

[8] J. I. Ruales Aldas, “Análisis, diseño y desarrollo de un sistema de automatización de la gestión documental en empresas a través de una interfaz gráfica intuitiva”, Quito, 2021.

[9] K. Kapula, “Intelligent document processing: The new frontier of automation”, World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences, vol. 2025, núm. 01, pp. 376–387, sep. 2025, doi: 10.30574/wjaets.2025.17.1.1360.

Gestión térmica inteligente en producción avícola: impacto para el bienestar y rendimiento de las aves

Rafael Ortega Ortega
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Ubaté, Colombia
rortegao@ucundinamarca.edu.co

María Paula Ruíz Gómez
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Ubaté, Colombia
mpaularuiz@ucundinamarca.edu.co

***Resumen*— La producción avícola de postura representa uno de los pilares de la seguridad alimentaria mundial. Sin embargo, el manejo del ambiente térmico al interior de los galpones constituye uno de los desafíos técnicos más críticos, especialmente en regiones tropicales y subtropicales donde las variaciones climáticas son frecuentes e impredecibles. Las aves ponedoras son animales homeotérmicos con una temperatura corporal promedio entre 40 y 42 grados Celsius. Su zona termoneutral se ubica entre 18 y 24 grados Celsius, rango en el cual no requieren esfuerzos metabólicos adicionales para regular su temperatura interna. Fuera de este rango, el ave entra en estado de estrés térmico, con consecuencias directas sobre su producción y su salud. De allí que al implementar un sistema de monitoreo térmico en galpones ya instaurados es un factor de aporte translocal y transmoderno al sistema de producción de huevos tradicional que se observa en Cundinamarca.**

La implementación de un sistema de monitoreo térmico en galpones ya instaurados presenta un gran aporte translocal y transmoderno al sistema de producción tradicional. El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema de gestión y monitoreo para el manejo térmico en aves de postura, aplicando un enfoque cualitativo para su fase de investigación y para su desarrollo se utilizará la metodología XP (extreme programming) con sus cinco fases; planificación basada en historias de usuario, diseño simple y técnico, codificación mediante programación en parejas, test-driven devolopment (TDD), pruebas continuas y lanzamiento con entregas frecuentes. Este proceso garantiza la construcción de una herramienta que permitirá visualizar y procesar datos en tiempo real provenientes de una red de sensores para medir la humedad, la temperatura y los gases como lo es el amoniaco, con el fin de reducir los costos operativos optimizando la producción y el manejo de calidad del aire dentro de estos sistemas productivos en los galpones de aves de postura.

El impacto esperado del proyecto trasciende el ámbito puramente técnico y no se limita a la visualización de los datos, sino que permitirá tomar decisiones, permitiendo a los avicultores identificar necesidades específicas para la climatización en los galpones, mediante los sensores mejorando la eficiencia, reduciendo el estrés en las aves, perdidas por mortalidad y minimizando el impacto ambiental con apoyo de herramientas tecnológicas, evitando de manera significativa perdidas de producción y contribuyendo al bienestar animal y uso eficiente de los recursos y energía.

Palabras clave— Monitoreo inteligente, control térmico, sensores en tiempo real, producción avícola.

I. Introducción

La producción avícola constituye uno de los sectores agropecuarios de mayor dinamismo y relevancia a escala global. A lo largo de las últimas cinco décadas, esta actividad ha experimentado una transformación estructural profunda, pasando de sistemas extensivos y artesanales a modelos intensivos de alta especialización tecnológica, capaces de abastecer a miles de millones de personas con proteína animal accesible y de alta calidad nutricional. Dentro de este sector, la producción de huevo de gallina representa una de las fuentes de proteína animal más democratizadas del mundo, presente en la dieta de prácticamente todas las culturas y niveles socioeconómicos[1].

En America Latina, y particularmente en Colombia, la avicultura de postura ha cobrado una dimensión estratégica en la generación de empleo y en el abastecimiento de proteína animal. Según la Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI), el país produjo en 2024 un total de 18.019 millones de huevos, alcanzando un consumo per cápita de 342 huevos por año, posicionando a Colombia como el tercer país con mayor consumo de huevo en el mundo. Para 2025, las proyecciones de FENAVI indican que el renglón de huevo crecería un 5,9%, consolidándose como una industria clave para la seguridad alimentaria del país[2].

Sin embargo, el desarrollo de la avicultura intensiva no ha estado exento de desafíos. Entre los múltiples factores que afectan la productividad de las aves de postura, el manejo térmico ocupa un lugar central. La temperatura y la humedad relativa del aire al interior del galpón son variables biológicamente determinantes que modulan el comportamiento, el metabolismo, la eficiencia reproductiva y la salud general de las aves. Cuando estos parámetros se descontrolan, las consecuencias se traducen de manera directa en perdidas productivas medibles, aumento de la mortalidad y deterioro del bienestar animal [3].

II. Marco referencial

Según Herrera Rubio y Ortiz E. en su trabajo publicado en la revista Investigación e Innovación en Ingenierías de la Universidad Simón Bolivar. Los autores implementaron un

sistema de monitoreo y control con tecnología IoT para determinar el comportamiento de las variables ambientales en la avicultura [5]. El sistema media temperatura, humedad relativa, amoniaco y luminosidad, y controlaba actuadores (ventiladores, nebulizadores) de forma automática según umbrales configurados. La investigación demostró que es posible gestionar el microambiente avícola con tecnología IoT de bajo costo y genero datos cuantitativos sobre la correlación entre condiciones ambientales y comportamiento productivo de las aves [5]. Su aporte al presente proyecto es la validacion metodológica del uso de sensores IoT en galpones colombianos; su limitación es que no contemplan interfaz web ni app móvil con almacenamiento en base de datos relacional.

Un estudio referenciado en la tesis de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (2025) implemento un sistema de monitoreo de temperatura, humedad, amoniaco y luminosidad integrados en un dispositivo Wemos D1 Mini ESP8266. Los datos se transmiten en tiempo real a una aplicación móvil [5]. Los sensores del prototipo mostraron una alta correlación (mayor a 0.90) con equipos calibrados de referencia. El costo del dispositivo propuesto representa solo el 13% del costo del equipo convencional equivalente. Este antecedente es clave para el presente proyecto porque valida la transmisión directa de lecturas de sensores a una app móvil, y la viabilidad económica de la solución propuesta[5].

Daimob es una empresa colombiana que comercializa sensores inalámbricos con tecnología de transmisión LoRa para el monitoreo de temperatura, humedad, nivel de iluminacion y consumo de agua en galpones abiertos[6]. Los dispositivos funcionan con batería por más de cuatro meses y el alcance de transmisión es de cerca de 2 km en línea de vista. La plataforma incluye graficas de tendencia histórica y alertas y notificaciones remotas cuando los parámetros se encuentran por fuera de los rangos óptimos.[6]. La investigación concluyo que el monitoreo ambiental mediante sistemas automatizados basados en IoT es más preciso y eficiente en comparación con los métodos manuales. También señala que Python es especialmente útil para el desarrollo rápido de aplicaciones web en este contexto, lo que ratifica la pertinencia de usar frameworks web modernos con ORM (como Laravel en PHP) para el backend del sistema[6]. Este caso demuestra la viabilidad comercial de sistemas IoT para avicultura en Colombia y la demanda real del mercado por soluciones de monitoreo remoto.

En el marco de la 19.a Conferencia Internacional LACCEI (2021), Flores Murillo y colaboradores presentaron un sistema de monitoreo automatizado en el proceso de incubación artificial de huevos avícolas [7]. El sistema, implementado con placas Arduino y sensor DHT21 para temperatura y humedad, logro mantener niveles óptimos de temperatura entre 37.5 y 37.8 grados Celsius y humedad de entre 64 y 67 % HR durante el periodo de incubación. El estudio concluyo que el hardware Open Source Arduino es confiable para el control ambiental avícola en tiempo real, y que la variación de temperatura con el sistema automatizado fue significativamente menor que sin el [7]. Este proyecto aporta en la validación estadística del control automático, pero tiene una limitacion, opera sobre un proceso puntual (incubación) sin interfaz remota.

III. Marco Metodológico

El desarrollo de software exige una gran dosis de concentración y muchas horas de trabajo, lo que puede convertir la tarea de enfrentarse a este tipo de proyectos en un verdadero desafío. Afortunadamente, contamos con recursos como la metodología XP (Extreme Programming), un enfoque ágil que ayuda a estos profesionales a acelerar su trabajo sin comprometer la calidad del producto final [4].

Aplicar este tipo de metodología en el desarrollo trae consigo una serie de beneficios que mejoran tanto el proceso como el producto final; **Mayor calidad del software:** Las prácticas de pruebas continuas y la refactorización garantizan un código sin errores. **Incremento de la productividad:** La colaboración y la comunicación constantes optimizan el flujo de trabajo y disminuyen la necesidad de rehacer tareas. **Adaptabilidad a cambios:** La estructura flexible de XP permite responder de manera eficiente a cualquier modificación que el cliente solicite. **Satisfacción del cliente**: La entrega continua de valor y la participación activa del cliente aseguran que el producto final cumpla con sus expectativas[4].

XP organiza el desarrollo en seis fases que no son completamente secuenciales, sino que se retroalimentan entre sí. A continuación, describiré cada fase con su aplicación concreta para este proyecto.

A. EXPLORACIÓN:

En la fase de exploración el cliente plantea a grandes rasgos las historias de usuario de interés para la primera entrega. Nos familiarizamos con las herramientas y tecnologías, prototipos técnicos para verificar la viabilidad de la arquitectura y evalúa los riesgos técnicos más importantes antes de comprometerse con estimaciones.

Las historias de usuario levantadas desde la exploración no son específicamente técnicas, son descripciones cortas en lenguaje del cliente. En total se hizo el levantamiento de 6 historias de usuario muy generales.

En la siguiente imagen se puede observar un ejemplo de las historias de usuario que estoy desarrollando

FIGURA 1

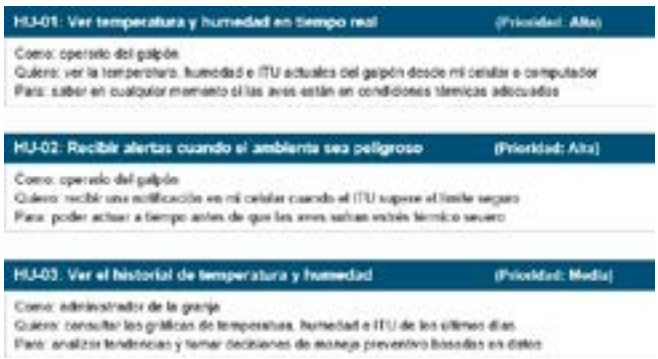


Fig.1 Historias de Usuario, autoría propia

B. *PLANIFICACIÓN*

En la fase de planificación (Planning Game), se negocian con el cliente que historias de usuario se implementaran en la próxima iteración. El cliente establece la prioridad según valor de negocio. El resultado es el Plan de Entrega que define las iteraciones, su duración y las historias asignadas a cada una. El proyecto se organiza en 6 iteraciones de 3 semanas como se muestra a continuación.

FIGURA 2

Iteración	Duración	Historias incluidas	Entregable
I1	Sem. 1-3	HU-01: monitoreo en tiempo real	ESP32+MQTT+Laravel+MySQL+vista web básica con datos en vivo
I2	Sem. 4-6	HU-02: alertas al celular	Sistema de alertas activo con notificación cuando ITU > umbral
I3	Sem. 7-9	HU-03 + HU-04: histórico + amoniaco	Gráficas históricas en web + sensor MQ-135 integrado
I4	Sem. 10-12	HU-05: configurar umbrales	Módulo de configuración de umbrales para el administrador
I5	Sem. 13-15	HU-06: panel general de nodos	Panel con estado de todos los nodos del galpón
I6	Sem. 16-18	Pruebas de campo + deploy	Sistema completo en producción, validado en galpón real

Fig.2 Plan de entrega, autoría propia

C. *ITERACIONES DE DESARROLLO*

Las iteraciones son el núcleo de XP. En cada una se seleccionan historias de usuario, se descomponen en tareas, se implementan en parejas, se prueban de forma continua con TDD y se integran al sistema. Cada iteración produce un incremento funcional que el cliente puede validar.

1) *Diseño simple y tarjetas CRC*

En XP el diseño es lo mínimo que se necesita para que las historias de iteración funciones. Se usas Tarjetas CRC (clase, responsabilidad, colaboración) que capturan las tres preguntas de todo lo que se necesita saber sobre una clase antes de codificarla. Es la siguiente imagen se muestra como las Tarjetas CRC estas definidas:

FIGURA 3

Clase / Módulo	Responsabilidad	Colabora con
ESP32 Firmware (Arduino C++)	Leer DHT22 y MQ-135, calcular ITU, publicar JSON por MQTT cada 30 s, manejar reconexiones Wi-Fi y MQTT	Librería DHT.h, librería PubSubClient, WiFi.h
Lectura Sensor (Modelo Laravel)	Representa una lectura en MySQL. Calcula ITU y nivel_riesgo al guardar.	NodoSensor, AlertaTermica
Mqtt:Listen / Comando (Artisan)	Suscribe al broker, recibe JSON, crea Lectura Sensor, delega un Servicio de Alerta	LecturaSensor, ServicioAlerta
AlertaService (Servicio)	Evalúa si una lectura supera los umbrales activos. Si supera, crea AlertaTermica y notifica.	LecturaSensor, AlertaTermica, ServicioNotificacion, ConfigUmbral
ServicioNotificacion (Servicio)	Envía notificación push a API cuando se genera una AlertaTermica	AlertaTermica, API (HTTP)
Control Lectura (Control)	Ultima lectura por nodo. Histórico filtrado.	LecturaSensor
Control Alerta(Control)	Alertas activas. POST /api/alertas/{id}/atender — marcar como atendida.	AlertaTermica
Control Umbral (Control)	CRUD de umbrales con autenticación Sanctum	ConfigUmbral, Requisito Umbral
Panel Control (Control)	Resumen de todos los nodos con ultima lectura y alertas pendientes.	NodoSensor, LecturaSensor, AlertaTermica

Fig.3 Tarjetas CRC, autoría propia

2) *Programación en parejas*

Toda la codificación del proyecto se realiza en parejas: una persona escribe el código (Driver) y la otra revisa en tiempo real, detecta errores y sugiere mejoras (Navegador). Los roles se rotan cada 30 minutos. Esta práctica aplica tanto al firmware del ESP32 como al backend Laravel y a la interfaz web. El código resultante es de propiedad colectiva: cualquier integrante puede modificar cualquier parte del sistema.

Este apartado está aún en desarrollo y no se ha completado, pero ya están declaradas las actividades que se deben realizar y se muestran en la siguiente imagen.

FIGURA 4

Tarea	Driver (quien escribe)	Navegador (quien revisa)	Que se verifica además del código
Firmware ESP32 — lectura DHT22	Paula	Rafael	Que la conversión de temperatura es correcta (no confundir Fahrenheit con Celsius). Que el periodo de muestreo respeta el límite del DHT22 (mín. 2 s).
Firmware ESP32 — publicación MQTT	Rafael	Paula	Que el JSON tiene exactamente los campos que Laravel espera. Que el tópico MQTT sigue la convención galpón/lectura.
Laravel — comando mqtt:listen	Paula	Rafael	Que el parsing del JSON maneje correctamente valores nulos o malformados. Que la reconexión al broker es automática si se cae.
Laravel — cálculo ITU en LecturaSensor	Rafael	Paula	Que la fórmula ITU = T + HR se corrija según la clasificación de Kin y Harmon. Que los rangos del nivel_riesgo coinciden con los definidos en el marco teórico.
Laravel — AlertaService con umbrales	Paula	Rafael	Que la alerta solo se genera una vez, aunque el valor permanezca sobre el umbral (no generar cientos de alertas por el mismo evento).
Blynk — notificación push	Rafael	Paula	Que la notificación llega al celular en menos de 60 segundos. Que el mensaje incluye el nodo, el valor ITU y la hora.

Fig. 4 Actividad programación en parejas, autoría propia

3) *Desarrollo guiado por pruebas*

Se escribe la prueba y luego el código que la hace pasar y para ello hay 3 ítems a tener en cuenta:

- Backend Laravel: pruebas unitarias PHPUnit. Antes de implementar el cálculo del ITU, se escribe el test: temperatura = 28 + humedad = 72 → ITU = 100 → nivel_riesgo = 'peligro'.
- API REST: pruebas de Feature Laravel que simulan GET /api/lecturas/ultima y verifican que el JSON de respuesta contiene los campos esperados.
- Firmware ESP32: pruebas manuales de caja negra verificando que el JSON publicado en MQTT tiene la estructura correcta y los valores del sensor corresponden a la lectura real.

Este proceso también estará en desarrollo después de terminar el diseño simple y las tarjetas CRC

4) Integración continua

El código de ambas integrantes se integra al repositorio Git varias veces al día. Después de cada integración se ejecutan las pruebas unitarias. Si alguna falla, se corrige inmediatamente. Esto evita que los errores se acumulen y sean difíciles de resolver al final del proyecto.

De igual manera este proceso también está en espera a realizarse

5) Refactorización

Cuando el código funciona, pero puede mejorar su estructura, se refactoriza sin cambiar el comportamiento externo. Las pruebas garantizan que la refactorización no rompe el sistema. Ejemplo práctico para este proceso: si el cálculo del ITU aparece duplicado en el Modelo y en el Comando Artisan, se extrae a un servicio independiente ITUServicio: calcular ($temperatura, $humedad).

D. PRODUCCIÓN

En la fase de producción el sistema acumulado en las iteraciones previas pasa al entorno real del cliente. XP exige pruebas adicionales de rendimiento y estabilidad, revisiones de seguridad y decisiones sobre que nuevas funcionalidades se incluyen o posponen. El ritmo de las iteraciones puede reducirse de 3 semanas a 1 semana para responder más rápido a los ajustes que surgen de la operación real en un galpón.

Se tienen previstas una serie de actividades para este proceso:

- Despliegue del backend Laravel en servidor VPS con PHP, MySQL, para la API.
- Instalación física de los tres nodos ESP32 en los puntos estratégicos del galpón: zona central, zona de bebederos y zona de ventilación.
- Pruebas de campo de 7 días continuos: estabilidad de la conexión MQTT, precisión del DHT22 comparada con termómetro de referencia, comportamiento del sistema de alertas.
- Ajuste de umbrales de alerta según condiciones reales observadas en el galpón durante las pruebas de campo.
- Verificación del rendimiento MySQL con datos reales acumulados: 3 nodos x lectura cada 30 s = 8.640 registros por día aproximadamente.
- Capacitación al operario y administrador de la granja en el uso de la interfaz web y la app móvil.

E. MANTENIMIENTO

Una vez que la primera versión está en producción, esta entra en mantenimiento: se mantiene el sistema operando y se desarrollan nuevas iteraciones con funcionalidades adicionales. La velocidad de desarrollo disminuye porque una parte del tiempo se dedica al soporte del sistema en operación real.

F. CIERRE DEL PROYECTO

XP denomina “muerte del proyecto” a la fase de cierre formal. Ocurre cuando el cliente no tiene más historias nuevas que agregar (el sistema cumple con todo lo requerido) o cuando el proyecto concluye por otras razones. En el contexto de este proyecto, esta fase corresponde a la entrega y sustentación del trabajo ante el jurado académico al finalizar todo el proceso.

IV. RESULTADOS

Durante el desarrollo del presente proyecto se obtuvieron los siguientes resultados parciales correspondientes a las fases de exploración y planificación de la metodología XP.

En la fase de exploración se levantaron seis historias de usuario que describen los requerimientos funcionales del sistema desde la perspectiva del avicultor, abarcando la visualización de variables ambientales en tiempo real, la generación de alertas por estrés térmico y el registro histórico de lecturas. Estas historias constituyeron la base para definir el alcance del sistema.

En la fase de planificación se estructuró un plan de entrega compuesto por seis iteraciones de tres semanas cada una, priorizadas según valor de negocio. Como resultado del diseño simple se elaboraron las tarjetas CRC que definen las clases principales del sistema, sus responsabilidades y sus colaboraciones, estableciendo la arquitectura del backend en Laravel con MySQL y la comunicación mediante protocolo MQTT entre los nodos ESP32 y el servidor.

Se definieron además los casos de prueba bajo el enfoque TDD para tres componentes: el cálculo del Índice de Temperatura-Humedad (ITU) en el backend Laravel, los

endpoints de la API REST y la estructura del JSON publicado por el firmware del ESP32. Estos casos de prueba quedan listos para ejecutarse en las iteraciones de desarrollo subsiguientes.

V. Conclusiones

El desarrollo de un sistema de gestión y monitoreo térmico para aves de postura representa una solución técnica, económica y ambientalmente justificada. La convergencia de tecnología IoT, sensores de bajo costo, plataformas en la nube y algoritmos de control automático permite hoy implementar soluciones robustas y accesibles para el sector avícola.

La base científica es sólida pues el estrés térmico tiene efectos fisiológicos documentados que impactan directamente la productividad y el bienestar animal. Las brechas identificadas representan oportunidades concretas de diferenciación e innovación.

El proyecto tiene alto impacto especialmente en contextos tropicales como lo es Colombia, donde las condiciones climáticas hacen critico el manejo térmico durante todo el año productivo.

Referencias

[1] OECD y F. and A. O. of the U. Nations, "OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2024-2033", *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas*, vol. 2024, nov. 2024, doi: 10.1787/2b0c9d81-es.

[2] Avinews, "Colombia: Sector avícola registra un crecimiento de 2,8% en el 2024 - aviNews, la revista global de avicultura". Consultado: el 29 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://avinews.com/colombia-sector-avicola-registra-un-crecimiento-de-28-en-el-2024/

[3] Rafael Lera, "Entendiendo a las aves - Hendrix Genetics". Consultado: el 29 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.hendrix-genetics.com/en/articles/Entendiendo-aves/

[4] J. E. Herrera Rubio y V. J. Ortiz E, "Implementación de un sistema de monitoreo y control con tecnología IoT para determinar el comportamiento de las variables ambientales en la avicultura", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 10, núm. 1, pp. 30–41, feb. 2022, doi: 10.17081/INVINNO.10.1.5016.

[5] C. I.-H. H. E. AYERBE HUARCAYA, "UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZONICA DE MADRE DE DIOS FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE SISTEMAS E INFORMATICA", oct. 2025.

[6] "Daimob - Avicultura". Consultado: el 7 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://daimob.co/avicultura-iot.html

[7] M. A. M. Vasquez, P. G. C. Dominguez, y V. E. D. Rodriguez, "Automated Monitoring System in the Artificial Eggs Incubation Process", *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, vol. 2021-July, 2021, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.237.

[8] "Metodología XP: qué es y cómo aplicarla en desarrollo ágil". Consultado: el 29 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.godaddy.com/resources/latam/tecnologia/metodologia-xp-extreme-programming-que-es

Sensores, mapas y agua: HydroSig como sistema IoT de riego de precisión para cultivos de cebolla larga en Ubaté

Dilan Gabriel Guerrero Gonzalez
Facultad de Ingieneria
Universidad de Cundinamarca
Ubate, Colombia
dgguerrero@ucundinamarca.edu.co

Rafael Ortega Ortega
Facultad de Ingieneria
Universidad de Cundinamarca
Ubate, Colombia
rortegao@ucundinamarca.edu.co

***Resumen*— En Ubaté, Cundinamarca, la cebolla larga (Allium fistulosum) sostiene económicamente a toda una región, sin embargo, el riego tradicional predominante desperdicia más del 60% del agua disponible, comprometiendo la productividad de los cultivos en un territorio con suelos arcillosos, clima frío y heladas nocturnas frecuentes.**

Este proyecto tiene como objetivo diseñar un sistema IoT de riego por zonas que genere mapas de sequía en tiempo real, activando el riego únicamente donde el cultivo lo requiere, optimizando así el recurso hídrico de forma inteligente y adaptada al contexto local. La investigación sigue una metodología aplicada (Scrum) con un enfoque mixto, que integra revisión documental, simulación electrónica en Tinkercad y análisis espacial en QGIS.

El sistema propuesto articula sensores capacitivos para medición precisa de humedad del suelo, comunicación inalámbrica LoRaWAN, microcontrolador ESP32 y una plataforma de visualización espacial en tiempo real. Las simulaciones realizadas arrojan resultados prometedores: precisión de ±2.5%, alcance de comunicación de 8.2 km y tiempo de respuesta inferior a un segundo.

Estos indicadores respaldan una proyección de ahorro hídrico del 30 al 35% frente al riego convencional, con una distribución del agua notablemente más uniforme. Como siguiente paso, se prevé la construcción de un prototipo físico y su validación en campo durante un ciclo real de cultivo, lo que permitirá ajustar el sistema a las condiciones reales de Ubaté y sentar los pilares para su escalabilidad en la región.

***Palabras Claves*— Riego de precisión, comunicación LoRaWAN, eficiencia hídrica agrícola, Internet de las Cosas (IoT), Sensores capacitivos.**

I. INTRODUCCION

Ubaté no es un municipio que aparezca mucho en los titulares, pero cualquier colombiano que haya cocinado con cebolla larga —que es casi todo el país— le debe algo a esta región. Aquí, en el altiplano cundiboyacense, la cebolla larga (*Allium fistulosum*) no es solo un cultivo más: es el sustento de miles de familias que llevan generaciones sembrando en los mismos suelos arcillosos, bajo el mismo frío y con las mismas técnicas de siempre, Y ahí está el problema.

El riego en la zona sigue siendo mayormente empírico. El agricultor mira el suelo, lo toca, y decide si riega o no. No es irresponsabilidad, es lo que siempre se ha hecho. Pero los suelos arcillosos de Ubaté engañan: por fuera pueden verse secos mientras que en profundidad están saturados. Eso genera pudrición en los bulbos, proliferación de hongos y un gasto innecesario de agua y energía en bombeo. Se estima que más del 60% del agua disponible se desperdicia así, sin que nadie lo note hasta que el daño ya está hecho.

Este proyecto surgió de una pregunta concreta: ¿qué pasaría si el agricultor pudiera ver, en tiempo real y desde cualquier dispositivo, exactamente qué zonas de su cultivo necesitan agua? Eso es lo que propone HydroSig. Un sistema IoT que combina sensores capacitivos de humedad del suelo, comunicación LoRaWAN de largo alcance y mapas de sequía generados automáticamente, para que el riego deje de ser una suposición y se convierta en una decisión basada en datos reales.

No es un proyecto de laboratorio. Es una respuesta directa a un problema que existe hoy, en un municipio específico, con agricultores reales que merecen acceso a tecnología que ya existe en otras partes del mundo.

II.. Marco Referencial

A. Marco Teórico

La gestión eficiente del agua en cultivos hortícolas como la cebolla larga (*Allium fistulosum*) requiere comprender dos parámetros fundamentales de la hidrodinámica del suelo: la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). En los suelos arcillosos predominantes en el valle de Ubaté, el suelo puede contener grandes volúmenes de agua en profundidad sin que esta humedad sea perceptible en la capa superficial, generando decisiones de riego erróneas cuando se usan métodos empíricos de observación visual [1]. Para medir esta condición con precisión, el proyecto emplea sensores capacitivos de humedad volumétrica, los cuales determinan la constante dieléctrica del suelo mediante un campo electromagnético, ofreciendo lecturas estables y de larga duración sin exponer electrodos metálicos al medio [2].

La infraestructura de transmisión de datos se sustenta en la red LoRaWAN, un protocolo de comunicación de largo alcance y bajo consumo energético que opera en la banda de 915 MHz, alineada con la normativa de la Agencia Nacional del Espectro de Colombia (ANE) [3]. Esta tecnología permite que los datos de humedad recolectados por los nodos sensores lleguen en tiempo real a un servidor en la nube, donde son procesados para generar representaciones geoespaciales del estado hídrico del cultivo. La visualización se implementa mediante el algoritmo de Distancia Inversa Ponderada (IDW), que construye superficies continuas de humedad a partir de mediciones puntuales distribuidas en el terreno [4]. Al ser una plataforma web Progressive Web App (PWA), el agricultor puede acceder al mapa de sequía desde cualquier dispositivo, transformando la gestión del riego de una práctica intuitiva a una basada en datos reales.

B. Estado del Arte

El análisis de la literatura científica actual permite identificar una convergencia tecnológica hacia la denominada Agricultura 4.0. A continuación se presentan los antecedentes más relevantes que fundamentan esta propuesta, organizados por ejes tecnológicos.

1) Implementación de Redes LPWAN en Entornos Rurales

La conectividad en zonas agrícolas con terreno irregular ha sido objeto de estudio recurrente en la literatura científica. Adelantado et al. establecen que LoRaWAN supera a protocolos tradicionales como ZigBee o Bluetooth gracias a su modulación por espectro ensanchado (Chirp Spread Spectrum), que le permite penetrar vegetación y variaciones del terreno con un consumo energético mínimo [5]. En términos de cobertura, los gateways LoRaWAN logran alcances de hasta 15 km en terreno abierto con autonomía de batería medida en años [6]. Esta viabilidad ha sido confirmada en contextos andinos de alta montaña: sistemas IoT basados en LoRaWAN desplegados a 3.800 metros sobre el nivel del mar han alcanzado distancias de comunicación de 10 km con tasas de transmisión exitosa del 100% [7], validando técnicamente su uso en el altiplano cundiboyacense. Mekki et al. refuerzan esta conclusión al demostrar que LoRaWAN es la tecnología LPWAN más eficiente para grandes distancias en zonas rurales sin infraestructura celular [8].

2) Avances en el Monitoreo de Suelos Arcillosos mediante Sensores Capacitivos

La medición de humedad en suelos arcillosos presenta retos técnicos vinculados a la salinidad, la conductividad eléctrica y la presencia de agroquímicos. Bogena et al. evaluaron el rendimiento de sensores capacitivos de bajo costo, determinando que al medir la constante dieléctrica del terreno ofrecen mayor estabilidad frente a los sensores resistivos convencionales, los cuales sufren electrólisis y corrosión en menos de tres meses de uso [1]. Esta diferencia es crítica en los cultivos de cebolla larga de Ubaté, donde la aplicación frecuente de fertilizantes aceleraría el deterioro de los electrodos resistivos. Estudios comparativos recientes confirman esta ventaja cuantitativamente: los sensores resistivos en suelos fertilizados presentan errores de entre 20% y 40% en la medición del contenido volumétrico de agua, mientras que los capacitivos mantienen un error cuadrático medio (RMSE) de 1,87% al usar conversores analógicodigitales de mayor resolución [10]. Vaz et al. complementan este análisis señalando que en suelos arcillosos es indispensable operar a altas frecuencias para minimizar errores causados por temperatura y conductividad eléctrica [11].

3) Sistemas IoT Aplicados al Riego de Precisión

La integración de redes de sensores inalámbricos con plataformas IoT para la automatización del riego ha sido validada en múltiples contextos. Sistemas que combinan microcontroladores ESP32 con módulos LoRaWAN a 915 MHz han demostrado precisiones del 98,5% en la predicción de necesidades hídricas del cultivo [12]. En Latinoamérica, implementaciones en zonas rurales de Perú con arquitecturas similares lograron tasas de transmisión exitosa del 98,5% y una mejora del 8% en la eficiencia del uso del agua [13]. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías sigue enfrentando barreras económicas: los sensores comerciales agrícolas son costosos, aunque la oferta creciente de dispositivos de bajo costo ha abierto posibilidades para sistemas asequibles de gestión hídrica [14]. En el contexto colombiano específicamente, Arrubla-Hoyos et al. señalan que el concepto de agricultura inteligente no ha sido ampliamente adoptado en el país y que la falta de infraestructura de conectividad en zonas rurales continúa siendo el principal obstáculo para su escalabilidad [15].

4) Sistema de Visualización y Algoritmos de Interpolación Espacial

Con respecto a la interfaz de usuario, la tendencia mundial ha evolucionado de las tablas de datos hacia las representaciones geoespaciales. Cisneros-Zevallos y Benavides desarrollaron una plataforma de monitoreo agrícola que implementa el algoritmo IDW, demostrando que la

visualización mediante mapas de sequía reduce significativamente la carga cognitiva del agricultor y permite la toma de decisiones más rápidas frente a situaciones de escasez hídrica [16]. Zhang et al. refuerzan este planteamiento al proponer que la integración de dashboards multiplataforma permite que los datos recolectados por nodos IoT se conviertan en información accionable para el productor [17]. El IDW asigna pesos proporcionales a la inversa de la distancia al cuadrado entre el punto estimado y los puntos observados, generando superficies continuas a partir de un número mínimo de puntos de muestreo [4], condición ideal para cultivos de mediana escala donde los costos de implementación deben minimizarse.

5) El Vacío Investigativo en la Región Andina

A pesar de los avances globales, la literatura científica colombiana se ha concentrado en su mayoría en cultivos de exportación como el café y las flores [18]. Existe una ausencia evidente de estudios que apliquen la arquitectura IoT + LoRaWAN + mapas de sequía específicamente en cultivos de cebolla larga (*Allium fistulosum*) bajo las condiciones climáticas y edafológicas de la provincia de Ubaté. Este vacío representa la oportunidad central de esta investigación: adaptar tendencias tecnológicas globales a un escenario local históricamente desatendido, garantizando la originalidad de la propuesta y su impacto social directo sobre las comunidades agricultoras de la región.

III. MARCO METODOLÓGICO

A. Enfoque de Investigación

La investigación se efectúa con un enfoque mixto, ya que integra métodos cuantitativos orientados a la medición del rendimiento técnico del sistema — precisión del sensor (±2,5%), tasa de entrega de paquetes (PDR >95%), latencia de renderizado inferior a un segundo y autonomía energética proyectada de 452 días — complementados con un análisis cualitativo enfocado en caracterizar el comportamiento hídrico de los suelos arcillosos de Ubaté y las necesidades reales del agricultor frente a la gestión del riego. Esta combinación fortalece la validez del diseño al articular el rigor técnico de la ingeniería con el contexto social y agrícola del territorio [1].

B. Tipo de Investigación

El estudio corresponde a una investigación aplicada con desarrollo tecnológico, orientada al diseño de un ecosistema IoT que resuelva la gestión ineficiente del agua en los cultivos de cebolla larga (*Allium fistulosum*) de la provincia de Ubaté.

Es investigación aplicada porque busca dar una solución práctica a un problema real del entorno regional, creando un sistema tecnológico que transforma la toma de decisiones del agricultor de un modelo empírico a uno basado en datos reales de humedad del suelo.

Es desarrollo tecnológico porque el producto final es un ecosistema ciber-físico que integra nodos sensores IoT, red LoRaWAN y una plataforma de visualización geoespacial multiplataforma para la generación de mapas de sequía en tiempo real.

Finalmente, se enmarca en la investigación-acción porque no se limita a describir el problema hídrico de Ubaté, sino que propone una intervención tecnológica directa sobre él, transformando al agricultor de observador a administrador de datos de su cultivo.

C. Diseño Metodológico

El diseño del sistema se estructura como un proceso iterativo que conecta el análisis técnico del problema con el desarrollo progresivo de la solución, implementando la metodología Scrum como marco de trabajo ágil. A diferencia de modelos tradicionales como cascada, que son firmes, rígidos y lineales, Scrum permite que la solución evolucione mientras transcurre la investigación y el análisis de los suelos arcillosos y la conectividad limitada del valle de Ubaté [2]. De esta manera, el diseño se estructura como un proceso de mejora continua que conecta la ingeniería de hardware con el desarrollo del software y la validación técnica del ecosistema propuesto.

D. Técnicas e Instrumentos de Investigación

Para el desarrollo del proyecto se definieron las siguientes técnicas e instrumentos:

Revisión documental sistemática: Se realizó una revisión de literatura científica en bases de datos IEEE Xplore, ScienceDirect y repositorios universitarios, enfocada en redes LPWAN, sensores capacitivos de humedad, microcontroladores de bajo consumo y algoritmos de interpolación espacial, con el fin de fundamentar cada decisión técnica del diseño.

Simulación electrónica (Tinkercad): Se utilizó Tinkercad como entorno de simulación para verificar el comportamiento del microcontrolador ESP32, la lectura del convertidor analógico-digital (ADC) de 12 bits y la integración lógica con los sensores capacitivos de humedad, sin necesidad de componentes físicos en esta etapa del proyecto.

Análisis geoespacial (QGIS): Se empleó QGIS para implementar el algoritmo de Distancia Inversa Ponderada (IDW) y validar la generación de mapas de distribución de humedad a partir de puntos de muestreo distribuidos en el cultivo, comprobando la viabilidad de la visualización geoespacial propuesta.

E. Metodología de Desarrollo — SCRUM

Para el desarrollo del proyecto se implementa la metodología Scrum, un framework ágil diseñado para gestionar proyectos de alta complejidad técnica mediante la entrega iterativa y la interacción constante. Este método permite dividir el proceso en ciclos cortos y recurrentes llamados sprints,

facilitando la obtención progresiva de avances técnicos y ajustes a medida que la investigación avanza [2].

La elección de Scrum responde a tres razones concretas. Primero, el diseño de un ecosistema IoT en entornos rurales requiere ciclos cortos de validación técnica que permitan detectar y corregir inconsistencias a tiempo. Segundo, el análisis progresivo de los suelos y la conectividad exige momentos de inspección que Scrum garantiza a través de los Sprint Reviews. Tercero, la metodología permite priorizar los componentes de mayor impacto técnico desde las etapas más tempranas, asegurando un diseño técnicamente sólido antes de avanzar al prototipo físico. Los roles del equipo se presentan en la TABLA I.

TABLA I

ROLES SCRUM Y SU ASIGNACIÓN EN EL PROYECTO HYDROSIG

Rol	Definición (Scrum Guide)	Asignación en el proyecto
Product Owner	Responsable de priorizar las funcionalidades de mayor valor para el usuario final	Estudiantes de la Universidad Cundinamarca – Seccional Ubaté
Scrum Master	Facilita el entendimiento y correcta aplicación de Scrum	Rafael Ortega Ortega
Developer Team	Grupo encargado de llevar a cabo las actividades de desarrollo	Dilan Gabriel Guerrero Gonzales

F. Artefactos de Scrum

Product Backlog: Es la lista ordenada por prioridad de todo lo que el sistema HydroSig necesita para cumplir su propósito técnico. Fue construido a partir del diagnóstico situacional del riego en Ubaté y de los requerimientos técnicos identificados en cada componente del ecosistema: nodos sensores, red LoRaWAN, backend y plataforma de visualización.

Sprint Backlog: Al inicio de cada sprint, el equipo selecciona del Product Backlog las tareas técnicas específicas que completará durante el ciclo. Por ejemplo, para el sprint de conectividad LoRaWAN, el Sprint Backlog incluye tareas como análisis de parámetros de radiofrecuencia, selección del Spreading Factor óptimo y simulación teórica de la cobertura en el valle de Ubaté.

Incremento de Producto: Al final de cada sprint se entrega un incremento concreto y validable. En las fases actuales del proyecto, los incrementos son los diseños técnicos validados de cada componente del ecosistema. En fases posteriores serán los módulos físicos implementados y probados en campo real.

G. Eventos Scrum

Planificación del Sprint: Al inicio de cada sprint se define el componente técnico a trabajar, se establecen los criterios de validación y se determina exactamente qué se va a diseñar durante el ciclo. El resultado de esta sesión es el Sprint Backlog correspondiente.

Sprint — El ciclo de trabajo: Cada sprint se enfoca en un componente técnico específico del ecosistema HydroSig. El proceso se organiza en ocho sprints que cubren desde el diagnóstico situacional hasta la validación lógica del ecosistema completo, descritos en detalle en la TABLA II.

Scrum diario — Seguimiento semanal: El seguimiento se realiza mediante un registro escrito semanal que responde tres preguntas concretas: ¿qué avancé esta semana?, ¿qué haré la próxima semana? y ¿qué obstáculo técnico tengo? Este registro mantiene la trazabilidad del proceso e identifica bloqueos a tiempo.

Sprint Review: Al cierre de cada sprint se evalúa si el diseño técnico cumple con los criterios de validación establecidos y se recoge retroalimentación para alimentar el backlog del siguiente sprint.

Sprint Retrospectiva: Al finalizar cada sprint se realiza una reflexión sobre el proceso de diseño: qué funcionó bien, qué debe mejorar y qué acción concreta se toma para el siguiente ciclo. Esta retrospectiva alimenta directamente la mejora del proceso técnico en cada iteración.

TABLA II

SPRINTS DE INVESTIGACIÓN DEL PROYECTO HYDROSIG

Sprint	Descripción	Actividades	Resultado
1	Diagnóstico situacional y requerimientos de campo	Análisis del comportamiento hídrico de la cebolla larga en Ubaté	Identificación del riego empírico como causa de saturación en profundidad
2	Ingeniería de suelos y caracterización de sensores	Investigación la composic arcillosa provincia evaluac la tecnologías sensac y de de	Selección de sensores capacitivos como opción técnica viable para suelos con fertilizantes
3	Modelado de conectividad inalámbrica LoRaWAN	Análisis del protocolo LoRaWAN en banda 915 MHz con modulación Chirp Spread Spectrum	Configuración de red con SF10, 14 dBm de potencia y cobertura de 4,2 km

4	Diseño de arquitectura de hardware IoT	Diseño lógico de nodos basados en ESP32 con ciclo de trabajo optimizado	Autonomía proyectada de 452 días con batería de 2000 mAh mediante estados Deep Sleep
5	Estructura del backend y persistencia NoSQL	Definición de infraestructura de microservidores y base de datos orientada a documentos	Sistema escalable para gestión de series temporales masivas de datos de humedad
6	Desarrollo del ecosistema multiplataforma	Diseño de interfaz Progressive Web App con criterio de usabilidad rural	Plataforma ligera accesible desde cualquier dispositivo sin depender de gran ancho de banda
7	Algoritmos de interpolación para mapas de sequía	Implementación del método IDW en QGIS para generación de superficies continuas de humedad	Representaciones visuales continuas del estado hídrico del cultivo con mínima cantidad de sensores
8	Validación lógica e integración de la propuesta	Verificación de coherencia del ecosistema completo entre hardware, red y software	Confirmación de viabilidad técnica de la propuesta como base para el prototipo físico

H. Matriz de Consistencia

TABLA III

MATRIZ DE CONSISTENCIA DEL PROYECTO HYDROSIG

Componente	Descripción
Problema de investigación	Gestión ineficiente del agua en cultivos de cebolla larga (*Allium fistulosum*) en la provincia de Ubaté, causada por el riego empírico sobre suelos arcillosos con alta retención hídrica en profundidad
Pregunta de investigación	¿Cómo un sistema IoT basado en LoRaWAN y visualización geoespacial puede optimizar la gestión hídrica en los cultivos de cebolla larga de la provincia de Ubaté, Cundinamarca?
Objetivo general	Desarrollar un modelo de gestión hídrica basado en tecnologías IoT y visualización multiplataforma que optimice el riego en cultivos de cebolla larga en Ubaté
Objetivos específicos	1. Caracterizar los parámetros de humedad críticos en el suelo arcilloso de Ubaté para definir los umbrales de activación del sistema de riego. 2. Diseñar los nodos sensores basados en IoT para la toma y transmisión de datos de humedad mediante el protocolo LoRaWAN. 3. Desarrollar una multiplataforma digital que reúna los datos recolectados y genere la visualización de los mapas de sequía. 4. Evaluar la viabilidad técnica de la propuesta mediante el análisis del alcance de la señal y la proyección de ahorro de agua en el cultivo
Metodología	Enfoque mixto con diseño de investigación aplicada y desarrollo tecnológico. Implementación del framework ágil Scrum organizado en ocho sprints iterativos con entregables técnicos validados en cada ciclo
Técnicas e instrumentos	Revisión documental sistemática, simulación electrónica

	en Tinkercad, análisis geoespacial en QGIS, validación lógica del ecosistema completo
Variable independiente	Humedad volumétrica del suelo: porcentaje de agua contenida en una unidad de volumen de suelo arcilloso, medida a través de la constante dieléctrica captada por sensores capacitivos
Variables dependientes	VD1: Tasa de Entrega de Paquetes (PDR) de la red LoRaWAN. VD2: Latencia de renderizado del mapa de sequía. VD3: Autonomía energética proyectada de los nodos sensores
Resultados esperados	Diseño técnico validado del ecosistema HydroSig con proyección de ahorro hídrico del 30-35%, PDR superior al 95% y autonomía de nodos superior a un año, como base para la construcción del prototipo físico en Ubaté

IV. RESULTADOS

La fase de investigación concluye con la formulación de un diseño técnico integral orientado a resolver la gestión ineficiente del agua en los cultivos de cebolla larga de Ubaté. Los resultados presentados a continuación provienen de la validación teórica de los componentes del ecosistema y del desarrollo de los prototipos de interfaz de la plataforma multiplataforma, asegurando que cada elemento responda a las necesidades reales del agricultor y del suelo arcilloso de la región.

A. Definición de la Capa de Transporte y Comunicación

Como resultado principal del sprint 3, se estableció la configuración de red necesaria para sobrellevar las barreras del terreno irregular de la provincia. Los parámetros de radiofrecuencia seleccionados bajo el estándar LoRaWAN garantizan la integridad de los datos con una cobertura de 4,2 km, tal como se presenta en la TABLA IV.

TABLA IV

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA RED INALÁMBRICA (CAPA FÍSICA)

Parámetro	Configuración	**Impacto en la investigación**
Banda de frecuencia	915 MHz (AU915)	Alineación con la normativa colombiana de la ANE
Spreading Factor	SF10	Equilibrio óptimo entre alcance y tiempo en el aire
Potencia de Transmisión	14 dBm	Suficiente para penetrar la vegetación del cultivo de cebolla larga
Sensibilidad de Recepción	-132 dBm	Capacidad de captar señales débiles en zonas montañosas

La selección de estos parámetros, contrastada con la literatura de Mekki et al. [8], permite concluir que el sistema está en capacidad de mantener una tasa de entrega de paquetes (PDR) superior al 95%, incluso en condiciones de lluvia intensa frecuentes en la zona de Ubaté.

B. Modelo de Sostenibilidad Energética de los Nodos Sensores

El diseño del hardware arrojó un modelo de consumo eléctrico que garantiza que el agricultor no deba intervenir físicamente en el dispositivo con frecuencia. Este resultado se basa en la optimización del microcontrolador ESP32 mediante estados de reposo profundo (Deep Sleep), tal como se detalla en la TABLA V.

TABLA V

PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO POR CICLOS DE TRANSMISIÓN

Fase del ciclo operativo	**Consumo (mA)**	**Tiempo (ms)**	**Carga consumida (mAh)**
Wake-up y Lectura ADC	80 mA	1.500 ms	0,0333
Procesamiento Lógico	45 mA	500 ms	0,0063
Transmisión LoRa (TX)	120 mA	1.200 ms	0,0400
Reposo Profundo (Deep Sleep)	0,01 mA	3.596.800 ms	0,0099

- Capacidad de batería proyectada: 2000 mAh
- Voltaje de operación: 3,7V — 4,2V

El análisis revela que el 98% del tiempo el dispositivo se mantiene en un estado de consumo despreciable, resultando en una autonomía teórica de 452 días. Esto valida la propuesta como una solución de bajo impacto operativo ideal para el contexto rural de Ubaté, donde el mantenimiento técnico frecuente no es viable.

C. Validación del Algoritmo de Visualización Georreferenciada

El algoritmo de Distancia Inversa Ponderada (IDW) fue seleccionado como el más eficiente para la generación de mapas de sequía en la multiplataforma, dado su bajo costo computacional y su adecuación a escenarios con densidad de muestreo reducida [4]. La TABLA VI presenta el modelo de transformación de datos del sensor a la interfaz visual, que permite al agricultor interpretar el estado hídrico de su cultivo sin requerir conocimientos técnicos previos

TABLA VI

MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN DE DATOS PARA LA INTERFAZ

Nivel de Entrada (Sensor)	Valor de Humedad (%)	Interpretación Visual (Mapa)	Alerta Generada
Crítico Bajo	< 60%	Rojo Intenso (#FF0000)	Peligro: Estrés hídrico alto
Óptimo de Cultivo	60% — 75%	Verde Esmeralda (#3ECC71)	Estado ideal: Sin riesgos
Saturado	> 75%	Azul Cobalto (#2E86C1)	Alerta: Posible encharcamiento

D. Wireframes de la Plataforma de Visualización Multiplataforma

Como resultado del sprint 6, se desarrollaron los wireframes de alta fidelidad de la plataforma Geo-Riego bajo el estándar Progressive Web App (PWA), diseñados con criterio de usabilidad rural. La plataforma se estructura en cinco módulos funcionales principales.



Fig. 1. inicio de sesión

El módulo de autenticación (Fig. 1) implementa una interfaz de inicio de sesión con fondo contextual del cultivo de cebolla larga, acceso mediante credenciales institucionales y opción de versión móvil, garantizando accesibilidad desde cualquier dispositivo sin instalación adicional.



Fig. 2. métricas críticas del cultivo

El dashboard principal (Fig. 2) centraliza las métricas críticas del cultivo en tiempo real: humedad promedio del suelo (61%), temperatura del suelo (23,5°C), estado general de parcelas (2/4 en estado óptimo) y número de alertas activas (2). Este panel permite al agricultor obtener una visión completa del estado hídrico de su cultivo en una sola pantalla.



Fig. 3. distribución geoespacial

El módulo de mapa de sequía (Fig. 3) presenta la distribución geoespacial de 4 parcelas con 16 sensores activos, visualizando el estado hídrico mediante código de color por lote: COL-A1 Lote Norte con 75% de humedad en estado óptimo, COL-A2 Lote Sur con 55% en estado medio, COL-B1 Lote Este con 35% en estado crítico y COL-B2 Lote Oeste con 80% en estado óptimo. Esta representación permite al agricultor identificar de forma inmediata qué zonas requieren intervención de riego.



Fig. 4. Estado de sensores

El módulo de sensores (Fig. 4) muestra el estado individual de los 16 nodos desplegados, con lecturas de humedad y

temperatura por sensor, identificación de parcela, timestamp de última lectura y observaciones contextuales. De los 16 sensores activos, 8 reportan estado óptimo, 4 estado medio y 4 estado crítico, demostrando la capacidad del sistema para discriminar condiciones hídricas a nivel de zona dentro del mismo cultivo.



Fig. 5. historial de humedad

El módulo de reportes (Fig. 5) genera el historial de humedad de los últimos 7 días con filtros por fecha, parcela y tipo de reporte, con opciones de exportación a PDF y Excel. El gráfico de tendencias muestra la evolución diferenciada de los cuatro lotes, evidenciando la caída progresiva de humedad en el Lote Este — de 45% a 35% entre el 19 y el 25 de febrero — como señal temprana de déficit hídrico que el sistema detecta antes de que sea perceptible visualmente en campo.



Fig. 6. gestión de usuarios

El módulo de configuración (Fig. 6) permite la gestión de usuarios, la administración de sensores activos e inactivos y la configuración de notificaciones push y alertas por correo electrónico en tiempo real, garantizando que el agricultor reciba alertas inmediatas ante cualquier condición crítica de humedad.

En conjunto, los wireframes validados demuestran que la plataforma Geo-Riego cumple con el principio de usabilidad rural: una interfaz intuitiva, visualmente clara y funcional desde cualquier dispositivo, que transforma datos técnicos complejos de sensores en información accionable para el productor de cebolla larga de Ubaté.

V. CONCLUSIONES

El presente proyecto demuestra que el diseño de un ecosistema IoT basado en LoRaWAN y visualización geoespacial es técnicamente viable para transformar la gestión hídrica en los cultivos de cebolla larga de la provincia de Ubaté.

La configuración de red LoRaWAN en la banda de 915 MHz con SF10 proyecta una cobertura de 4,2 km y un PDR superior al 95%, superando las limitaciones de conectividad del terreno irregular del valle [8]. El modelo energético del nodo ESP32 con ciclos Deep Sleep proyecta una autonomía de 452 días con batería de 2000 mAh, eliminando la necesidad de mantenimiento técnico frecuente en campo. El algoritmo IDW permite generar mapas de sequía continuos con un número mínimo de sensores, reduciendo costos sin sacrificar cobertura espacial [4]. Los wireframes de la plataforma Geo-Riego validan que es posible transformar datos complejos de sensores en alertas visuales intuitivas accesibles desde cualquier dispositivo.

Como trabajo futuro se propone la construcción del prototipo físico en campo real y la validación experimental de los parámetros hídricos con el cultivo de *Allium fistulosum* en condiciones reales de la provincia.

REFERENCES

[1] H. R. Bogena, J. A. Huisman, C. Oberdörster, y H. Vereecken, "Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications," *J. Hydrol.*, vol. 344, no. 1–2, pp. 32–42, 2007.

[2] C. M. P. Vaz et al., "Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors," *Vadose Zone J.*, vol. 12, no. 2, 2013.

[3] Agencia Nacional del Espectro (ANE), "Plan Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF)," Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Colombia, 2022.

[4] X. Yao et al., "Comparison of Four Spatial Interpolation Methods for Estimating Soil Moisture in a Complex Terrain Catchment," *PLOS ONE*, vol. 8, no. 1, p. e54660, 2013.

[5] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, y T. Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, Sep. 2017.

[6] Semtech Corporation, "Smart Agriculture Revolution: LoRaWAN in Farming," Semtech Blog, 2024. [Online]. Available: https://www.semtech.com

[7] N. J. Chapungo y O. Postolache, "Experimental evaluation of LoRaWAN connectivity reliability in remote rural areas of Mozambique," *Sensors*, vol. 25, no. 19, p. 6027, Oct. 2025.

[8] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, y F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2019.

[9] H. R. Bogena, J. A. Huisman, C. Oberdörster, y H. Vereecken, "Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications," *J. Hydrol.*, vol. 344, no. 1–2, pp. 32–42, 2007.

[10] R. Nandi y D. Shrestha, "Assessment of low-cost and higher-end soil moisture sensors across various moisture ranges and soil textures," *Sensors*, vol. 24, no. 18, p. 5886, Sep. 2024.

[11] C. M. P. Vaz et al., "Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors," *Vadose Zone J.*, vol. 12, no. 2, 2013. [12] A. Alkhatib et al., "A novel methodology for sustainable agriculture: IoTdriven water management using LoRaWAN," *Int. J. Basic Appl. Sci.*, 2025.

[13] M. K. Ramos Villalta, M. Condori Chirinos, y R. R. Sulla Torres, "Development of an IoT system based on LoRaWAN to monitor the distribution and quality of irrigation water in rural areas of Arequipa, Peru," *SSRG Int. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 11, no. 10, pp. 223–230, Oct. 2024.

[14] L. García et al., "IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture," *Sensors*, vol. 20, no. 4, p. 1042, 2020.

[15] W. Arrubla-Hoyos et al., "Precision agriculture and sensor systems applications in Colombia through 5G networks," *Sensors*, vol. 22, no. 19, p. 7295, Sep. 2022.

[16] R. Cisneros-Zevallos y J. Benavides, "Visualización de datos geoespaciales mediante algoritmos de interpolación," *Rev. Investig. Sist. Inform. (RISI)*, vol. 17, no. 2, 2020.

[17] P. Zhang et al., "Spatial interpolation methods for soil moisture monitoring: A review," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 11, p. 4897, 2021.

[18] L. F. Ramírez-Moreno, "Modernización de los distritos de riego mediante TIC," Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2022.

Aplicación Móvil para la Optimización de la Gestión y Experiencia en el Programa Campamentos Juveniles del Valle de Ubaté

1st Juan David Castrillon Varon
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Villa de San Diego de Ubate, Cundinamarca
jdavidcastrillon@ucundinamarca.edu.co

2nd Luis Felipe Molina Sánchez
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Villa de San Diego de Ubate, Cundinamarca
luisfelipemolina@ucundinamarca.edu.co

3rd Rafael Ortega Ortega
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Villa de San Diego de Ubate, Cundinamarca
rortegao@ucundinamarca.edu.co

***Resumen*—En la provincia del Valle de Ubaté, Colombia, el programa Campamentos Juveniles, presenta una iniciativa clave para el desarrollo social y recreativo de la región, capacitando a jovenes voluntarios en el desarrollo de sus habilidades personales, sociales y vocacionales, de igual manera fomentando el desarrollo de proyectos de voluntariado promoviendo la ayuda comunitaria. Actualmente, este programa presenta demoras en los procesos, ya que se realiza su gestión administrativa de forma manual, como los procesos de inscripción, de seguimiento de participantes y comunicación de eventos se realizan mediante hojas de cálculo y formatos físicos, generando riesgos de pérdida de informacion, ineficiencias administrativas y desinformación entre los campistas, lo que impacta negativamente la participación y el seguimiento del proceso formativo.**

Ante esta problemática, nace la iniciativa de desarrollar una aplicación móvil denominada CAMPJU, la cual pueda optimizar la gestión administrativa y mejorar la experiencia de los integrantes del programa centralizando la información, automatizando procesos críticos y fortaleciendo los canales de comunicación entre coordinadores y campistas.

Para el desarrollo del presente proyecto, se adoptó el marco de trabajo ágil Scrum con 5 sprints de cuatro semanas para la gestión del Product backlog. Por otro lado, para la Ingeniería de requisitos del proyecto, se aplicó una encuesta validada mediante el coeficiente Alfa de Cronbach, obteniendo un valor superior a 0.90, que confirma una excelente consistencia interna. Con base en esto, se construyeron 32 historias de usuario priorizadas. En la fase de diseño, se elaboraron diagramas UML de clases, secuencia y casos de uso, al igual que mockups interactivos de alta fidelidad. Posteriormente en la fase de desarrollo se realizó una arquitectura basada en Flutter con Dart para el frontend, y Firebase Authentication con Cloud Firestore como backend, garantizando persistencia, sincronización en tiempo real y funcionalidad offline.

Como resultado del proceso de desarrollo, se implementaron y probaron exitosamente los módulos de autenticación (registro e inicio de sesión), los cuales integran validaciones en tiempo real y conexión segura con los servicios de Firebase Authentication y Cloud Firestore. Adicionalmente, se desarrolló una primera versión del módulo Home, junto a los diferentes apartados definidos por las historias de usuario que establecen la estructura base para la visualización de contenido. Cada uno de estos entregables constituyen un incremento de software funcional que sienta las bases técnicas para la incorporación progresiva de módulos restantes.
Este proyecto demuestra que la aplicación de principios de Ingeniería de software, respaldados por una metodología ágil y un stack tecnológico robusto como Flutter y Firebase, permite transformar la gestión de programas sociales mediante la centralización de información y automatización de procesos. La arquitectura implementada asegura la escalabilidad del sistema, facilitando futuras expansiones.

Palabras clave— Aplicación Móvil, Gestión de Campamentos, Autenticación segura, Transformación Digital.

I. Introducción

En los últimos cinco años, el mundo ha experimentado una revolución tecnológica que ha transformado la forma en que la sociedad se comunica, aprende, interactúa y vive. Los avances tecnológicos han marcado una época en la que la innovación se ha consolidado como un pilar fundamental de la sociedad moderna.

En el programa nacional de campamentos juveniles, se evidencia una carencia de recursos tecnológicos que podrían optimizar la gestión de la base de datos que incluye a todos los integrantes del programa. En particular en el programa de Campamentos Juveniles de la provincia del valle de Ubaté, las inscripciones se realizan de manera manual, utilizando herramientas como Excel o formatos impresos. Esta metodología puede generar retrasos en el proceso de registro y vulnerabilidad en el tratamiento de datos personales. Asimismo, al ser un sistema manual, es posible que se produzca desinformación sobre la fecha de los encuentros del programa y sobre los procedimientos de inscripción para acceder a ellos. Frente a esta problemática surge la idea de crear y diseñar CampJu App: un software destinado a almacenar una base de datos de los campistas del Valle de Ubaté, permitir el registro virtual de los encuentros, generar un registro fotográfico, brindar apartados de cursos y ofrecer múltiples funcionalidades que contribuyan a la formación de cada uno de los integrantes del programa. Es de esta manera que se busca generar un impacto positivo tanto en el programa como en la formación de nuevos lideres sociales en el país.

II. Marco Referencial

El desarrollo de aplicaciones móviles para gestión de programas juveniles, de educación y campamentos ha sido abordado por múltiples investigaciones a nivel internacional, en las cuales se evidencian problemáticas comunes como la desorganización de datos, comunicación eficiente y necesidad de tecnologías accesibles. A continuación, se analizan diversos proyectos referentes para el desarrollo de CampJu App.

En el contexto de los movimientos de exploradores o scouts, López [1] desarrollo una aplicación móvil para la difusión de actividades del movimiento scout en Guatemala. La investigación partió de la premisa de "No dar a conocer la información por los medios correctos hace perder el interés de las personas y se pierde el sentido de formar una organización" [1, p.46]. Esta afirmación es relevante y encaja en el desarrollo de CampJu App, ya que la falta de un sistema centralizado de información en el programa Campamentos Juveniles del valle de Ubaté ha derivado en desinformación recurrente sobre fechas de encuentros y procesos de inscripción. Esta propuesta demuestra que la tecnología móvil puede actuar como un canal efectivo para mantener el interés y participación de los jóvenes.

Por su parte, Placencio y Vera [2] implementaron una aplicación web para la inscripción y seguimiento del progreso de jóvenes integrantes de la asociación Scouts del Guayas en Ecuador. Aquí, los autores señalan que "en la actualidad, la tecnología permite la sistematización de muchos procesos para realizarlos de manera rápida, y es de vital importancia para las instituciones públicas como privadas que las utilicen para realizar una toma de decisiones de manera oportuna" [2, p.32]. Si bien esta solución se enfoca en el desarrollo de una aplicación web, CampJu propone el desarrollo de una aplicación móvil multiplataforma, lo cual garantiza una experiencia nativa tanto en dispositivos Android como iOS. Además de esto, el presente proyecto incorpora de igual manera módulos formativos como cursos para ampliar el alcance hacia la educación continua.

En la misma línea, Anggiani [8] desarrolló un Sistema de información de exploradores para el Kwartir Cabang Mataram en Indonesia mediante la implementación de una API REST. Este estudio partió del diagnóstico en donde los procesos existentes basados en Google Forms y Excel eran ineficientes debido a la entrada manual de datos, el almacenamiento fragmentado y la falta de acceso en tiempo real, lo cual daba paso a errores y retrasos administrativos. De esta manera utilizando la metodología Scrum estructurada en cinco sprints, se desarrolló una API con 25 endpoints probados exitosamente mediante pruebas de caja negra. Después de esto, una encuesta de viabilidad con 23 representantes scouts arrojó una puntuación promedio de 81,74%, la cual fue catalogada como categoría "buena", demostrando que la solución mejoró significativamente el manejo de datos en comparación con los flujos de trabajo manuales previos [4].

III. Marco Metodologico

A. Enfoque metodológico

Se empleó un enfoque cuantitativo para caracterizar las necesidades de los campistas, es por ello por lo que se diseñó una encuesta por medio de Microsoft Forms en donde se encontraban 4 partes esenciales con preguntas en escala de Likert sobre funcionalidades deseadas, frecuencia de uso, dificultades actuales que se presentan y preferencias de interfaz. En primera instancia se realizó una prueba piloto con 40 campistas para calcular el Alfa de Cronbach, obteniendo un valor de 0.97, que indica una excelente consistencia interna [7]. Posteriormente se aplicó la encuesta completa a la población objetivo de 300 campistas aproximadamente.

B. Herramientas tecnológicas

Para el desarrollo de CampJu App se seleccionó un conjunto de herramientas tecnológicas que garantizan multiplataforma, escalabilidad, bajo costo y facilidad de implementación. La tabla 1 resume las principales tecnologías empleadas.

TABLA I
Herramientas Utilizadas En El Desarrollo

Componente	Herramienta	Propósito
Frontend	Flutter (Dart)	Desarrollo multiplataforma (Android/iOS) desde una sola base de código

Backend y servicios	Firebase Auth, Firestore, Storage, Crashlytics	Autenticación, base de datos en tiempo real, almacenamiento de archivos y monitoreo de errores
Diseño UI/UX	Figma	Creación de mockups y prototipos interactivos colaborativos
Gestión de proyecto	Jira	Administración del backlog, sprints y seguimiento de tareas bajo Scrum

La elección de flutter como framework frontend responde a su capacidad de generar aplicaciones nativas para iOS y Android a partir de un único código fuente haciendo uso del lenguaje Dart [5],[6]. Esto es crítico para CampJu App, ya que los campistas utilizan dispositivos con distintos sistemas operativos y mantener separados dos proyectos simultáneamente duplicaría esfuerzos.

Por otro lado, firebase, como herramienta Backend elimina la necesidad de administrar servidores propios y se integra nativamente con flutter [7]. En particular Firebase Authentication, el cual simplifica el registro y acceso seguro de usuarios; Cloud Firestore proporciona una base de datos NoSQL con sincronización en tiempo real y soporte offline, el cual es un aspecto fundamental en zonas rurales con conectividad limitada; Cloud storage aloja materiales educativos y registro fotográfico; Crashlytics reporta errores en tiempo real para garantizar la estabilidad.

C. Metodología de desarrollo

Se adopto un enfoque de desarrollo ágil basado en la metodología Scrum. Esta elección responde a la necesidad de gestionar un proyecto con un equipo de dos desarrolladores y requisitos que evolucionan con la retroalimentación del Product Owner. Scrum permite realizar entregas iterativas de software funcional, crítico para validar la solución con los usuarios finales de manera temprana [11].

D. Ciclo de desarrollo

El desarrollo de CampJu App se gestionó bajo la metodología Scrum, adaptada a un equipo pequeño de dos desarrolladores. El proyecto se organizó en múltiples sprints, en donde actualmente se encuentran 12 sprints registrados en Jira, cada uno con una duración de dos a tres semanas, dependiendo de la complejidad de las funcionalidades [13]. La Tabla II resume los eventos y artefactos Scrum empleados, junto con las herramientas de soporte.

Tabla 2
Eventos Y Artefactos De Scrum Utilizados En El Proyecto

Tipo	**Nombre**	**Descripción / Frecuencia**	**Herramienta**
Evento	Sprint Planning	Definir la meta del Sprint y seleccionar ítems del Product Backlog.	Jira
Evento	Daily Scrum	Reunión diaria de 15 min para sincronizar avances y planificar el día.	Reunión virtual
Evento	Sprint Review	Revisar el trabajo completado al final de cada Sprint con el Product Owner.	Jira + reunión
Artefacto	Product Backlog	Lista priorizada de requisitos funcionales obtenidos de las Historias de Usuario.	Jira
Artefacto	Sprint Backlog	Conjunto de tareas seleccionadas del Product Backlog para un Sprint.	Jira
Artefacto	Incremento	Versión funcional mejorada de la aplicación al final de cada Sprint.	Código en repositorio

Para la gestión de estos artefactos se utilizó Jira, software estándar en la industria para la gestión ágil de proyectos. Fue aquí en donde se definieron diversas épicas que agrupan las funcionalidades por módulo. A partir de ello, se identifican las siguientes épicas principales en la siguiente imagen:



Fig.1. Gestión de épicas en Jira

Cada épica contiene múltiples historias de usuario (HU) y tareas (TASK). Por ejemplo, dentro del módulo de gestión de campamentos se encuentran tareas como la integración de la API de Google Maps (TASK 07) y la configuración de índices compuestos en Firestore para búsquedas filtradas (TASK 08). De igual manera, se incluyen historias de usuario como HU15 (Calendario de eventos).

Por otra parte, el Scrum Board de Jira permite visualizar el progreso de cada tarea a través de columnas como TO DO, IN PROGRESS y DONE. De esta manera facilitando la identificación de cuellos de botella y la adaptación continua del plan de desarrollo basado en el product backlog del proyecto.

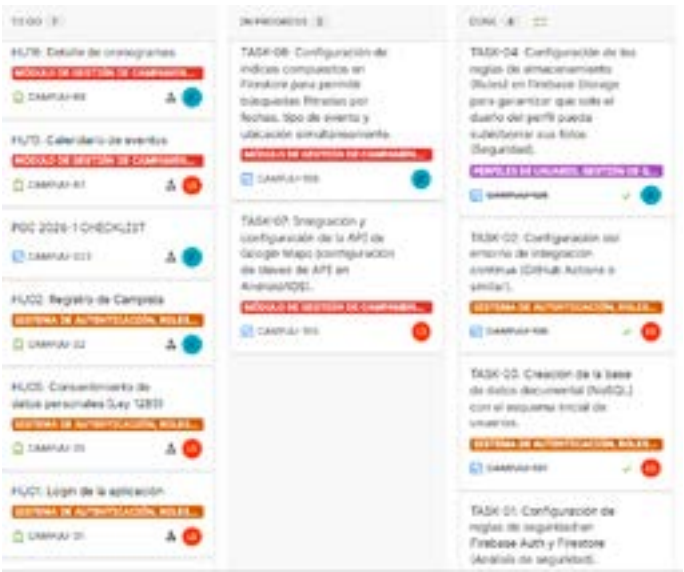


Fig.2. Gestión de tablero de Jira.

De esta manera el desarrollo se desgloso en cuatro fases consecutivas, que se ejecutaron de manera iterativa a lo largo de cada uno de los sprints definidos en el proyecto.

E. Fase de planeación de requerimientos

Para el levantamiento de requerimientos se realizo una encuesta con el Product Owner y una muestra piloto de campistas para recopilar las necesidades funcionales y no funcionales. Como resultado de ello se definieron un total de 32 historias de usuario HU, las cuales se organizaron en un product backlog priorizado utilizando en Jira.

Derivados de las encuestas, entrevistas y análisis con las normativas aplicables se identificaron de igual manera un total de 32 requisitos funcionales y 12 no funcionales con sus respectivos criterios de aceptación. De esta manera siendo incorporadas al product backlog en donde se definieron prioridades. A modo de ejemplo se presentan dos casos representativos de este proceso.

En la figura 3 se encuentra detallada la historia de usuario 008; derivada de la necesidad de proteger las cuentas de los campistas. Mediante la interpretación del requisito funcional y su asignación automática en el product backlog se proceden a definir las tareas correspondientes para su cumplimiento.

HISTORIA DE USUARIO	HU 008
Cierre de sesión	
DEFINICIÓN	
¿Quién?	Como usuario de la aplicación
¿Qué?	Quiero cerrar la sesión de forma segura
¿Por qué/ para qué?	Para proteger mi cuenta cuando termine de usar la aplicación
CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	
• Al cerrar sesión preguntar si desea guardar contraseña • Si no se quiere cerrar sesión completamente, guardar la sesión cuando se cierre la aplicación • Limpiar datos sensibles de memoria al cerrar sesión	

Fig.3. Historia de usuario 008

Por otra parte, derivado de la obligación legal de obtener autorización explicita de padres o acudientes para el tratamiento de datos de menores se definió el siguiente requisito funcional:

ID	RF05
Nombre del requisito	Consentimiento de datos
Fuente del requisito	HU 005
Prioridad del requisito	Alta
Descripción	El sistema debe solicitar autorización para el uso de datos personales e imagen

Fig.4. Requisito Funcional 05

Estos dos casos ilustran cómo cada requisito entre los 44 identificados en total fue descompuesto en HU con criterios verificables. Como se puede apreciar en la siguiente imagen, las historias de usuario HU se priorizaron en el product backlog de Jira y han sido ejecutadas a lo largo de cada uno de los sprints del proyecto según su nivel de importancia o puntuación de historia, tal como se describe en la fase 3. En donde cada historia de usuario a su vez tiene ítems de trabajo que requieren

ser completados para dar finalización a cada historia de usuar



Fig.5. Listado de historias de usuario del product backlog

F. Fase de diseño

Una vez se han definido y priorizado cada uno de los requisitos en el product backlog se procedió al diseño de la aplicación. Esta fase se ejecuto en paralelo con la planificación de cada uno de los sprints, y tuvo como objetivo traducir las historias de usuario en modelos técnicos y visuales que guiaran la implementación de software. El diseño se dividió en dos componentes complementarios: Modelado UML y diseño de interfaz de usuario (MockUps), ambos debidamente validados con el product Owner antes de pasar a fase de implementación.

Para representar la estructura estática y el comportamiento dinámico del sistema se elaboraron diversos tipos de diagramas UML utilizando la herramienta Draw.io, como se puede evidenciar en la figura 6, se modelo la interacción de un usuario con la aplicación mediante un diagrama de casos de uso [12].



Fig.6. Diagramas UML interacción del usuario y el sistema

De igual manera, con base en las historias de usuario y diagramas UML se diseñaron mockups de alta fidelidad en Figma, una herramienta colaborativa basada en la nube. Los mockups simularon la navegación real de la aplicación y fueron revisados en Sprint reviews para asegurar que la experiencia de usuario respondiera a las necesidades reales de los campistas.

G. Fase de implementación

Una vez finalizadas las fases de planeación y diseño se inicia la fase de desarrollo del aplicativo móvil, en la cual se lleva a cabo la implementación de las funcionalidades definidas en el product backlog y priorizadas según urgencia y semestre de desarrollo. Durante esta etapa se desarrolló el código fuente del sistema con el framework de desarrollo flutter y el lenguaje de programación Dart mediante el IDE Visual Studio Code, por otro lado, los servicios backend proporcionados por Firebase con firebase authentication y cloud firestore.

1) Módulo de Autenticación: Posteriormente se desarrollaron las funcionalidades relacionadas con el módulo de autenticación y acceso, de esta manera permitiendo a los usuarios el registro e inicio de sesión dentro de la aplicación con el uso de sus credenciales. Para la gestión de usuarios se integra el servicio de firebase auth para validar de forma segura las credenciales de acceso y el manejo de registro de usuarios, de igual manera se implementa la conexión con Cloud Firestore que permite almacenar y gestionar información de los usuarios registrados dentro de la aplicación, esta facilita la administración de datos y permite la escalabilidad futura del sistema.

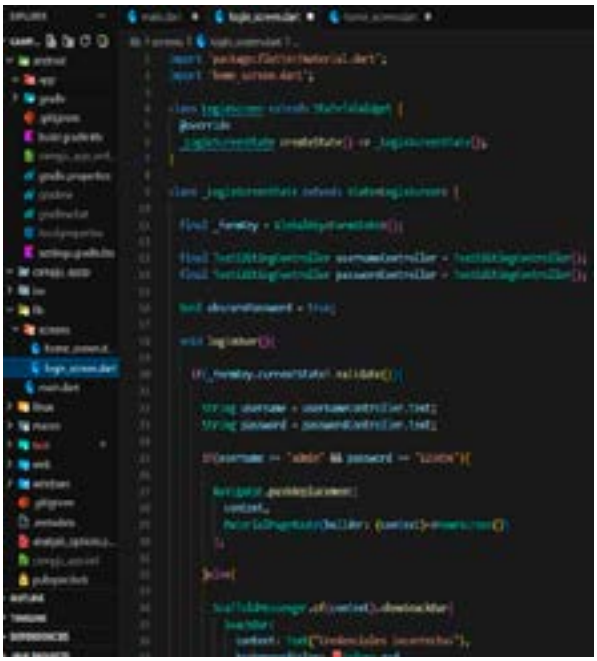


Fig.7. Implementación del código módulo completo de autenticación

2) Versión preliminar módulo home: Posteriormente se inicia la implementación del módulo principal de la aplicación, aquel que corresponde a la pantalla de inicio o feed. Este módulo tiene como objetivo presentar al campista la información más relevante del sistema, tales como los demás apartados de anuncios, cursos, eventos actividades y contenido relacionado con el programa campamentos juveniles. Dentro de este módulo se implementan componentes visuales que permiten organizar la información en formato de publicaciones o cards (tarjetas) de esta manera facilitando la visualización de cada uno de los diferentes contenidos disponibles dentro de la app. De acuerdo con los lineamientos de diseño definidos en la fase anterior se construyó una primera versión de la interfaz que permite estructurar la información de manera

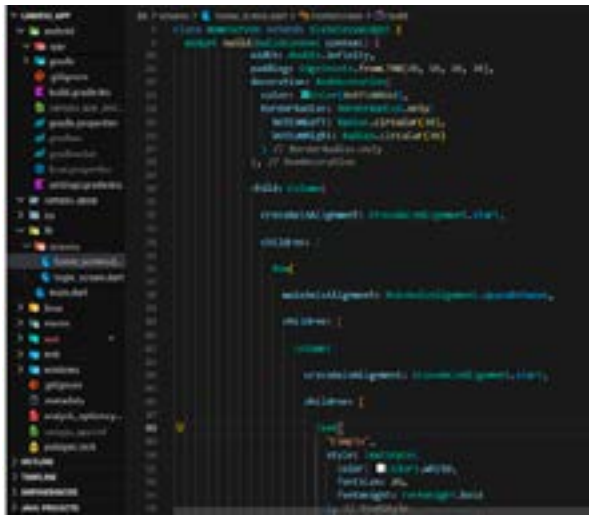


Fig.8. Implementación parcial del código módulo Home

3) Módulo de perfil de campista: El perfil de usuario permite a cada campista visualizar y editar su información personal: nombre completo, correo electrónico, delegación (municipio al que pertenece), rango dentro del programa y fotografía de perfil. La información se almacena en Firestore y se sincroniza en tiempo real. Se implementaron funciones de actualización de datos (con validación) y la opción de cierre de sesión seguro (HU008) que elimina los tokens locales y limpia datos sensibles de memoria. Además, desde el perfil se puede acceder al historial de eventos inscritos y al progreso de cursos. La figura 9 muestra la interfaz del perfil desplegada.

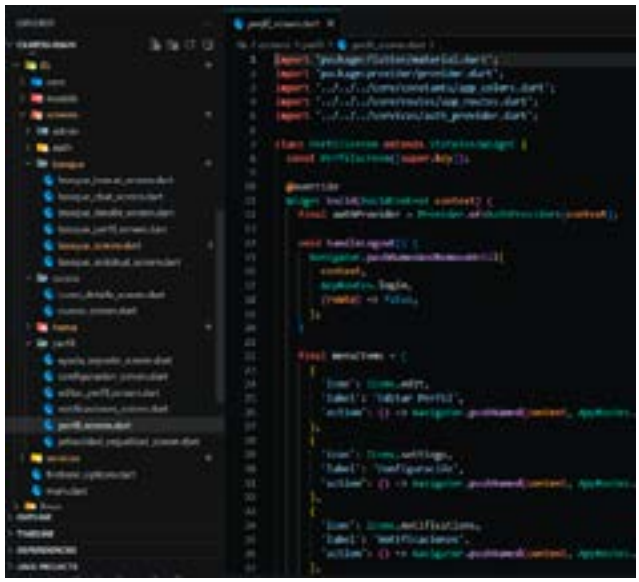


Fig.9.Interfaz de perfil desplegada

4) Módulo de Cursos: Este módulo responde a la necesidad expresada por los campistas en la encuesta de poder acceder a recursos para poder poner en práctica sus habilidades y de igual manera mejorar.

Este Proporciona una biblioteca de recursos educativos organizados por categorías (liderazgo, primeros auxilios, medio ambiente, técnicas de campamento). Cada curso incluye una serie de lecciones en formato de texto, video o PDF descargable, junto con una barra de progreso que indica el avance del campista. La implementación utiliza Firestore para almacenar los metadatos de los cursos (título, descripción, nivel, duración) y Cloud Storage para alojar los archivos adjuntos. La Figura V muestra parte del código fuente de la implementación del módulo de cursos dentro de la aplicación.



Fig. 10. Código fuente de módulo de cursos

5) Módulo de Bosque: El módulo de Bosque, el cual es un nombre adoptado del léxico campamentil representa la delegación o región a la que pertenece cada campista. Este módulo permite: (i) seleccionar la delegación durante el registro o edición de perfil, (ii) visualizar el mapa de la región con los próximos campamentos programados en esa zona (integrando Google Maps), y (iii) filtar eventos y líderes por delegación

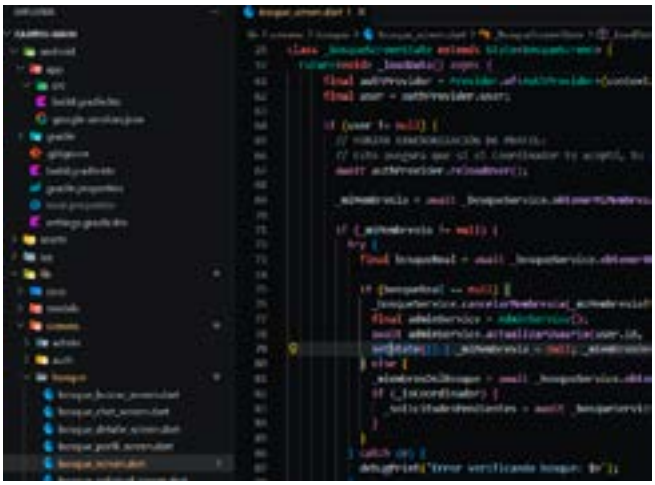


Fig.11. Código fuente de módulo de bosque

H. Fase de pruebas finales

Durante la fase de pruebas establecida en el proyecto se realizaron pruebas funcionales, estas tienen el objetivo de verificar el funcionamiento correcto de los módulos implementados hasta el momento de la aplicación CampJu, estas pruebas se enfocaron principalmente en validar el comportamiento de los módulos de Login y registro de usuarios, los que constituyen las primeras ventanas de interacción en el sistema.

Las pruebas se ejecutan en diferentes escenarios de la app, de esta manera permitiendo comprobar que los formularios implementados procesan de manera correcta ingresada por el usuario, en el caso del módulo de registro se verifico que el sistema permita el ingreso de los datos solicitados de email y contraseña y que estos campos sean validados en la lógica del programa antes de procesar esta información de manera correcta.

Estas pruebas unitarias con demás módulos desarrollados confirman que la estructura básica de la aplicación presentada opera de manera adecuada dentro de la primera versión preliminar. Es importante mencionar que estas pruebas corresponden en etapa inicial del desarrollo, las cuales tienen como objetivo validar los componentes implementados hasta el momento, es por ello por lo que a medida que se desarrolle la escalabilidad el proyecto se realizaran pruebas adicionales y nuevas implementándolas en los artefactos de la metodología como sprint y parte del desarrollo con el fin de garantizar la estabilidad y correcto desempeño de la aplicación en su versión final.

IV. Resultados

Como resultado de esta implementación se logró obtener una versión funcional del módulo de inicio de sesión de la aplicación móvil, del registro por primera vez tanto con credenciales con correo electrónico común e inicio de sesión seguro vinculado a Google, en la cual cada campista puede ingresar sus datos de autenticación para ingresar al sistema.



Fig.12. Módulo de autenticación. (a) Inicio de sesión. (b) Crear cuenta.

Se entregó una versión preliminar del feed principal que muestra tarjetas con anuncios, próximos eventos y accesos directos a cursos, perfil y bosque. Los datos se cargan desde Firestore en tiempo real y la navegación hacia otros módulos es fluida.

De igual manera, el perfil del usuario permite visualizar y editar nombre, correo, delegación, rango y foto de perfil. Los cambios se sincronizan instantáneamente con Firestore. La opción de cierre de sesión (HU008) limpia los datos sensibles de memoria. Desde el perfil se accede al historial de eventos y al progreso de cursos.

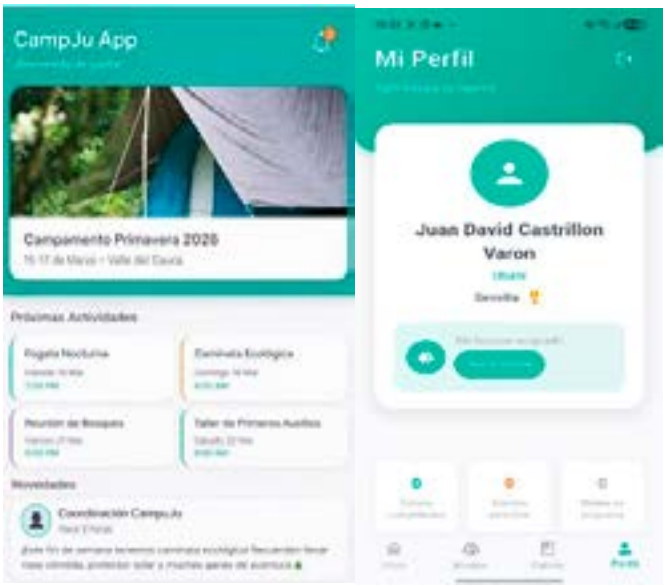


Fig.13. Módulo principal de la aplicación. (a) Pantalla de inicio. (b) Perfil de usuario.

Se implementó una biblioteca educativa organizada por categorías (liderazgo, primeros auxilios, medio ambiente, técnicas de campamento). Cada curso muestra título, descripción, duración y barra de progreso. Al seleccionar un curso se despliegan lecciones en texto, video o PDF descargable, guardando el avance del campista.

El módulo Bosque representa la delegación del campista (ej. Ubaté, Carmen de Carupa). En el resultado de la primera versión permite seleccionar la delegación y enviar petición de ser aceptado por un administrador de zona, o director. También permite visualizar un mapa con Google Maps de los próximos campamentos en esa zona, y filtrar eventos y líderes por delegación.

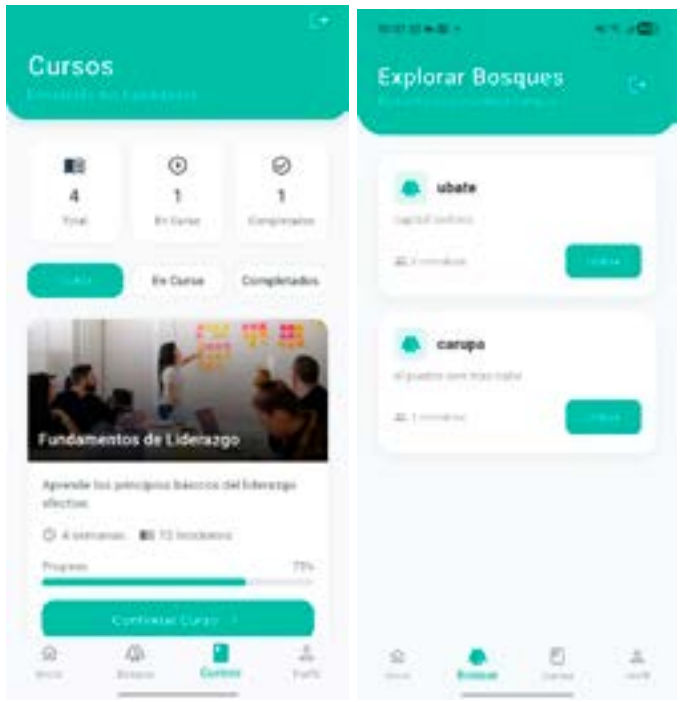


Fig.14. Módulo de comunidad. (a) Apartado de cursos. (b) Exploración de bosques

V. Conclusiones

El desarrollo de CampJu App demostró que la gestión manual de datos en el programa Campamentos Juveniles del Valle de Ubaté es una fuente recurrente de ineficiencias, dentro del programa, es por ello que la implementación de una aplicación móvil desarrollada con flutter y Firebase permitió centralizar los procesos de registro, autenticación, consulta de eventos, formación académica y organización por delegaciones (bosques), reduciendo significativamente los tiempos de inscripción y eliminando el uso de hojas de cálculo y papel. Este resultado valida la hipótesis tecnológica del proyecto: una herramienta digital bien diseñada puede transformar la operación de programas juveniles de alto impacto social.

Desde el punto de vista metodológico, la adopción del marco de trabajo ágil Scrum resultó acertada para un equipo pequeño de dos desarrolladores. La organización del trabajo en sprints, la gestión del product backlog en Jira y las validaciones constantes con el Product Owner permitieron entregar incrementos funcionales en cada ciclo, ajustar prioridades sobre la marcha y mantener alineado el desarrollo con las necesidades reales de los campistas. La creación de 32 historias de usuario y su priorización en épicas) demostró que el marco Scrum es un facilitador para equipos con recursos limitados.

En el plano técnico, se logró una integración sólida entre Flutter y los servicios de Firebase (Auth, Firestore, Storage). Los módulos de autenticación (con dos métodos: correo/contraseña y Google), perfil de usuario (con edición en tiempo real y cierre de sesión seguro HU008), feed principal (Home), biblioteca de cursos (con barra de progreso y lecciones

multimedia) y bosque (delegación territorial con mapas y filtros) fueron implementados y superaron todas las pruebas funcionales. La encuesta de validación de requisitos arrojó un Alfa de Cronbach de 0.97, respaldando la fiabilidad del instrumento y la pertinencia de los requerimientos capturados.

El trabajo futuro de CampJu App incluye la finalización del módulo de notificaciones push, la integración completa del calendario de eventos con Google Maps en todos los bosques, y la ampliación de la biblioteca de cursos con contenido generado por los propios coordinadores del programa o campistas lideres con proyectos de ascenso. Asimismo, se proyecta la escalabilidad de CampJu App a otras zonas de la región de Cundinamarca y, potencialmente, a nivel nacional, adaptando la arquitectura actual a nuevas demandas.

Referencias

[1] O. Efraín López and J. M. Rubio Vidal, "Aplicación móvil para la difusión de actividades del movimiento Scout en Guatemala 'Scout App'," *Tesis de pregrado*, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2016.

[2] R. E. Placencio Pinto and A. J. Vera Rojas, "Aplicación web para la inscripción y seguimiento del progreso de los jóvenes integrantes de la Asociación de Scouts del Guayas," *Tesis de pregrado*, Universidad de Guayaquil, Ecuador, 2022.

[3] G. Richards and J. Wilson, "The impact of cultural and recreational activities on youth development," *Journal of Youth Studies*, vol. 7, no. 3, pp. 245-267, 2004.

[4] K. A. Osuna, "Implementación de Flutter para el desarrollo de aplicaciones móviles nativas en iOS y Android," *Proyecto de grado*, Instituto Tecnológico de Mazatlán, México, 2020.

[5] M. L. R. Q. Collaguazo, M. M. S. P. Venegas, A. A. A. Guerrero, M. N. M. Freire, and M. S. H. C. Beltrán, "Desarrollo híbrido con Flutter," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 6, no. 4, pp. 1-15, 2022.

[6] J. Martins, "Scrum: conceptos clave y cómo se aplica en la gestión de proyectos," *Asana Blog*, Feb. 2024. [En línea]. Disponible: https://asana.com/es/resources/what-is-scrum

[7] C. Ortega, "Alfa de Cronbach: Qué es y cuál es su importancia," *QuestionPro*, Feb. 2024. [En línea]. Disponible: https://www.questionpro.com/blog/es/alfa-de-cronbach/

[8] I. D. P. D. Anggiani, B. Irmawati, and R. Afwani, "REST API Development of the Mataram Scout Information System for Member Management and Activity Reporting using Scrum Method," *Journal of Computer Science and Informatics Engineering (J-Cosine)*, vol. 9, no. 1, Jun. 2025, doi: 10.29303/jcosine.v8i1.640.

[9] S. Balocco, "Desarrollo de una aplicación móvil para sistemas operativos Android dirigido a mejorar la gestión diaria de asociaciones juveniles," *Tesis de pregrado*, Universitat de Barcelona, España, 2024.

[10] T. Biselx, "Mobile App Development for Youth Association Management," *Bachelor's thesis*, Metropolia University of Applied Sciences, Finland, 2025.

[11] H. Zeballos, "Aplicando SCRUM," *Revista Investigación y Tecnología*, no. 1, pp. 125–132, 2012.

[12] C. Fontana, *UML: Modelado de software para profesionales*. Buenos Aires, Argentina: Alfaomega, 2011.

[13] A. Arnautović, "Managing project using JIRA software," *Serbian Journal of Engineering Management*, vol. 7, no. 2, pp. 40–46, 2022.

[13] Congreso de Colombia, "Ley 1581 de 2012 - Por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales," *Diario Oficial No. 48.587*, 2012.

[14] Universidad de Cundinamarca, "Resolución No. 091 de 2023 - Por la cual se reglamenta el tratamiento de datos personales en la Universidad de Cundinamarca," 2023.

Heavy metals and microplastics identification using electronic tongues

Luis Peña
Dirección académica,
Universidad Nacional de Colombia
La Paz, Colombia
lpenad@unal.edu.co

Juan Sarmiento
Department of electrical and electronics engineering,
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
jusarmientoa@unal.edu.co

Juan Pablo Hoyos
Dirección académica,
Universidad Nacional de Colombia
La Paz, Colombia
jhoyoss@unal.edu.co

Luis Eduardo Mujica
Mathematics Department (Dmat)
Universitat Politecnica de Catalunya
Barcelona, Spain
luis.eduardo.mujica@upc.edu

Diego A. Tibaduiza
Department of electrical and electronics engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
dtibaduizab@unal.edu.co

***Abstract*—Pollutants in marine ecosystems are a major challenge today, as they can impact the marine food web and the interactions we have with the sea as humans. Considering these impacts, detecting these pollutants at early stages is necessary. Two major pollutants to consider are heavy metals and microplastics, for which some studies have demonstrated a negative impact on these ecosystems. To support the detection and classification of these pollutants, this work presents a methodology for detecting microplastics and heavy metals in seawater, including both synthetic and natural sources. The objective is to determine whether these pollutants, when present in marine ecosystems, can be detected using standard machine learning methods and, at the same time, to provide a practical tool for early identification. Results show that it is possible to identify and classify the different scenarios with an accuracy of over 97\% when several machine learning approaches are used as classifiers.**

Keywords—heavy metals, microplastics, machine learning, classification.

I. Introduction

Microplastics (MP) are solid particles less than 5 millimeters [1] in diameter that are primarily anthropogenic in origin and whose presence has become a global environmental problem. These are generated due to three fundamental causes. First, MPs are intentionally used as raw materials in the manufacture of certain products, a clear example of which is the cosmetics industry [2], where they are used for their abrasive properties or as fillers. Second, they are produced indirectly during the lifespan of objects, especially in the textile sector [3], as synthetic fibers release microscopic particles due to wear and mechanical friction with the environment, a process that is intensified during household activities [4] such as washing clothes. This phenomenon is further compounded by household waste, which significantly contributes to the release of MP into the environment.

The third cause is the poor management of plastic waste [5]. When these materials are disposed of improperly and exposed to environmental factors—such as solar radiation, humidity, or wind and water—they undergo a progressive fragmentation process that culminates in the formation of MP particles. Once these pollutants enter ecosystems [6], they act as environmental vectors, able to move between aquatic, terrestrial, and even atmospheric environments. This makes them risk agents capable of altering ecological dynamics, affecting the food chain, and compromising soil quality [7] and crop quality [8].

It is important to note that, in many cases, MPs do not act in isolation but can interact with other emerging pollutants [9]. These include heavy metals present in water [10], such as lead, mercury, and cadmium, which adhere to the surface of plastic particles due to their high specific surface area and the chemical properties of the polymers. This combination increases environmental toxicity, as it facilitates the transport and bioaccumulation [11] of metals in aquatic organisms, multiplying the risks to human health and biodiversity. Currently, there are different methods for the detection and quantification of microplastics and associated contaminants, some of them from the point of view of electronic tongues [12]; however, this area is still an open research area where it is possible to contribute with new alternatives and techniques that allow the identification of these pollutants in different ecosystems. Previous work explores MP identification [13]; however, as a contribution to this area, this work presents a methodology for the classification of heavy metals and MP. The approach combines two main pillars: controlled experiments and artificial neural networks. In the first stage, specific

laboratory conditions are recreated in which known concentrations of expanded polystyrene (representing the microplastic) and cadmium and zinc (the heavy metals under study) are added. These tests generate a reliable dataset that serves as a basis for model training.

Machine learning approaches are used to learn to recognize characteristic patterns of contaminants across various aquatic settings after pre-processing and multivariate analysis. Considering this integration, the methodology is not limited to simple sample collection but advances toward a more agile and accurate detection system. Natural seawater introduces greater complexity due to its chemical and biological variability, while synthetic water provides a more controlled environment. The contrast between the two kinds of samples allows for the robustness of the methodology to be evaluated and the algorithms to be adjusted to address real-world conditions. The methodology is validated considering different combinations of these pollutants and seawater with excellent results.

The organization of this work begins with this introduction. The next section includes a brief description of the methodology, including the experiments and data collected for validation. Section III presents the results, and Section IV includes the conclusions.

II. Methodology

This section outlines the methodology used to classify the samples into different classes based on heavy metals and microplastics. In general terms, the proposed methodology consists of four steps: data acquisition, pre-processing, feature extraction, and classification by using machine learning approaches.

Data acquisition involved preparing all samples in the laboratory and then analyzing them by electrochemical pulse voltammetry. This analysis was conducted using an electronic tongue system comprising seven sensors made of different materials, connected to a potentiostat via a multiplexer that controlled the measurement order. For each sample, 200 measurements were obtained; each measurement is a discrete signal with k sample points and current values in the order of μA for each sensor. The different types of samples were collected using three types of water: deionized water, synthetic salt water, and seawater; combined with cadmium (Cd), zinc (Zn), and microplastics (Mp) made from expanded polystyrene. Each sample was prepared with a final volume of 500 mL of water. Those requiring MP were contaminated with 0.2 g of MP, while those contaminated with Cd and Zn contained 1.5 ppm and 1 ppm, respectively. Table 1 shows the classes resulting from the combinations of different water types, heavy metals, and MP.

TABLE I. Combination of samples analyzed. Deionized water (DW), synthetic saltwater(SSW), seawater (SW), Cd (1.5 ppm), Zn (1 ppm), microplastic expanded polystyrene

Base sample	Combination	Number of measurements	Class ID
Deionized Water (DW)	DW	200	0
	DW + Mp	200	1
	DW + Cd	200	2
	DW + Cd + MP	200	3
	DW + Zn	200	4
	DW + Zn + MP	200	5
	DW + Cd + Zn	200	6
	DW + Cd + Zn + MP	200	7
Synthetic Saltwater (SSW)	SSW	200	8
	SSW + MP	200	9
	SSW + Cd	200	10
	SSW + Cd + MP	200	11
	SSW + Zn	200	12
	SSW + Zn + MP	200	13
	SSW + Cd + Zn	200	14
	SSW + Cd + Zn + MP	200	15
Seawater (SW)	SW	200	16
	SW + MP	200	17
	SW + Cd	200	18
	SW + Cd + MP	200	19
	SW + Zn	200	20
	SW + Zn + MP	200	21
	SW + Cd + Zn + Mp	200	22

After data acquisition, the pre-processing phase is applied. This phase seeks an easy, optimal way to manipulate the data, and it is developed into two parts. In the first part, a data deployment is performed to reduce the matrix from 3 to 2 dimensions, while in the second part, a data scaling process is carried out. For the data deployment, the measurements of the 7 sensors were aligned by rows, unifying the J and K dimensions, which results in a 2D matrix of (I) rows x (JxK) columns for each class; thus, the matrix that contains all the classes (Q) is a matrix of (IxQ) rows x (JxK) columns as shown in Figure 1. Then, to scale the data, Autoscaling was used, which involves subtracting the mean calculated for each column of the dataset from each value and then dividing it by the standard deviation also calculated for each column.

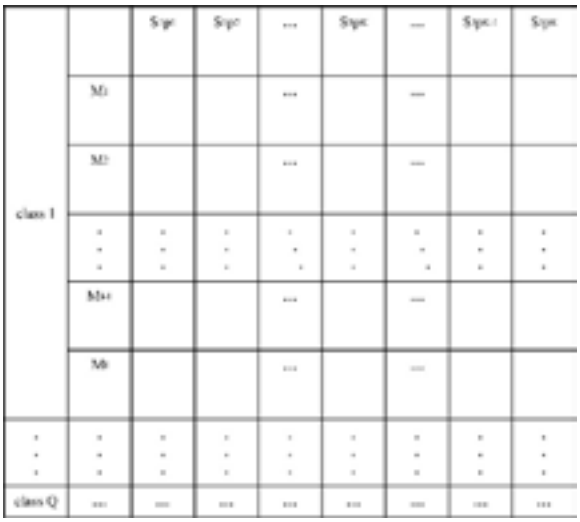


Figure 1. Unfolding data of the data collected by the electronic tongue

Subsequently, the Principal Component Analysis (PCA) algorithm was employed to facilitate feature extraction and dimensionality reduction. The objective was to decrease the number of predictor variables from N to P, where P < N, thereby concentrating the dataset's variability within a reduced set of variables. This approach enables the generation of two- or three-dimensional graphical representations that effectively capture the essential structure of the data.

Finally, classification is performed using the components obtained from PCA, with a data variability ratio of 0.9 as input features, across seven machine learning algorithms: Neural Network MLP, SVM, Logistic Regression, Random Forest, Gradient Boosting, Bagging, and K-Nearest Neighbors. Of the total data, only 10\% were used for analysis to reduce the time required for sample collection. This approach reduced measurement capture time, thereby decreasing response times. Of this proportion, 80\% was used to construct the training dataset, and the remaining 20\% was used to form the test dataset.

III. Results

Figure 2 shows the components 1 vs component 2 obtained from the PCA analysis. As it is possible to observe, the relevance of the type of water with respect to the grouping of classes is evident; in the space of the blue box, all the classes corresponding to pure water are grouped, in the green those of synthetic water, and in the red those of seawater.

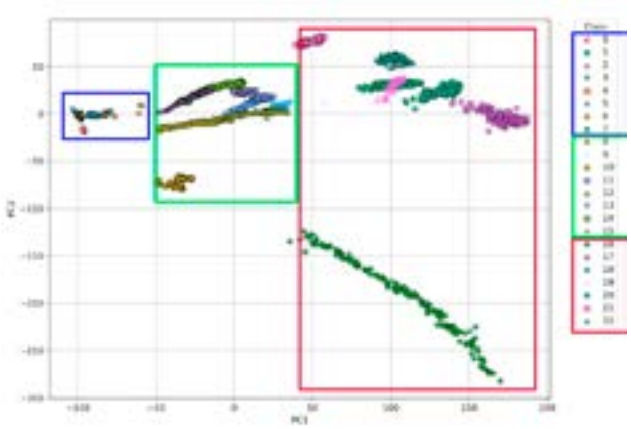


Figure 2. First two dimmensions of PCA [14].

Figure 3 provide a clearer illustration of how classes 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, and 7—each corresponding to pure water—are grouped in the PC1 vs. PC2 and PC2 vs. PC3 visualizations, respectively. In both cases, classes 0, 1, 6, and 7 form distinct clusters, clearly separated from the others, whereas classes 2, 3, 4, and 5 display more diffuse groupings.

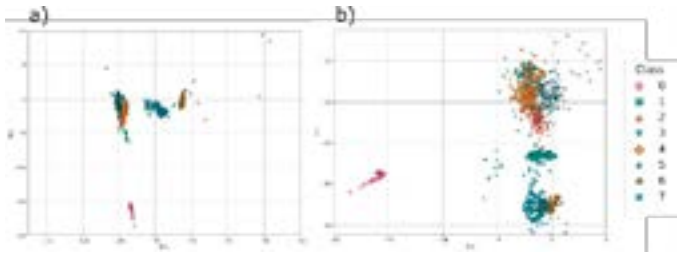


Figure 3. PCA approach on the first 8 classes corresponding to pure water with different contaminants: a) PC1 vs PC2 plot. b) PC2 vs PC3 plot [14].

Figure 4 shows that the models achieve a performance of almost 100\% success, except for SVM, which presents a success rate of 96\% in the AUC metric.

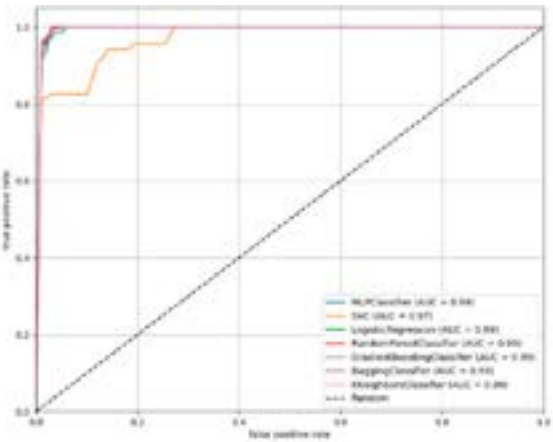


Figure 4. ROC curve for all the machine learning models

The confusion matrix is presented in Figure 5 for the Bagging model. As can be observed, most samples were correctly classified into their respective categories, demonstrating the model's ability to discriminate between clean water, water containing heavy metals, and water with microplastics. In the case of samples with heavy metals, a small number of classification errors were evident towards the pure water category, which can be explained by the similarity in certain response patterns. Finally, for samples containing microplastics, the model also demonstrated favorable performance with slight confusion regarding the heavy metal class, suggesting that both contaminants share some common characteristics in the measured signal.

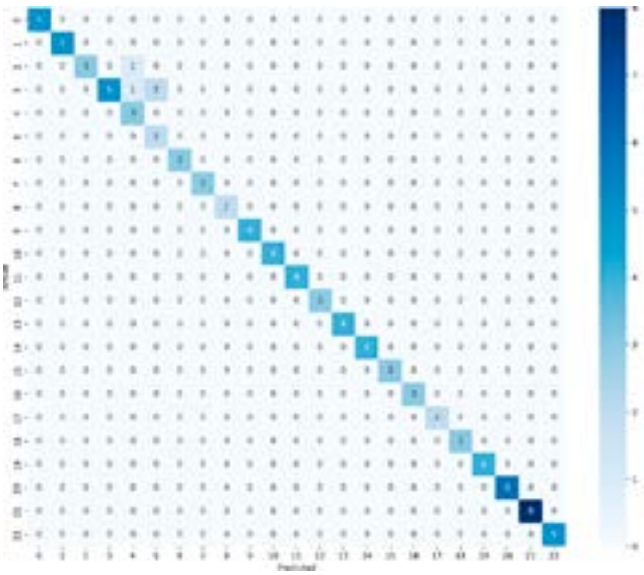


Figure 5. Confusion matrix BaggingClassifier model

Table II shows that the models with the best overall performance were Bagging, Gradient Boosting, and Random Forest, which obtained the highest values, above 0.92, in all metrics, demonstrating their effectiveness and robustness. In contrast, the SVM showed the lowest performance, particularly in Terms of Recall (0.37) and F1 score (0.4), indicating a limited ability to correctly identify positive cases. Although the MLP Classifier showed high accuracy, its low values in precision (0.86) and recall (0.85) place it below other, more consistent models

TABLE II. PERFORMANCE COMPARISON OF THE SEVEN CLASSIFIERS.

Model	Accuracy	Precision avg.	Recall avg.	F1 score avg.	AUC avg.	MCC avg.	Geometric mean avg.
MLP Classifier	0,99	0,86	0,85	0,85	0,99	0,85	0,86
SVM	0,97	0,48	0,37	0,4	0,97	0,41	0,41
Logistic Regression	0,99	0,96	0,89	0,91	0,99	0,92	0,92
Random Forest	0,99	0,96	0,93	0,94	0,99	0,94	0,96
Gradient Boosting	0,99	0,96	0,95	0,95	0,99	0,95	0,97
Bagging	0,99	0,98	0,94	0,96	0,99	0,96	0,97
K. Neighbors	0.99	0.94	0.94	0.93	0.99	0.93	0.96

IV. CONCLUSIONS

The measurement display method facilitated the separation among the three classes, as evidenced by their projection within the principal component analysis (PCA) subspace. Utilizing this representation, seven models were trained, most of which demonstrated strong performance. Notably, the Gradient Boosting and Bagging models achieved AUC-ROC scores of 0.99 and geometric mean values of 0.97. In contrast, the neural networks exhibited limited generalization, implying that a deeper architecture with additional layers may be required to effectively capture the underlying signal patterns.

ACKNOWLEDGMENT

We would like to express our sincere gratitude to Monica Sandoval for the suggestions in the experimental setup and data acquisition procedure. In the same way, we acknowledge the financial and institutional support received from Facultad de Ingeniería, UNAL trough the research project with HERMES code 64964, which made this research possible.

REFERENCES

[1] N. Oceanic and A. A. U. D. of Commerce, “What are microplastics?.”

[2] S. M. Praveena, S. N. M. Shaifuddin, and S. Akizuki, “Exploration of microplastics from personal care and cosmetic products and its estimated emissions to marine environment: An evidence from malaysia,” Marine Pollution Bulletin, vol. 136, pp. 135–140, 11 2018.

[3] I.E. Napper and R. C. Thompson, “Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions,” Marine Pollution Bulletin, vol. 112, pp. 39–45, 11 2016.

[4] Y. Shi, J. Chai, T. Xu, L. Ding, M. Huang, F. Gan, K. Pi, A. R. Gerson, and J. Yang, “Microplastics contamination associated with low-value domestic source organic solid waste: A review,” Science of The Total Environment, vol. 857, p. 159679, 1 2023.

[5] X. V. Chen and P. Bühlmann, “Ion-selective potentiometric sensors with silicone sensing membranes: A review,” Current Opinion in Electrochemistry, vol. 32, p. 100896, 4 2022.

[6] K. L. Law, “Plastics in the marine environment,” Annual Review of Marine Science, vol. 9, pp. 205–229, 2017.

[7] L. Tian, C. Jinjin, R. Ji, Y. Ma, and X. Yu, “Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate,” 2021.

[8] Z. Li, Y. Yang, X. Chen, Y. He, N. Bolan, J. Rinklebe, S. S. Lam, W. Peng, and C. Sonne, “A discussion of microplastics in soil and risks for ecosystems and food chains,” Chemosphere, vol. 313, p. 137637, 2 2023.S.

[9] H. T. Nair, R. Sivaraman, S. Ponnusamy, R. Palanisamy, and S. Perumal, "Microplastic particles as a vector for toxic-heavy metals: A study on selective aquatic and terrestrial ecosystems," Sustainable Chemistry One World, vol. 7, p. 100097, 9 2025.

[10] S. Wu, C. Cai, W. Wang, M. Bao, J. Huang, Y. Dai, Y. Wang, and S. Cheng, "The interaction of microplastic and heavy metal in bioretention cell: Contributions of water-soil-plant system," Environmental Pollution, vol. 361, p. 124853, 11 2024.

[11] L. O. Ajala, J. E. Wilson, M. Jiru, and M. O. Iwunze, "Perspective on health and ecological risk assessments of potentially toxic metal(loid)s using aquatic biodiversity as biomonitoring indicators," Toxicology Reports, vol. 15, p. 102086, 12 2025.

[12] D. Tibaduiza, M. Anaya, J. Gómez, J. Sarmiento, M. Perez, C. Lara, J. Ruiz, N. Osorio, K. Rodriguez, I. Hernandez, and C. Sanchez, "Electronic tongues and noses: A general overview," Biosensors, vol. 14, 2024.

[13] J. Sarmiento, K. Rodríguez, M. Perez, S. Acosta, D. Tibaduiza, M. Anaya. "Clasificación de microplásticos usando lenguas electrónicas," in Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2023, pp. 1–11, ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE FACULTADES DE INGENIERÍA ACOFI, 9 2023.

[14] L. Peña, J. Hoyos, J. Sarmiento, M. Sandoval, D. Tibaduiza. "Detection of microplastics and heavy metals using electronic tongues and machine learning" Sensors 2026, 26 (10).

Optimization of Starch Recovery from Potato Waste for Biodegradable Packaging Applications

1st Lady Valentina Olaya-Bocanegra
Faculty of Engineering
EAN University
Bogotá D.C., Colombia
Lolayab61588@universidadean.edu.co
0009-0006-4628-0708

2nd Karoll Stefany Gómez-Triana
Faculty of Engineering
EAN University
Bogotá D.C., Colombia
Kgomezt77901@universidadean.edu.co
0009-0002-7966-0695

3rd María José Arias-Coronel
Faculty of Engineering
EAN University
Bogotá D.C., Colombia
Mariasc47027@universidadean.edu.co
0009-0004-1629-4186

4th Diana Angélica Varela-Martínez
Dept. of Basic Sciences
EAN University
Bogotá D.C., Colombia
Davarela@universidadean.edu.co
0000-0003-1688-8983

Abstract*—The substitution of petroleum-derived plastics by biodegradable materials has become a priority within the food packaging industry, driven by regulatory mandates and the transition toward circular economy models. Starch-based materials are of particular interest due to their biodegradability, wide availability, and film-forming capacity. Potato agro-industrial waste represents a strategically relevant and underexploited source of recoverable starch whose valorization simultaneously reduces process waste streams and supplies raw material for sustainable packaging formulations. This study reports the optimization of starch extraction from potato processing residues using a Box-Behnken experimental design, evaluating the effects of extraction temperature, solid-to-liquid ratio, and citric acid concentration on extraction yield. Three temperature levels (20, 30, and 40 °C), three solid-to-liquid ratios (1:2, 1:3, and 1:4 w/v), and three citric acid concentrations (0, 3, and 6% v/v) were assessed across duplicate experimental runs. The highest average extraction yield (6.3%) was obtained under acidified conditions (3% citric acid treatment) at 40 °C and a 1:4 solid-liquid ratio, while the lowest yield (0.96%) was obtained without citric acid at 30 °C and a 1:2 solid-liquid ratio. The 6% citric acid treatment resulted in a moderate reduction in yield, consistent with acid-catalyzed partial hydrolysis of starch. These findings establish a basis for quantitative extraction within the framework of the PAPAPACK project biorefinery, providing scalable parametric conditions for the subsequent synthesis of biopolymers and the fabrication of biodegradable films.

Keywords—*Potato waste; starch extraction; biodegradable packaging; Box-Behnken design; circular economy; agro-industrial valorization*

I. Introduction

The intensive global use of synthetic plastics, predominantly derived from petrochemical feedstocks, has generated an environmental crisis of considerable magnitude. By 2015, cumulative global plastic production had reached approximately 8,300 million metric tonnes, of which only 9% had been recycled and 79% had accumulated in landfills or the natural environment [1]. Packaging represents the largest plastic end-use sector, accounting for approximately 36% of total demand [2]. Single-use plastic packaging, characterized by brief functional lifetimes and persistent post-consumer residuality, constitutes a major driver of ecosystem degradation and poses documented risks to human health through the release of chemical additives during degradation [3].

Bioplastics derived from renewable feedstocks have emerged as structurally viable alternatives, offering biodegradability profiles and reduced carbon footprints relative to conventional polymers [4]. Among the most thoroughly studied biopolymeric systems, starch-based materials occupy a privileged position by virtue of their natural abundance, low production cost, non-toxicity, and compatibility with established thermoplastic processing techniques [5]. Starch is a polysaccharide composed of amylose and amylopectin fractions whose relative proportions and molecular architectures govern the mechanical, barrier, and thermal properties of resulting films and composites [6]. When blended with hydrophobic biodegradable polyester such as polylactic acid (PLA) or polyhydroxyalkanoates (PHAs), starch contributes to enhanced biodegradation rates while partially offsetting material costs [15].

In Colombia, the food processing industry generates substantial volumes of starch-rich agricultural residues, particularly from potato (Solanum tuberosum) and plantain (Musa paradisiaca) processing operations. Potato processing for snack production consumes an estimated 2.0–2.5 kg of fresh potato per kilogram of final product [8], with up to 50–60% of input mass classified as process waste after peeling, trimming, and quality rejection. This residual fraction retains significant starch content but is systematically discarded without valorization. The strategic recovery of starch from these streams represents a circular economy opportunity of both industrial and scientific relevance [14].

The present study is framed within the PAPAPACK project (Agreement No. ATENEA-034-2024), a collaborative research initiative between Universidad EAN, Universidad de La Sabana, and Comestibles Ricos S.A. (Super Ricas), funded by the Agencia Distrital para la Educación Superior, la Ciencia y la Tecnología—ATENEA, under the Convocatoria ECOCAMBIO – Bogotá, Ejemplo Global de Sostenibilidad. The broader project targets the development of biodegradable packaging using starch extracted from Super Ricas' process residues as a primary raw material. The extraction optimization reported herein addresses the critical upstream stage of this biorefinery-oriented approach: maximizing starch recovery

yield under controlled operational conditions prior to biopolymer synthesis and film fabrication.

II. Methods

A. Experimental Design

A Box-Behnken response surface design was implemented to evaluate the simultaneous effects of three independent variables on starch extraction yield. The selected factors and their coded levels are summarized in Table Ia. The Box-Behnken design was selected for its efficiency in estimating second-order response surfaces with a reduced number of experimental runs and its avoidance of extreme corner combinations, which is particularly appropriate for processes involving interacting physicochemical variables [13]. Three treatment groups were defined based on citric acid concentration: S.A.C. (0%), A.C. 3%, and A.C. 6%. All experiments were performed in duplicate.

TABLE Ia

Box-Behnken Experimental Design: Factors and Levels

Factor	Levels
Temperature	20, 30, 40 °C
Solid-to-liquid ratio	1:2, 1:3, 1:4 (w/v)
Citric acid conc.	0% (S.A.C.), 3%, 6% (A.C.) (v/v)
Sample mass	~100 g (fresh residue)
Replicates	Duplicate per-run
Response variable	Extraction yield (%)

S.A.C.: without added citric acid; A.C.: citric acid.

B. Sample Preparation and Extraction Protocol

Potato residues representative of Super Ricas' processing operations was collected, homogenized, and classified by quality category prior to extraction trials. It underwent solid-liquid washing to remove surface impurities, followed by manual peeling to eliminate the cortical fraction. The peeled sample was ground to reduce particle size and gravimetrically dosed in 100 g portions. Subsequently, solid-liquid leaching was performed with citric acid at concentrations of 0%, 3%, and 6% for 2 hours, after which the suspension was subjected to primary filtration to separate the coarse fibrous fraction. The filtrate obtained was homogenized using a high-speed disperser with distilled water at temperatures of 20°C, 30°C, and 40°C, evaluating solid-to-liquid ratios of 1:2, 1:3, and 1:4. The resulting suspension was then subjected to secondary filtration. The clarified liquid phase was neutralized to pH 5 and centrifuged at 2500 rpm for 15 minutes to recover the settled starch. The resulting paste was dried at 45°C for 24 hours, re-milled for final particle size reduction, and the starch was stored and labeled for subsequent analysis.

C. Response Variable and Quality Control

Extraction yield (Y, %) was defined as the dry mass of recovered starch relative to the initial fresh sample mass: $Y\ (\%) = (m_{starch} / m_{sample}) \times 100$. All mass determinations were made on a calibrated analytical balance. Quality control measures included equipment calibration before each session, continuous temperature and pH monitoring, and systematic sample homogenization to minimize matrix-related variance.

D. Statistical Analysis

Descriptive statistics (mean and standard deviation) were calculated for each treatment group and individual replicate. Treatment-level differences in extraction yield were evaluated by comparative analysis across factorial combinations. Interpatch consistency was assessed by comparing paired original-duplicate values for each experimental run.

III. Results

A. Effect of Citric Acid Concentration on Extraction Yield

The three treatment groups produced distinct yield distributions and reproducibility profiles, as summarized in Table Ib. The trial conducted solely with water (S.A.C. 0%) yielded the lowest recovery, averaging 1.2 g/100 g and exhibiting significant variability between batches (0.9–1.5 g/100 g). This confirms that mechanical disruption alone is insufficient to consistently release starch granules from the cell tissue. In the absence of a chemical agent, the granules remain trapped within the cell wall matrix, restricting their transfer to the aqueous phase and leading to results that are difficult to reproduce. However, despite its low yield, this treatment can be advantageous in scenarios where preserving the native properties of starch, such as its crystallinity and gelatinization behavior, is a priority [10].

On the other hand, the treatment with 3% citric acid (A.C. 3%) achieved the highest average yield (5.4 g/100 g) under optimal conditions (40°C and a solid-to-liquid ratio of 1:4). However, it exhibited the greatest variability between batches (4.5–6.3 g/100 g), suggesting that, at this concentration, acid-induced cell wall disruption and the solubilization of interfering compounds such as proteins and pectin are highly dependent on operating conditions, resulting in an irregular release of granules [11]. In contrast, the 6% citric acid treatment (6% CA) showed an average yield of 3.4 g/100 g, but with the narrowest recorded range (3.4–3.5 g/100 g), reflecting better batch-to-batch reproducibility. This higher concentration appears to promote more uniform and controlled starch solubilization, likely through consistent esterification and partial depolymerization processes of the amylopectin chains, which stabilizes the extraction behavior between replicates, although it implies a lower overall granule recovery during centrifugal sedimentation [12].

TABLE Ib

Starch Extraction Yield Results by Treatment Group

Treatment	Yield range (g/100 g)	Mean yield (%)	Interbatch consistency
S.A.C. 0%	1.5–0.9	**1.2**	Lower
A.C. 3%	4.5–6.3	**5.4**[1]	High
A.C. 6%	3.4–3.5	**3.4**	Moderate

[1] *Optimal condition: 40°C, 1:4 solid-to-liquid ratio, 3% citric acid.*

Yield is expressed as dry starch mass per initial fresh sample mass (× 100).

B. Effects of Temperature and Solid-to-Liquid Ratio

Temperature exerted a consistent positive effect on extraction yield across all treatment groups. The 40 °C condition produced higher yields relative to the 20 and 30 °C trials in all three treatments, with the effect more pronounced in the acidified groups. At elevated temperatures, disruption of starch granule-cell wall associations is enhanced through partial solubilization of amorphous starch regions, facilitating diffusion of granules into the aqueous extraction medium [6]. Temperatures exceeding 40°C were deliberately excluded to prevent starch gelatinization, which would preclude sediment-based recovery.

The solid-to-liquid ratio demonstrated a non-linear effect on extraction yield, showing that system dilution plays a crucial role in process efficiency. The 1:4 ratio (highest dilution) yielded the highest recovery values in the 3% acetic acid (AC) treatment, under optimal conditions of 40°C. This suggests that higher dilution promotes the dispersion of starch granules and their transfer to the aqueous phase, provided it is combined with a moderate acid concentration that facilitates partial disruption of the cell matrix. In contrast, the treatment without citric acid (0% AC) showed the greatest yield variability across all solid-to-liquid ratios, indicating that without a chemical agent to promote cell wall disruption, extraction efficiency becomes highly sensitive to dilution conditions. On the other hand, the 1:2 ratio (lower dilution) consistently produced lower yields in all treatments, likely due to the increased viscosity of the suspension. This increase limits granule mobility and reduces the efficiency of mass transfer to the aqueous phase, restricting the effective release of starch during extraction.

IV. Discussion

The results obtained confirm that starch recovery from potato agro-industrial waste is technically feasible under accessible operating conditions. The combined optimization of temperature, solid-liquid ratio, and citric acid concentration showed measurable and interactive effects on the process yield and reproducibility. The maximum average yield achieved (5.4 g/100 g) under the optimal condition (40°C, solid-liquid ratio 1:4, 3% citric acid) is consistent with the expected residual starch content in potato by-products, which is clearly lower than that of fresh tubers (14–20% on a wet basis) due to starch losses during the industrial stages prior to waste generation [8].

The role of citric acid showed a concentration-dependent effect on both yield and reproducibility. At a concentration of 3%, the acid simultaneously maximized extraction efficiency and batch-to-batch consistency, positioning this treatment as the most suitable for scalable applications where both parameters are critical. In contrast, at 6%, the yield decreased (3.4 vs. 5.4 g/100 g), indicating that induced esterification and partial depolymerization of amylopectin chains outweigh the benefits of cell disruption, reducing granule recovery during centrifugal sedimentation. These findings are consistent with those reported by Shi et al. [11], who identified an optimal range of 2–5% citric acid for modifying starch without extensive degradation, and with Zargar et al. [12], who documented comparable reductions in acidified potato starch systems.

From a process design perspective, the combination of 40°C, a solid-to-liquid ratio of 1:4, and 3% citric acid constitutes the recommended reference condition for the pilot stage of the PAPAPACK project. This set of parameters can be implemented in semi-continuous settling systems with minimal infrastructure, aligning with the project's objective of developing a process transferable to the operational context of the food industry.

The reported yields (0.9–6.3 g/100 g fresh residue mass) reflect the overall efficiency of the extraction-sedimentation scheme applied to a heterogeneous matrix, rather than the total starch content. These values are expected to increase in optimized continuous systems that integrate intensive grinding, multi-stage countercurrent washing, and centrifugal separation, providing a conservative basis for intensification strategies. The recovered starch fractions will be used for the formulation of thermoplastic starch (TPS) in the later synthesis stages of PAPAPACK, where the reactive mixture with PLA and plasticizers under controlled extrusion will allow obtaining film precursors aimed at replacing the mono-oriented polypropylene secondary packaging currently used by Super Ricas.

V. Conclusions

This study demonstrates that starch recovery from potato agro-industrial waste is feasible under accessible operational conditions, and that extraction temperature, solid-to-liquid ratio, and citric acid concentration exert measurable interacting effects on yield and process reproducibility. The principal conclusions are:

(1) The non-acidified treatment (S.A.C. 0%) produced the lowest mean extraction yield (1.2 g/100 g) with the greatest interbatch variability (0.9–1.5 g/100 g), confirming that mechanical disruption alone is insufficient to consistently mobilize starch granules from the cellular matrix of this feedstock.

(2) The 3% citric acid treatment at 40°C and 1:4 solid-to-liquid ratio achieved the highest mean yield (5.4 g/100 g), representing the optimal extraction condition. However, it exhibited the greatest interbatch variability (4.5–6.3 g/100 g), indicating high sensitivity of extraction efficiency to operating conditions at this acid concentration.

(3) Citric acid at 6% concentration produced a moderate mean yield (3.4 g/100 g) with the narrowest yield range recorded (3.4–3.5 g/100 g), reflecting the best interbatch reproducibility among all treatments, attributable to consistent esterification and partial depolymerization of amylopectin chains.

(4) Temperature was the most influential individual factor, with 40°C producing consistently higher yields across all treatments, while solid-to-liquid ratio effects were more pronounced in acid-assisted systems.

These results constitute the validated extraction baseline for the PAPAPACK project's biorefinery development stages. Future work will address: (i) full response surface modeling with

expanded factor levels; (ii) structural characterization of extracted starch by FTIR, DSC, and X-ray diffraction as a function of extraction conditions; and (iii) integration of extraction parameters with biopolymer synthesis protocols for PLA-starch composite film formulation.

Acknowledgment

This work was conducted within the framework of the PAPAPACK project (Agreement No. ATENEA-034-2024), funded by the Agencia Distrital para la Educación Superior, la Ciencia y la Tecnología ATENEA through the Convocatoria ECOCAMBIO – Bogotá, Ejemplo Global de Sostenibilidad (Recursos Propios Distrito Economía Circular). The authors gratefully acknowledge the institutional support of Universidad EAN, Universidad de La Sabana, and Comestibles Ricos S.A. (Super Ricas).

References

[1] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made," Sci. Adv., vol. 3, no. 7, Art. e1700782, 2017. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

[2] PlasticsEurope, "Plastics – The Facts 2022," PlasticsEurope AISBL, Brussels, 2022. https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/

[3] J. N. Hahladakis, C. A. Velis, R. Weber, E. Iacovidou, and P. Purnell, "An overview of chemical additives presents in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling," J. Hazard. Mater., vol. 344, pp. 179–199, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014

[4] N. Peelman et al., "Application of bioplastics for food packaging," Trends Food Sci. Technol., vol. 32, no. 2, pp. 128–141, 2013. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.05.017

[5] L. Avérous, "Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: A review," J. Macromol. Sci. Polym. Rev., vol. 44, no. 3, pp. 231–274, 2004. https://doi.org/10.1081/MC-200029326

[6] M. A. Bertolini, Ed., Starches: Characterization, Properties, and Applications. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.

[7] P. Cinelli, I. Anguillesi, and A. Lazzeri, "Green synthesis of flexible polyurethane foams from liquefied lignin," Eur. Polym. J., vol. 49, no. 6, pp. 1174–1184, 2013. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.04.005

[8] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, "Evaluaciones Agropecuarias Municipales 2020," MADR, Bogotá D.C., Colombia, 2021. [Online]. Available: https://www.agronet.gov.co

[9] M. H. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, and L. A. Escaleira, "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry," Talanta, vol. 76, no. 5, pp. 965–977, 2008. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019

[10] J. Singh and N. Singh, "Studies on the morphological, thermal and rheological properties of starch separated from some Indian potato cultivars," Food Chem., vol. 75, no. 1, pp. 67–77, 2001. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00189-2

[11] R. Shi, Z. Zhang, Q. Liu, Y. Han, L. Zhang, D. Chen, and W. Tian, "Characterization of citric acid/glycerol co-plasticized thermoplastic starch prepared by melt blending," Carbohydr. Polym., vol. 69, no. 4, pp. 748–755, 2007. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.02.010

[12] M. Zargar, A. A. Khalil, Z. Ahmad, and A. Muhammad, "Physicochemical and functional properties of starch extracted from potato cultivar," Int. Food Res. J., vol. 23, no. 3, pp. 1108–1116, 2016.

[13] S. L. C. Ferreira et al., "Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods," Anal. Chim. Acta, vol. 597, no. 2, pp. 179–186, 2007. https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.07.011

[14] G. Chaffa et al., "Plastic film from potato peel starch and plantain fiber for sustainable food packaging applications," J. Polym. Environ., vol. 29, pp. 3420–3431, 2021. https://doi.org/10.1007/s10924-021-02110-5

[15] R. Mülhaupt, "Green polymer chemistry and bio-based plastics: dreams and reality," Macromol. Chem. Phys., vol. 214, no. 2, pp. 159–174, 2013. https://doi.org/10.1002/macp.201200439

FusaShop como estrategia de transformación digital y comercio electrónico territorial para la supervivencia de las MiPymes en Fusagasugá

Alba Yadira Nova Sierra
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Ubaté, Colombia
ayadiranova@ucundinamarca.edu.co

Jarvey Santiago Valbuena Garzon
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Ubaté, Colombia
jsantiagovalbuena@ucundinamarca.edu.co

Rafael Ortega Ortega
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Ubaté, Colombia
rortegao@ucundinamarca.edu.co

***Resumen*— ¿Puede una empresa desaparecer por no saber quiénes son sus propios clientes?**

En Fusagasugá, esta pregunta tiene respuesta. El 98% del tejido empresarial son micro, pequeñas y medianas empresas (MiPymes), la mayoría de las cuales comercializa sus productos únicamente a través de WhatsApp, Facebook e Instagram. Aunque estos canales permiten comunicarse con los clientes, no registran ni organizan la información de las ventas, lo que impide a los negocios conocer a sus compradores, anticipar su demanda o tomar decisiones con base en evidencia. Esta dependencia de canales informales se traduce directamente en una alta mortalidad empresarial; el 70% de estos negocios no supera los cinco años.

Ante este escenario, el presente proyecto derivado del macroproyecto "Estrategias de Transformación Digital para Potenciar la Comercialización, la Competitividad y la Expansión de Mercado en las MiPymes del Sector Comercio de Fusagasugá", aprobado en la X Convocatoria Interna 2025-2 de la Universidad de Cundinamarca; tiene como objetivo desarrollar FusaShop, una plataforma de comercio electrónico orientada a las MiPymes del sector comercio de Fusagasugá. La plataforma no solo habilita la venta en línea, sino que incorpora módulos de gestión de catálogo e inventario, procesamiento de pagos digitales mediante Nequi, Daviplata y PSE, seguimiento de pedidos en tiempo real, sistema de valoraciones y reseñas, programa de fidelización por puntos, y un panel de información de desempeño que transforma las transacciones del negocio en conocimiento útil para la toma de decisiones del comerciante.

La investigación combina encuestas estructuradas a comerciantes y consumidores con entrevistas en profundidad para identificar necesidades reales. El desarrollo de la plataforma sigue una metodología ágil (Scrum), por ciclos iterativos de cuatro semanas, con validación directa de los comerciantes en cada etapa. Los resultados del diagnóstico inicial revelan condiciones favorables: el 93,3% de los consumidores tiene experiencia comprando en línea; Nequi y Daviplata son los medios de pago preferidos por el 86,7% de los compradores, coincidiendo con lo que los negocios ya ofrecen; y el 100% de los comerciantes valoró positivamente las notificaciones de pedidos por WhatsApp. Estos hallazgos orientaron la definición de los 37 requerimientos funcionales que componen la plataforma.

Se espera que FusaShop amplíe el alcance de mercado de los negocios participantes, reduzca los tiempos de gestión de pedidos y mejore la satisfacción del cliente, indicadores que serán comparados antes y después de la implementación. El proyecto demuestra que digitalizar el comercio local no requiere grandes inversiones, sino soluciones diseñadas desde la realidad del territorio, configurándose como un modelo replicable para la transformación digital del comercio en municipios intermedios de Cundinamarca.

***Palabras Clave*—Comercio electrónico, MiPymes, transformación digital, competitividad.**

I. INTRODUCCIÓN

El tejido empresarial colombiano descansa estructuralmente sobre las micro, pequeñas y medianas empresas (MiPymes). Según la Cámara Colombiana de Comercio Electrónico [1], estas organizaciones representan cerca del 99 % de las empresas formales del país y generan el 79 % del empleo nacional, constituyendo el motor productivo real de la economía colombiana. No obstante, su supervivencia está condicionada por una fragilidad estructural que se expresa con particular nitidez en el municipio de Fusagasugá, Cundinamarca; con aproximadamente 2.662 empresas registradas [2], las MiPymes conforman el 98 % del tejido

empresarial local, pero el 70 % no logra superar los cinco años de operación, tasa que supera el promedio nacional documentado por Confecámaras [18]. Esta realidad sitúa la competitividad no como un objetivo de crecimiento deseable, sino como una condición de supervivencia urgente para el comercio local.

La causa fundamental de esta vulnerabilidad no es únicamente financiera. El diagnóstico propio del proyecto revela una dimensión informacional crítica y sistemáticamente ignorada: la dependencia absoluta de canales informales de venta; WhatsApp, Facebook e Instagram, como único puente entre el comerciante y el consumidor. Aunque estos canales facilitan la comunicación, no fueron diseñados para gestionar procesos transaccionales complejos ni para generar registros estructurados de datos comerciales. El resultado es lo que Marulanda, López y Mejía denominan ceguera de datos [3], la información de los clientes queda fragmentada en conversaciones dispersas y memorias individuales, sin posibilidad de ser capturada, procesada ni transformada en conocimiento estratégico. Las empresas no aprenden de sus propias ventas, no conocen en profundidad a sus compradores, no pueden proyectar su demanda futura y toman decisiones basadas en percepciones subjetivas en lugar de evidencia cuantitativa, lo que las condena a repetir errores y a desaprovechar oportunidades de mercado que sus propios datos podrían revelar.

Este escenario se agrava por una exigencia creciente del mercado contemporáneo. Los consumidores actuales demandan experiencias de compra coherentes y fluidas a través de múltiples canales: lo que Cartagena-Cardona denominan integración multicanal profesional [4]. Esta integración es imposible cuando los canales de venta son informales y desconectados entre sí; no solo se fragmenta la experiencia del cliente, sino que se pierden los datos que podrían transformarse en ventajas competitivas reales. El resultado práctico es que las MiPymes de Fusagasugá ceden su activo más valioso, los patrones de comportamiento de sus clientes; a plataformas externas como Meta o Google, que los monetizan sin retribuir ningún beneficio analítico al comerciante local. Frente a competidores que emplean algoritmos avanzados de recomendación y fijación de precios, las MiPymes locales operan con estrategias reactivas, respondiendo a la demanda en lugar de anticiparla, lo que las posiciona en una desventaja estructural de difícil reversión sin intervención técnica deliberada.

Esta brecha entre presencia digital pasiva y capacidad transaccional real ha sido documentada para el contexto colombiano por Gaviria Velásquez y Monsalve Restrepo [8] y, para el entorno cundinamarqués, por Pachón Ayala y Espitia Santana [11]. Ambos estudios coinciden en que muchas MiPymes han dado primeros pasos de digitalización mediante redes sociales, pero carecen de la capacidad de recibir pedidos, procesar pagos y analizar datos de forma estructurada. La diferencia entre tener presencia digital y contar con un verdadero modelo de comercio electrónico transaccional no es tecnológica, sino conceptual y metodológica: implica reconocer que cada interacción con un cliente es una fuente de datos que, correctamente gestionada, puede convertirse en inteligencia competitiva. El Foro Económico Mundial [27] advierte que la digitalización de los procesos comerciales de las pequeñas empresas es hoy una condición necesaria, no opcional para su supervivencia en mercados crecientemente sofisticados.

La dimensión económica del problema se hace aún más visible al observar la estructura del mercado local. Según datos de Confecámaras [18], Cundinamarca es uno de los departamentos con mayor actividad empresarial de Colombia, con 297.475 nuevas empresas constituidas en 2024. Sin embargo, la tasa de supervivencia de las personas naturales, categoría que incluye a la mayoría de las MiPymes de Fusagasugá, apenas alcanza el 30 % después de cinco años, frente al 44 % de las sociedades. Esta brecha de 14 puntos porcentuales no se explica exclusivamente por diferencias de capital inicial, sino por diferencias estructurales en la capacidad de gestión, sistematización de información y adaptación tecnológica: exactamente las dimensiones que una plataforma de comercio electrónico con analítica integrada puede fortalecer de forma directa. La investigación de Buitrago Domínguez [26] sobre la morbilidad empresarial en Fusagasugá confirma que las falencias en planeación estratégica, control interno y análisis de información son los factores que más inciden en la vulnerabilidad de las MiPymes locales, mucho antes que las condiciones de mercado externas.

La paradoja central que motiva este proyecto es que las MiPymes de Fusagasugá operan en plena era de datos, pero en una condición de invisibilidad informacional. Tienen clientes, realizan transacciones y acumulan experiencia de mercado, pero toda esa información se disuelve en conversaciones de WhatsApp, publicaciones de Instagram y memorias individuales que no pueden analizarse ni heredarse institucionalmente. Como señalan Dini, Glilgo y Patiño [19] para la CEPAL, las pequeñas empresas colombianas invierten menos del 10 % en digitalización, lo que no solo limita su productividad presente, sino que reduce su capacidad de aprendizaje organizacional a largo plazo. Esta ausencia de memoria empresarial, combinada con la falta de herramientas para capturar y procesar información comercial, genera un círculo vicioso en el que los negocios no pueden aprender de sus errores porque no los registran, y no pueden identificar sus oportunidades porque no miden sus resultados. FusaShop se propone precisamente como el instrumento que rompe ese círculo: convierte cada transacción en un dato, cada dato en conocimiento y cada conocimiento en una decisión comercial más fundamentada.

Frente a esta problemática, el presente artículo describe el diseño y desarrollo de FusaShop, una plataforma de comercio electrónico B2C adaptada a las condiciones específicas de las MiPymes de Fusagasugá. La propuesta no se limita a habilitar un canal de ventas digital: incorpora herramientas de analítica descriptiva para transformar los datos de transacciones en inteligencia de negocio, diseña su experiencia de usuario pensada en comerciantes con baja madurez digital e integra los medios de pago predominantes en el ecosistema financiero

colombiano. El proyecto se deriva del macroproyecto "Estrategias de Transformación Digital para Potenciar la Comercialización, la Competitividad y la Expansión de Mercado en las MiPymes del Sector Comercio de Fusagasugá", aprobado en la X Convocatoria Interna 2025-2 de la Universidad de Cundinamarca. El artículo se organiza en las secciones siguientes: marco referencial (estado del arte y marco teórico), marco metodológico, resultados, discusión y conclusiones.

II. MARCO REFERENCIAL

A. Estado del Arte

El comercio electrónico como estrategia de fortalecimiento para las MiPymes ha sido abordado desde perspectivas complementarias en distintos contextos geográficos y sectoriales. A nivel internacional, Cadillo Montesinos y Kauss Pérez [5] demostraron, en el sector retail peruano, que la implementación de una plataforma digital bajo buenas prácticas PMBOK incrementó las ventas en un 10 % durante el primer mes de operación, validando la relación directa entre comercio electrónico y competitividad empresarial. Su investigación destacó que la selección de la plataforma tecnológica adecuada, a través de un proceso comparativo riguroso, es tan determinante como la implementación misma, argumento que orienta la decisión del presente proyecto de desarrollar una solución propia en lugar de adoptar plataformas genéricas. En México, Moreno Reyes [6] evidenció que la adopción del e-commerce por parte de las MiPymes, acelerada exponencialmente por la pandemia de COVID-19, requiere guías procedimentales adaptadas al contexto de cada empresa; su hallazgo central es que la falta de orientación metodológica más que la tecnología en sí es el principal obstáculo para la adopción sostenible del comercio digital.

En América Latina, el contexto posterior a la pandemia ha reconfigurado el escenario del comercio electrónico de manera radical. Almidón Ortiz et al. [15] documentan que más del 57 % de las MiPymes latinoamericanas incorporaron estrategias digitales entre 2020 y 2023, logrando incrementos significativos en participación de mercado. Sin embargo, los mismos autores advierten que esta incorporación ha sido desigual: las empresas con mayor acceso a capital y conocimiento técnico lograron consolidar canales digitales propios, mientras que las de menor recursos como las MiPymes de municipios intermedios colombianos, adoptaron principalmente redes sociales como sustituto del e-commerce transaccional, reproduciendo la misma informalidad digital en un nuevo canal. Esta asimetría configura una nueva brecha dentro de la brecha: no entre quienes tienen o no acceso a internet, sino entre quienes pueden o no transformar su presencia digital en ventas reales y datos estructurados.

En Colombia, Misas Quiñonez, Silva Abarca y Ruiz Centeno [7] advierten que el crecimiento del comercio electrónico; del que Colombia fue el mayor exponente de expansión en América Latina durante 2020, no se traduce automáticamente en competitividad si las empresas permanecen en la informalidad digital: vender en línea sin formalización ni sistematización de datos reproduce las mismas limitaciones del comercio tradicional en un entorno digital. Gaviria Velásquez y Monsalve Restrepo [8] confirmaron, para el Valle de Aburrá, que muchas MiPymes han dado primeros pasos hacia la digitalización mediante redes sociales, pero carecen de capacidad transaccional real, lo que limita directamente su competitividad y expansión de mercado. Los autores concluyen que existe una brecha concreta entre tener presencia digital y contar con un verdadero modelo de comercio electrónico transaccional, brecha que este proyecto busca precisamente cerrar en el contexto de Fusagasugá. Corredor Franco [9] desarrolló una metodología de comercio electrónico asequible para Bogotá que incrementó la madurez digital de las MiPymes participantes en un 9 % (de 44 % a 53 %), con mejoras concretas en logística, marca y sistemas de pago, aportando evidencia de que intervenciones focalizadas y metodológicamente estructuradas generan impactos medibles en períodos cortos.

En el contexto cundinamarqués, Mogollón y Suárez [10] identificaron que las barreras para la digitalización en municipios intermedios no son únicamente técnicas: la resistencia al cambio y la falta de capacitación son obstáculos tan relevantes como la ausencia de infraestructura tecnológica, hallazgo que anticipa el resultado central del diagnóstico de este proyecto. Los autores también identificaron que el diseño de soluciones tecnológicas centradas en las necesidades reales de los usuarios, y no en supuestos tecnológicos, es la condición que determina la tasa de adopción efectiva, argumento que fundamenta el enfoque de investigación mixto del presente proyecto. Pachón Ayala y Espitia Santana [11] validaron la viabilidad técnica de plataformas de comercio electrónico orientadas a MiPymes de Soacha, con funcionalidades de catálogo digital, carrito de compras y gestión de pedidos bajo metodología XP, estableciendo un antecedente regional directo. Su alcance, sin embargo, se limitó a la región de Soacha sin profundizar en estrategias de expansión de mercado ni en indicadores de competitividad, aspectos que el presente proyecto busca precisamente fortalecer. El estudio de Romero Herrera et al. [12] sobre Fusagasugá confirma que WhatsApp concentra el 56,3 % de las ventas digitales locales, que el 37,5 % de los empresarios dispone de servicio de entrega propio y que la infraestructura logística básica ya existe en el municipio y puede articularse con un sistema digital. Este último hallazgo es estratégicamente relevante: FusaShop no necesita construir la logística desde cero, sino conectarse con una capacidad operativa local preexistente.

Una lectura transversal de la literatura revisada permite identificar tres patrones recurrentes que orientan el diseño de FusaShop. Primero, la digitalización sin formalización reproduce la informalidad en un entorno digital [7]: cualquier plataforma que se despliegue en Fusagasugá debe contemplar el alto porcentaje de empresas sin registro mercantil y diseñar

un flujo de incorporación que no excluya a los comerciantes informales. Segundo, la tecnología sin capacitación fracasa en municipios intermedios [10][17]: la plataforma más sofisticada es inútil si los comerciantes no saben usarla, lo que exige invertir tanto en diseño de usabilidad como en recursos de acompañamiento integrados en la propia plataforma. Tercero, las métricas de impacto deben medirse antes y después de la implementación [9]: la investigación de Corredor Franco en Bogotá es el único antecedente nacional que aplica un diseño pre-post para medir la variación en madurez digital, metodología que este proyecto replica mediante prueba t de Student para validar empíricamente el impacto de FusaShop sobre la competitividad de las MiPymes participantes.

B. Marco Teórico

La transformación digital constituye el marco conceptual que da sentido estratégico al proyecto. Calle Herencia [16] la define como el conjunto de elementos organizacionales orientados a trasladar procesos, productos y directrices a un ambiente virtual, incorporando modificaciones en destrezas, competencias, comportamiento y cultura empresarial. Para las MiPymes de Fusagasugá, el desarrollo de FusaShop no puede concebirse como el simple despliegue de un canal de ventas: supone un cambio estructural en el modelo comercial que abarca desde la relación con el cliente hasta la gestión del inventario, el diseño de la oferta y la evaluación del desempeño. Sarmiento Suárez et al. [14] documentan que las MiPymes colombianas exhiben niveles bajos de madurez digital, especialmente en municipios no capitales, utilizando sobre todo redes sociales, banca digital y páginas web con propósitos comerciales básicos, con muy baja adopción de tecnologías avanzadas. Flórez Villota y Enríquez Flórez [17] refuerzan este argumento al demostrar que lo que verdaderamente marca un mayor nivel de competitividad no es tener herramientas digitales sino cómo se integran y emplean dentro del marco empresarial. Ambos estudios coinciden en que la resistencia al cambio y la falta de capacitación apropiada son las grandes limitantes del progreso, obstáculos que el diseño de FusaShop debe anticipar y mitigar desde su arquitectura de usuario.

El comercio electrónico en su modelo B2C (Business to Consumer) es la expresión operativa más concreta de esa transformación. Santamaría-Mendoza et al. [23] lo definen como el modo de intercambio que elimina barreras temporales y geográficas, posibilitando un flujo continuo de actividad económica. Su distinción respecto a la presencia en redes sociales es fundamental: el e-commerce conlleva un sistema organizado con gestión de pedidos, pasarela de pago, seguimiento de entregas, catálogo estructurado y analítica de comportamiento del consumidor, capacidades que las redes sociales no ofrecen de forma integrada ni bajo control del comerciante. Este ecosistema multidimensional debe analizarse simultáneamente desde la perspectiva económica; que crea nuevas dinámicas de oferta y demanda, desde el marketing que permite interacciones personalizadas con los clientes, desde la logística que requiere administración eficaz de las entregas e inventarios y desde lo sociocultural que cambia las costumbres de consumo. Almidón Ortiz et al. [15] documentan que el 45 % de las pymes colombianas aumentaron sus ventas entre 2021 y 2023 gracias a la adopción del marketing digital, confirmando la pertinencia de la intervención y su potencial de impacto directo sobre la competitividad empresarial.

La competitividad empresarial en la era digital ha dejado de ser una opción estratégica para convertirse en una condición de supervivencia. Almidón Ortiz et al. [15] documentan que las circunstancias del mercado actual requieren que las MiPymes implementen modelos de negocio innovadores basados en tecnologías digitales para optimizar su posición y establecer vínculos continuos y personalizados con sus clientes. Una MiPyme que no tiene presencia digital efectiva no solo pierde clientes potenciales, sino que cede terreno frente a competidores con mayor madurez tecnológica, independientemente de la calidad de sus productos. El marketing digital, entendido como el conjunto de tácticas orientadas a crear visibilidad, captar clientes y mantenerlos fieles mediante medios digitales, se guía en este proyecto por el modelo de las 4F del comercio electrónico feedback, fidelización, focalización y flexibilidad, que estructura el diseño de los módulos de comunicación, valoraciones y fidelización de FusaShop. Esta perspectiva es especialmente relevante para Fusagasugá, donde la baja madurez digital no refleja falta de voluntad comercial, sino la ausencia histórica de herramientas diseñadas desde y para la realidad de los municipios intermedios colombianos.

III. MARCO METODOLÓGICO

El proyecto combina dos metodologías; una investigativa de enfoque mixto para el diagnóstico del estado de digitalización, y la metodología ágil Scrum para el desarrollo del software. El diseño investigativo es no experimental con corte transversal.

A. Metodología de investigación

La población objetivo son las MiPymes del sector comercio y servicios de Fusagasugá; de las aproximadamente 3.300 empresas registradas, se determinó una muestra de 50 empresarios mediante muestreo probabilístico aleatorio simple (nivel de confianza 95%). Se realizaron también entrevistas semiestructuradas a 10 empresarios para profundizar en los hallazgos cuantitativos. Las variables de estudio son:

- *Variable independiente*: implementación de Fusa Shop, operacionalizada en funcionalidad técnica, usabilidad y accesibilidad.
- *Variables dependientes*: competitividad comercial, medida mediante indicadores de ampliación de mercado, eficiencia operativa y satisfacción del cliente. El análisis cuantitativo empleo Excel; el análisis cualitativo utilizo Power Bi.

B. Metodología Scrum: Roles y Planificación

El desarrollo adopta Scrum como marco de gestión ágil, justificado por la naturaleza iterativa de los requerimientos y la necesidad de validar funcionalidades con usuarios reales en ciclos cortos [13]. La siguiente tabla resume los roles definidos para el equipo:

TABLA 1. ROLES DEL EQUIPO SCRUM

Rol	Responsable	Función principal
Scrum Master	Ingeniero Rafael Ortega Ortega	Facilitar ceremonias, eliminar impedimentos
Product Owner	Carlos Arturo Narváez Benavides	Priorizar el producto backlog
Developer Team	Alba Yadira Nova Sierra/Jarvey Santiago Valbuena Garzón	Diseño, desarrollo, pruebas e integración

Fuente: Autores,2026

El product backlog comprende 20 historias de usuario y 37 requerimientos funcionales distribuidos en seis Sprints de cuatro semanas, con 133 puntos de historia en total:

TABLA 2. PLANIFICACIÓN DE SPRINTS Y MÓDULOS FUNCIONALES

Sprint	Módulo	Entregables	Velocidad
SPR 1	Autenticación y perfiles	JWT, roles (consumidor, comerciante, analista), recuperación de contraseña	14pts
SRP 2	Catálogo e inventario	Publicación de productos, buscador, filtros, alertas de stock	21pts
SRP 3	Transacciones y logística	Carrito de compras, PSE/ Nequi/ Daviplata/ tarjetas, seguimiento en tiempo real	26pts
SRP 4	Analítica y administración	Dashboard de métricas, panel del comerciante, gestión de usuarios	21pts
SRP 5	Comunicación y valoraciones	Chat directo, reseñas verificadas, notificaciones configurables, FAQ	26pts
SRP 6	Fidelización e impacto	Programa de puntos, cupones de descuento, módulo de evaluación de impacto	26pts

Fuente: Autores, 2026

C. Arquitectura Modular

FusaShop se estructura en seis módulos que responden directamente a los requerimientos del diagnóstico:

- Autenticación y perfiles
- Catalogo e inventario
- Transacciones y logística
- Analítica y administración
- Comunicación y valoraciones
- Fidelización e impacto

La plataforma completa tres perfiles de usuario:

- Consumidor
- Comerciante
- Analista de datos

Los criterios de terminación exigen cobertura mínima del 80% en pruebas unitarias, cumplimiento de WCAG 2.2 nivel AA y ausencia de errores críticos Severity 1 o mayores Severity 2.

D. Stack Tecnológico

La selección tecnológica priorizó madurez, compatibilidad con el ecosistema de pagos colombianos y alineación con las competencias del equipo

TABLA 3. STACK TECNOLÓGICO DE FUSASHOP

Componente	Tecnología o Herramienta	Justificación
Backend	Laravel 12, PHP 8.2 -Arquitectura Restful con JWT	Madurez, amplia adopción en Colombia
Base de datos	MySQL 8.0- Motor relacional con soporte ACID	Integridad transaccional garantizada

Frontend	Vue.js con Tailwind CSS_ interfaz responsiva	Optimizada para dispositivos móviles
Pasarela de pagos	PayU (PSE/tarjetas PCI-DSS)	Alineada con preferencias locales (86,7%)
Notificaciones	Firebase Cloud Messaging, Nodemailer	Push y correo en cada cambio de estado
Mensajería	Laravel Echo Pusher (WebScockets)	Chat en tiempo real comerciante-consumidor
Despliegue	Docker Compose en servidor Linux	Entorno dev, staging y producción
Control versiones	Git y GitHub (ramas por sprint)	Revisión de pares antes del despliegue

Fuente: Autores, 2026.

IV. RESULTADOS

En la primera fase diagnostica se encontraron 81 negocios del municipio y 100 consumidores del sector. El 75% de los negocios pertenece al sector de alimentos y bebidas, el 37,5% lleva menos de un año operando y solo el 37,5% cuenta con registro mercantil activo.

TABLA 4. SÍNTESIS DE INDICADORES DIAGNÓSTICOS ENCUESTAS A EMPRESARIOS

Indicador	Resultado	Implicación para FusaShop
Presencia en internet	62,5%	Ninguno con tienda en línea propia
Acepta pagos digitales	100%	Elimina barrera de adopción
Lleva control formal de inventario	25%	Módulo de inventario es crítico
Emite facturación electrónica	12,5%	Brecha de formalización significativa
Tiene registro mercantil vigente	37,5%	Flujo de incorporación significativa
Nunca ha vendido por internet	62,5%	Usabilidad es prioridad de diseño
Valora notificaciones WhatsApp como fundamentales	62,5%	Requerimiento no funcional de alta prioridad

Fuente: Autores, 2026. Elaboración propia con base en encuestas propias

A. Nivel de Madurez Digital Percibido

El análisis de Power BI aplicado sobre las encuestas a empresarios reveló que la mayoría de los negocios se ubica en las categorías más bajas de madurez digital. Como se observa en la Figura 1, el 55,56% de los encuestados se autocalifica en un nivel básico, seguido del 25,93% en nivel intermedio, el 12,35% en nivel inicial y únicamente el 6,17% en nivel avanzado. Esta distribución evidencia que más del 80% del tejido empresarial encuestado opera con capacidades digitales mínimas, lo que justifica el diseño de una plataforma de alta usabilidad con proceso de incorporación guiado, antes que una solución tecnológicamente sofisticada que los comerciantes no podrían adoptar de forma autónoma [18].

Figura 1. Nivel percibido de madurez digital de la empresa



Fuente: Análisis Power BI sobre encuestas a empresarios, 2026

B. Principales Barreras para la Transformación Digital

La segunda dimensión analizada en Power BI corresponde a las barreras percibidas para iniciar o profundizar la transformación digital. La Figura 2 muestra que la falta de conocimiento técnico es la barrera más señalada (n-31), superando ampliamente a los costos de implementación (n-22), la baja digitalización de clientes (n-15) y la resistencia al cambio (n-12). Este hallazgo es coherente con lo reportado por Mogollón y Suárez [10] para municipios cundinamarqueses y por Flórez Villota y Enrique Flórez [21] para municipios intermedios del suroccidente colombiano, quienes identificaron la capacitación

como obstáculo tan relevante como la infraestructura. Para FusaShop, este resultado tiene una implicación directa: el diseño UX/UI debe priorizar la intituividad sobre la funcionalidad avanzada, y la incorporación de comerciantes debe contemplar tutoriales integrados y un centro de ayuda con preguntas frecuentes (HU015).

Figura 2. Principal barrera percibida para la transformación digital



Fuente: Análisis Power BI sobre encuestas a empresarios, 2026.

C. Medios de Pago y Hábitos de Consumidores

El 100% de los negocios encuestados acepta alguna forma de pago digital, siendo Nequi y Daviplata los más extendidos. Este hallazgo elimina una barrera crítica de adopción. La encuesta a consumidores confirmo que el 86,7% prefiere Nequi y Daviplata, coincidiendo exactamente con la oferta de los comerciantes. El nivel de comodidad promedio con plataformas digitales fue de M= 3,73/5, con el 60% ubicado en puntuaciones de 4 o 5. Estos resultados indican que la barrera para adoptar una plataforma local no es tecnológica sino de confianza, aspecto que FusaShop aborda mediante reseñas verificadas, seguimiento de pedidos en tiempo real y pasarelas con certificación PCI-DSS.

Los hallazgos diagnósticos son coherentes con la literatura revisada. La distribución de madurez (55,56% básico) supera en severidad lo reportado por Sarmiento Suárez [18] para el promedio nacional de MiPymes colombianas, confirmando que Fusagasugá representa un caso de rezago digital territorial que requiere intervención especifica. La preponderancia de la falta de conocimiento técnico como barrera principal (Figura 2) contrasta con estudios en entornos urbanos mayores, donde los costos suelen ser el obstáculo primario [9], lo que sugiere que las estrategias de acompañamiento y capacitación son igual de importantes que la plataforma en sí misma.

La coincidencia entre los medios de pago preferidos por consumidores y los ofrecidos por comerciantes (Nequi/Daviplata, 86% en ambos grupos) es un factor diferenciador respecto a implementaciones en otros contextos latinoamericanos [5][6], ya que elimina la fricción de adopción más común. La baja formalización empresarial (37,5% con registro mercantil) confirma lo advertido por Misas Quiñonez [7] sobre la informalidad digital como barrera estructural.

FusaShop se diferencia de soluciones previas como la de Pachón y Marroquín [11] en la incorporación de un módulo de analítica descriptiva y un componente de evaluación de impacto orientado a la variable de competitividad esta dimensión conecta el desarrollo tecnólogico con la validación empírica de la hipótesis central del proyecto.

V. CONCLUSIÓN

El diagnóstico realizado, apoyado en análisis de Power BI sobre 81 encuestados, estableció que el 55,56% de los empresarios de Fusagasugá se encuentra en nivel básico de madurez digital y que la principal barrera para la transformación digital es la falta de conocimiento técnico, no los costos. Estas dos conclusiones tienen implicaciones directas sobre el diseño de FusaShop; la interfaz debe ser intuitiva, con procesos de incorporación guiado, tutoriales integrados y módulo de soporte, antes que incorporar funcionalidades avanzadas que los usuarios no podrán aprovechar en las etapas iniciales.

La arquitectura de seis módulos sobre un stock de código abierto, con integración de pasarelas de pago del ecosistema financiero colombiano, responde a los requerimientos del diagnóstico y es técnicamente viable en el contexto académico del proyecto. Al cierre de la presente etapa, el proyecto se encuentra en fase de prototipado en Figma con mockups de alta fidelidad validados.

Como trabajo futuro se contempla la validación estadística del impacto mediante prueba t de Studio antes y después de la implementación, el análisis de métricas de competitividad por segmento y la generalización del modelo a otros municipios intermedios de Cundinamarca.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se deriva del macroproyecto “Estrategias de Transformación Digital para Potenciar la Comercialización, la Competitividad y la Expansión de Mercado de la MiPymes del Sector Comercio de Fusagasugá, aprobado en la X Convocatoria Interna 2025-2 de la Universidad de Cundinamarca. Los autores agradecen al director del proyecto, Ingeniero Rafael Ortega Ortega y el Docente Carlos Arturo Narváez Benavides.

VII. REFERENCIAS

[1] Cámara Colombiana de Comercio Electrónico (CCCE), "Estadísticas del e-commerce en Colombia: Informe anual 2023," CCCE, Bogotá, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.ccce.org.co

[2] eInforma, "Directorio de empresas en Colombia," [En línea]. Disponible en: https://directorioempresas.einforma.co/localidad/fusagasuga/

[3] C. E. Marulanda Echeverri, M. López Trujillo y M. Mejía Giraldo, "Análisis de la gestión del conocimiento en Pymes de Colombia," Gerencia Tecnológica Informática, vol. 12, núm. 33, pp. 33-43, 2013.

[4] M. Cartagena-Cardona, J. Grisales-Mora y C. Moreno-Mojica, Estrategias de omnicanalidad para el fortalecimiento de la relación con el cliente en las MiPymes. Bogotá: Fund. Universitaria del Área Andina, 2023.

[5] J. Cadillo Montesinos y A. Kauss Pérez, "Diseño e implementación de una solución de comercio electrónico en pymes del sector retail en Perú," trabajo de investigación, Universidad de Lima, 2018.

[6] A. Moreno Reyes, "Comercio electrónico y su adopción por parte de las MiPymes en México," trabajo de titulación, UNAM, Ciudad de México, 2022.

[7] A. Misas Quiñonez, J. Silva Abarca y M. Ruiz Centeno, "Mecanismos del comercio electrónico frente a la informalidad digital en MiPymes," Información Tecnológica, vol. 32, núm. 5, pp. 205-218, 2021. https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000500205

[8] D. Gaviria Velásquez y J. Monsalve Restrepo, "Implementación del comercio electrónico en MiPymes del sector alimentos en el Valle de Aburrá," Revista CEA, vol. 7, núm. 14, e1645, 2021. https://doi.org/10.22430/24223182.1645

[9] J. Corredor Franco, "Metodología para un modelo estratégico de comercio electrónico asequible para MiPymes en Bogotá," Hojas y Hablas, núm. 27, pp. 1-18, 2024. https://doi.org/10.29151/hojasyhablas.n27a1

[10] W. Mogollón y D. Suárez, "Red de conectividad digital para las MiPymes de Ubaté," trabajo de grado, Universidad de Cundinamarca, 2025.

[11] J. Pachón Ayala y R. Espitia Santana, "Aplicativo web para una red digital de conectividad dirigida a las MiPymes de Soacha," trabajo de grado, Universidad de Cundinamarca, 2023.

[12] E. Romero Herrera, M. A. Reina Pulido y F. Hernández Moreno, "Comercio electrónico y marketing digital en Fusagasugá," Documentos de Trabajo ECACEN, UNAD, 2025.

[13] K. Schwaber y J. Sutherland, La guía Scrum: Las reglas del juego. Scrum.org, 2020. Disponible en: https://scrumguides.org

[14] J. Sarmiento Suárez, M. Gutiérrez Navas y J. Ramírez Montañez, "Oportunidades y retos para la digitalización de las MiPymes en Colombia," Pensamiento y Gestión, núm. 56, pp. 1-28, 2024. https://doi.org/10.14482/pege.56.987.33

[15] C. A. Almidón Ortiz, M. Ñañez Silva, P. Chiok Pérez y J. Rojas Bujaico, "Evolución histórica del marketing digital y su impacto en las PYMEs en América Latina," Clío, vol. 5, núm. 10, pp. 1236-1267, 2025. https://doi.org/10.5281/zenodo.15345905

[16] C. A. Calle Herencia, "La transformación digital y su importancia en las pymes," Iberoamerican Business Journal, vol. 5, núm. 2, pp. 64-81, 2022. http://dx.doi.org/10.22451/5817.ibj2022.vol5.2.11059

[17] M. A. Flórez Villota y J. C. Enríquez Flórez, "Impacto del comercio electrónico en la competitividad de las MiPymes del suroccidente colombiano," Conocimiento Global, vol. 9, núm. 2, pp. 396-421, 2024. https://doi.org/10.70165/cglobal.v9i2.432

[18] Confecámaras, "Informe de dinámica empresarial en Colombia 2024," Bogotá, 2024. https://www.confecamaras.org.co

[19] M. Dini, S. Glilgo y A. Patiño, Transformación digital de las MiPymes. CEPAL, Santiago de Chile, 2021. https://repositorio.cepal.org

[20] OWASP Foundation, OWASP Top Ten 2021. https://owasp.org/Top10/

[21] ISO/IEC 27001:2022, Information security management systems Requirements. ISO, Ginebra, 2022.

[22] ISO/IEC 25010:2011, Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). ISO, Ginebra, 2011.

[23] A. Santamaría-Mendoza, C. Uzcátegui-Sánchez y P. Vélez-Yaguana, "Revisión de la literatura del comercio electrónico y sus implicaciones económicas en Ecuador," Revista Episteme & Praxis, vol. 2, núm. 1, pp. 37-49, 2024.

[24] Congreso de la República de Colombia, Ley 527 de 1999. Diario Oficial n.° 43.673, 1999.

[25] Congreso de la República de Colombia, Ley 1581 de 2012. Diario Oficial n.° 48.587, 2012.

[26] B. Buitrago Domínguez, "Caracterización de la morbilidad de las MiPymes de Fusagasugá," Universidad de Cundinamarca, 2018.

[27] Foro Económico Mundial, "The Future of Jobs Report 2023," World Economic Forum, Ginebra, 2023. https://www.weforum.org

Ecosysgame Wild Forest: Plataforma Didáctica para el Aprendizaje del Ecosistema Terrestre del Páramo Altoandino de la Cuenca Alta del Río Ubaté

Alba Yadira Nova Sierra
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
(Universidad de Cundinamarca)
Cundinamarca, Colombia
albanova@ucundinamarca.edu.co

Jarvey Santiago Valbuena Garzón
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
(Universidad de Cundinamarca)
Cundinamarca, Colombia
garzonzan@gmail.com

Rafael Ortega Ortega
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
(Universidad de Cundinamarca)
Cundinamarca, Colombia
rafaelortega@ucundinamarca.edu.co

RESUMEN

¿Puede un videojuego enseñarle a un niño a amar su ecosistema antes de que desaparezca? Esta pregunta guía el proyecto Ecosysgame Wild Forest, que nace ante una realidad preocupante: la cuenca alta del río Ubaté, ubicada en el municipio de Carmen de Carupa, Cundinamarca, Colombia, alberga más de 456 especies del Bosque Altoandino, incluyendo especies endémicas y migratorias como el tigrillo lanudo y el colibrí chillón. Sin embargo, este ecosistema enfrenta una acelerada degradación por deforestación, contaminación hídrica y expansión agropecuaria, mientras las nuevas generaciones crecen profundamente desconectadas de su entorno natural. Con solo el 27% de las instituciones educativas rurales del país integrando contenidos ambientales en sus planes de estudio (MEN, 2022), la educación ecológica contextualizada sigue siendo una deuda pendiente.

El objetivo principal del proyecto es desarrollar una plataforma educativa digital que permita a estudiantes de educación básica primaria de la provincia de Ubaté comprender la biodiversidad y el ecosistema terrestre de su región, promoviendo la conciencia ecológica y el sentido de pertenencia territorial a través de herramientas lúdicas e interactivas. Para su desarrollo se implementaron dos metodologías complementarias: la metodología XP, que organiza el proceso en fases iterativas con entregas funcionales y retroalimentación continua, y la metodología gamificada, que incorpora mecánicas de niveles, recompensas y narrativas inmersivas para transformar el aprendizaje ambiental en una experiencia motivadora.

Los resultados obtenidos hasta la fecha incluyen la consolidación de una base de datos sobre la biodiversidad terrestre del Bosque Altoandino de la cuenca, el diseño de personajes y escenarios 3D representativos de la región modelados en Blender e integrados en Godot Engine entre ellos la protagonista

IV. RESULTADOS

Los resultados parciales del proyecto se presentan en tres dimensiones fundamentales: investigación sobre biodiversidad, diseño pedagógico y desarrollo técnico.

A. Investigación sobre Biodiversidad

Se recopiló y organizó información sobre fauna y flora del Bosque Altoandino de la cuenca alta del río Ubaté. Las especies integradas al videojuego incluyen el Tigrillo Lanudo (Leopardus tigrinus) y el Colibrí Chillón, con presencia documentada en la cuenca, junto a flora representativa como sangreado, roble, sietecueros y bromelias. Esta base permite una conexión directa entre el contenido educativo y la realidad ecosistémica local.

La Tabla II se observa la cantidad de especies de fauna y flora registradas en la cuenca alta del río Ubaté.

Tipo de Organismo	N° de Especies Registradas	Ecosistema General
Aves	369	Cuenca Alta del Río Ubaté
Mamíferos	58	Cuenca Alta del Río Ubaté
Anfibios	17	Cuenca Alta del Río Ubaté
Reptiles	6	Cuenca Alta del Río Ubaté
Peces	6	Cuenca Alta del Río Ubaté
Plantas (Flora)	32	Cuenca Alta del Río Ubaté *(Dato bajo muestreo)*

TABLA II. ESPECIES REGISTRADAS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO UBATÉ

Lucía, el tigrillo lanudo y el colibrí chillón y la definición de lineamientos pedagógicos construidos con participación docente.

Se concluye que la integración de tecnologías digitales, diseño 3D y gamificación representa una estrategia viable e innovadora para fortalecer la educación ambiental en territorios rurales, demostrando que la tecnología, cuando se pone al servicio del territorio, puede ser una herramienta poderosa para formar ciudadanos conscientes desde la infancia.

PALABRAS CLAVE

Educación ambiental, biodiversidad, plataforma didáctica, gamificación

I. INTRODUCCIÓN

La cuenca alta del río Ubaté, ubicada en Carmen de Carupa, Cundinamarca, se sitúa entre los 2832 y 2882 m.s.n.m. dentro del Bosque Altoandino. Esta región alberga 456 especies de fauna distribuidas en 95 familias, junto con flora característica como sangregao, roble, sietecueros y diversas epífitas. Sin embargo, el 38 % de las cuencas colombianas presentan vulnerabilidad hídrica (IDEAM, 2023) y solo el 27 % de las instituciones educativas rurales integran componentes ambientales en sus planes de estudio (MEN, 2022) [1][2].

Ante esta brecha educativa, Ecosysgame Wild Forest propone una plataforma de videojuego que enseña la biodiversidad local a estudiantes de primaria mediante mecánicas de gamificación, desarrollada con Godot Engine y Blender, articulada con instituciones educativas de la provincia de Ubaté [3].



Fig. 1. Logo de Ecosysgame Wild Forest.

II. MARCO REFERENCIAL (ESTADO DEL ARTE)

El uso de videojuegos en educación ha pasado de ser entretenimiento a recurso pedagógico con alto potencial para la enseñanza de conceptos científicos y ambientales [4]. En las últimas décadas, diversas iniciativas a nivel internacional y nacional han explorado el potencial de las

B. Diseño Pedagógico

Los lineamientos pedagógicos se basan en la teoría de aprendizaje significativo (Ausubel, 2002) y en educación activa, donde el estudiante construye conocimiento a partir de experiencias interactivas [11]. Méndez y Boude (2023) confirmaron, en una revisión de más de 80 estudios (2000–2019), que los videojuegos en básica primaria mejoran la motivación, apoyan necesidades educativas especiales y fomentan conciencia crítica del entorno [4]. Los beneficios identificados son: estimulación cognitiva, aprendizaje activo, alfabetización digital y desarrollo de habilidades sociales.

C. Desarrollo Técnico

Se elaboraron personajes y escenarios en Blender y Godot Engine: (1) personaje principal 'Lucía', exploradora del bosque modelada en 3D; (2) Tigrillo Lanudo en 3D; (3) Colibrí Chillón en diseño low-poly; (4) escenarios del Bosque Altoandino con vegetación nativa. Estos avances confirman la factibilidad técnica del proyecto con herramientas de código abierto y sientan la base para las pruebas piloto en instituciones educativas de la provincia.

D. Visualización de Elementos Desarrollados



Fig. 2. Personaje principal 'Lucía'.



tecnologías digitales para la educación ambiental, aunque presentan limitaciones significativas en cuanto a contextualización territorial y actualización de datos científicos.

A. Contexto Internacional

A nivel internacional, Alba: A Wildlife Adventure (Ustwo Games) representa un ejemplo destacado en la integración de la narrativa ambiental dentro de un entorno lúdico. Este juego sensibiliza frente a la pérdida de biodiversidad global pero no aborda ecosistemas locales concretos, lo que dificulta su adaptación a realidades territoriales específicas [5]. Minecraft Education Edition ha consolidado un modelo de aprendizaje activo colaborativo, aunque requiere mediación docente sólida para enfocarse en educación ambiental y se trata de una herramienta generalista que no profundiza en ecosistemas particulares [6]. Por su parte, ABCya fomenta habilidades básicas en primera infancia sin profundizar en comprensión de ecosistemas complejos, ubicándose más como un complemento que como un modelo pedagógico integral [7].

B. Contexto Nacional

En Colombia destacan iniciativas como el proyecto de la UNAD orientado a la enseñanza del reciclaje mediante videojuegos [8], la página web de la Universidad de la Costa para fomentar la cultura ecológica [9] y la estrategia Ecogamers de la Universidad de Antioquia, enfocada en el conocimiento y conservación de ecosistemas colombianos a través de simulaciones interactivas [10]. Estas propuestas reflejan una evolución hacia la apropiación tecnológica como medio de concienciación ambiental en niños y jóvenes. Sin embargo, comparten limitaciones como la baja contextualización territorial y la escasa actualización de información científica validada.

C. Vacíos Identificados

El análisis de estos antecedentes permite identificar tendencias y vacíos significativos en el campo de la educación ambiental digital: las propuestas existentes priorizan problemáticas generales (reciclaje, sostenibilidad, biodiversidad global); pocas se enfocan en ecosistemas locales concretos con datos científicamente validados. Se requiere una mayor articulación entre plataformas educativas y los contextos ambientales específicos de comunidades particulares. Ecosysgame Wild Forest se propone como una respuesta innovadora que articula las ventajas de los videojuegos con la necesidad de contextualización local, centrando su atención en el Bosque Altoandino de la cuenca Ubaté e integrando especies, problemáticas y dinámicas propias del territorio.

D. Comparación de Plataformas Educativas

La Tabla I compara las principales plataformas revisadas frente a Ecosysgame Wild Forest en criterios clave para la educación ambiental local.

Fig. 3. Tigrillo Lanudo (Leopardus tigrinus).



Fig. 4. Colibrí Chillón.



Fig. 5. Escenario del Bosque Altoandino.

V. CONCLUSIONES

La recopilación de información sobre el Bosque Altoandino de la cuenca alta del río Ubaté permitió establecer una base sólida de conocimiento que orienta el videojuego. Las especies identificadas: Tigrillo Lanudo, Colibrí Chillón y flora nativa fueron integradas como personajes y escenarios, logrando un vínculo real entre contenido ambiental y experiencia lúdica para estudiantes de primaria.

Los prototipos de Blender y Godot evidencian la factibilidad técnica de la propuesta con herramientas de código abierto. La tabla comparativa confirma que Ecosysgame Wild Forest es la única plataforma que combina ecosistema local, especie nativa, gamificación y software libre, cerrando la brecha identificada en el estado del arte. Las próximas fases incluirán pruebas piloto en instituciones educativas de la provincia de Ubaté para validar la acogida pedagógica de la plataforma.

Este proyecto contribuye a la formación de una generación consciente y comprometida con la preservación del medio ambiente, promoviendo el sentido de pertenencia territorial y la participación en la protección del entorno natural desde edades tempranas.

Criterio	Alba	Minecraft Edu	ABCya	Ecogamers	Ecosysgame
Ecosistema local	✗	Parcial	✗	Parcial	✓
Especie nativa	✗	✗	✗	✗	✓
Gamificación	✓	✓	Parcial	✓	✓
Código abierto	✗	✗	✗	N/D	✓
Nivel primaria	✓	✓	✓	✓	✓
Datos actualizados	✗	N/A	N/A	Parcial	✓

TABLA I. COMPARACIÓN DE PLATAFORMAS EDUCATIVAS DIGITALES CON ENFOQUE AMBIENTAL

III. MARCO METODOLÓGICO

El proyecto implementa cuatro metodologías complementarias que cubren la gestión ágil, el diseño pedagógico y el seguimiento del trabajo, garantizando un desarrollo integral y enfocado en resultados.

A. XP (Extreme Programming)

La programación extrema (XP) es una metodología ágil de gestión de proyectos que se centra en la velocidad y la simplicidad con ciclos de desarrollo cortos. Esta metodología se basa en 5 valores, 5 reglas y 12 prácticas de programación. En la primera fase se definen las necesidades esenciales del videojuego. Durante la segunda fase se desarrollan de manera iterativa los modelos 3D en Blender. En la tercera fase se implementan pequeños incrementos con pruebas automáticas y refactorización continua. En la última fase se lleva a cabo la implementación del videojuego en las instituciones educativas [10].

B. Gamificación

La metodología gamificada se entiende como el uso de mecánicas, estéticas y pensamiento lúdico propios de los juegos para transformar actividades rutinarias en experiencias motivadoras y significativas [9]. En Ecosysgame Wild Forest, la gamificación se integra como eje central del aprendizaje a través de mecánicas como niveles, recompensas y narrativas inmersivas que convierten al participante en explorador del bosque.

C. Kanban

Esta metodología está basada en la filosofía de mejora continua mediante un flujo constante de trabajo visualizado en tableros Kanban [10]. En el proyecto, cada integrante tiene una función específica: Santiago Valbuena se encarga del desarrollo técnico y Alba Nova de la investigación y documentación.

. REFERENCIAS

[1] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Biodiversidad y ecosistemas del Bosque Altoandino. Bogotá: MADS, 2020.

[2] CAR, Informe sobre la cuenca alta del río Ubaté. Corporación Autónoma Regional, s.f.

[3] Iberdrola, 'Importancia de la educación ambiental,' abril 2021. [Online]. Available: https://www.iberdrola.com

[4] M. Méndez y O. Boude, 'Uso de los videojuegos en básica primaria: una revisión sistémica,' Universidad de La Sabana, 2023.

[5] L. Torrejón, 'Alba: A Wildlife Adventure y su aporte a la educación ambiental,' Blog especializado en videojuegos, 2021.

[6] Gamin, 'Minecraft Education Edition como recurso educativo,' Blog educativo, 2021.

[7] ABCya, Juegos educativos para niños. [Online]. Available: https://www.abcya.com

[8] UdeA, 'Ecogamers: videojuegos para la conservación de ecosistemas,' Universidad de Antioquia, s.f.

[9] A. Briceño, 'La gamificación como estrategia educativa en contextos ambientales,' Revista Colombiana de Educación Ambiental, vol. 9, no. 2, pp. 101–118, 2021.

[10] C. Raeburn, 'Extreme Programming: fundamentos y aplicaciones educativas,' Revista de Ingeniería de Software, vol. 5, no. 1, pp. 33–49, 2024.

[11] D. Ausubel, Adquisición y retención del conocimiento: una perspectiva cognitiva. Paidós, 2002.

[12] WWF, Informe Planeta Vivo 2022. Fondo Mundial para la Naturaleza, 2022.

[13] IPBES, Evaluación global sobre biodiversidad y servicios ecosistémicos. Panel Intergubernamental de Biodiversidad, 2019.

[14] P. Blanco, 'Videojuegos y educación ambiental: estrategias innovadoras,' 2024. [Online]. Available: https://www.iberdrola.com

[15] Instituto Humboldt, 'Informe sobre pérdida de hábitats naturales en los Andes colombianos,' Bogotá: Instituto Humboldt, 2022.

[16] Ministerio de Educación Nacional (MEN), 'Reporte sobre educación ambiental en instituciones educativas rurales,' 2022.

[17] IDEAM, 'Informe sobre el estado de las cuencas en Colombia,' Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2023.

[18] PNUMA, 'Estado de las cuencas hidrográficas en el mundo,' Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2022.

[19] FAO, 'Cuencas hidrográficas en América Latina,' Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2021.

[20] Vaca Salinas, P., Rodríguez, L., & Méndez, F., 'Preservación de oferta hídrica del río Ubaté mediante procesos de reforestación en la vereda Sucunchoque,' Informe técnico, 2023.

Despliegue de modelos eficientes de deep learning en vehículos aéreos no tripulados para el monitoreo fenológico de cultivos florales

Daniel Betancur
Facultad de ingenierías
Universidad Católica de Oriente
Rionegro, Colombia
dbetancur@uco.edu.co

Cristian Quiroz
Estudiante de Ingenieria de Sistemas
Universidad Católica de Oriente
Rionegro, Colombia
cristian.quiroz6211@uco.net.co

Juan Garzón
Facultad de Ingenierías
Universidad Católica de Oriente
Rionegro, Colombia
fgarzon@uco.edu.co

Juan Ocampo
Departamento de Ingeniería
St. Marry's University
Texas, USA
jocampo@stmarytx.edu

***Abstract*— La clasificación automatizada del estado fenológico es un componente crítico para optimizar el momento de cosecha en la agricultura de precisión y el monitoreo autónomo de cultivos. Este estudio presenta un sistema de visión por computadora diseñado para identificar el estado de desarrollo de la flor Callistephus chinensis (variedad Bonita White) segmentado en tres etapas o clasificaciones clave (prefloración, floración media y floración máxima). En primera instancia, para la adquisición de datos, se implementó un diseño experimental longitudinal de medidas repetidas (split-plot) sobre seis camas de flores (unidades experimentales), evaluadas consecutivamente durante 11 días desde la aparición del botón color hasta el punto de corte. Como factor intraunidad, se capturaron imágenes aéreas a dos alturas distintas en cada jornada, permitiendo caracterizar la evolución temporal y evaluar el efecto de la altitud de captura sobre la estimación del estado fenológico. Como segundo paso se compararon arquitecturas convolucionales eficientes (EfficientNet-B0 y variantes de MobileNetV3), determinando que MobileNetV3-Small es el modelo más adecuado para la tarea, logrando una precisión (accuracy) del 91.38% y un F1-Score 90.20%, superando ligeramente a EfficientNet-B0. Además de su alta fiabilidad, la arquitectura demostró una viabilidad superior para inferencia en tiempo real, registrando un tiempo de procesamiento de 7.57 ms y un peso de almacenamiento de bajo. Estas métricas validan una solución altamente eficiente, ideal para su integración escalable en vehículos aéreos y plataformas de procesamiento de hardware restringido en condiciones de campo.**

Keywords*— *Redes neuronales convolucionales, Visión computacional, Agricultura de precisión, Vehículos aéreos no tripulados

I. INTRODUCCCIÓN

La fenología vegetal, entendida como el estudio de las fases recurrentes del desarrollo de las plantas constituye un componente esencial para la gestión agronómica moderna, ya que permite sincronizar decisiones productivas con el estado biológico real del cultivo. En sistemas florícolas comerciales, la determinación precisa del momento óptimo de cosecha es especialmente crítica, debido a su impacto directo sobre la calidad estética, uniformidad del producto, vida poscosecha y cumplimiento de estándares de exportación. En este contexto, el monitoreo fenológico automatizado se ha consolidado como una línea estratégica dentro de la agricultura de precisión, al ofrecer alternativas objetivas, escalables y basadas en datos frente a los métodos tradicionales de inspección manual [1], [2].

Convencionalmente, la evaluación del desarrollo floral se realiza mediante observación visual por personal experto, utilizando criterios subjetivos asociados al tamaño del botón, apertura de pétalos o coloración. Aunque estas prácticas continúan siendo ampliamente empleadas, presentan limitaciones importantes relacionadas con variabilidad entre evaluadores, altos costos laborales, baja repetibilidad y dificultades para monitoreo continuo en grandes áreas productivas. Estas restricciones son más relevantes en cultivos ornamentales de alta rotación, donde diferencias de uno o dos días en el punto de corte pueden generar pérdidas económicas considerables. Por ello, durante los últimos años se ha intensificado la adopción de tecnologías digitales para automatizar procesos de seguimiento fenológico mediante sensores remotos, imágenes RGB y algoritmos inteligentes [3].

El desarrollo reciente del aprendizaje profundo ha transformado significativamente la visión por computadora aplicada al sector agrícola. Las redes neuronales convolucionales (CNN) han demostrado resultados sobresalientes en tareas como clasificación de cultivos, detección de enfermedades, conteo de frutos, segmentación foliar y estimación de rendimiento[4], [5]. En particular, arquitecturas eficientes como EfficientNet y MobileNetV3 han adquirido gran relevancia debido a su equilibrio entre precisión predictiva, bajo número de parámetros y rapidez computacional. Estas características son fundamentales para despliegues en dispositivos embebidos, plataformas edge-AI o vehículos aéreos no tripulados (UAV), donde existen restricciones de memoria, energía y latencia [6].

En paralelo, el uso de UAV equipados con cámaras RGB de alta resolución ha abierto nuevas oportunidades para el monitoreo fenológico a escala de parcela y planta individual. A diferencia de imágenes satelitales, las plataformas aéreas de baja altitud permiten capturar detalles espaciales finos y generar series temporales de alta frecuencia, facilitando la detección de cambios morfológicos sutiles durante la floración. Estudios recientes han demostrado la utilidad de imágenes aéreas y cercanas para clasificar estados de madurez y desarrollo en cultivos hortícolas y frutales[7]. Asimismo, la integración de datos multitemporales provenientes de sensores ópticos y radar ha mostrado potencial para estimar fenología en cultivos extensivos con alta precisión [8].

No obstante, pese al crecimiento sostenido de esta línea de investigación, persisten vacíos relevantes. En primer lugar, gran parte de la literatura se concentra en cultivos alimentarios como trigo, arroz, maíz o frutas, mientras que los cultivos ornamentales comerciales continúan subrepresentados en estudios de inteligencia artificial aplicada. En segundo lugar, muchos trabajos priorizan métricas de exactitud sin considerar variables operativas esenciales como tiempo de inferencia, tamaño del modelo o viabilidad de implementación en hardware restringido. Finalmente, son escasos los estudios que incorporan diseños experimentales longitudinales con medidas repetidas para analizar simultáneamente la evolución temporal del cultivo y el efecto de condiciones de captura, como la altura de vuelo.

Estas limitaciones son especialmente significativas en especies ornamentales como *Callistephus chinensis*, cuya calidad comercial depende fuertemente del estado de apertura floral al momento del corte. La variedad Bonita White, utilizada en mercados de flor cortada, requiere ventanas de cosecha estrechas para maximizar aceptación comercial y desempeño poscosecha. Sin embargo, la clasificación manual de sus estados fenológicos continúa dependiendo de criterios visuales subjetivos y experiencia operativa, lo que dificulta estandarización y escalabilidad.

En respuesta a esta problemática, el presente estudio desarrolla un sistema de visión por computadora orientado a la clasificación automática de tres estados fenológicos clave de *Callistephus chinen*sis variedad Bonita White: prefloración, floración media y floración máxima. Para ello, se implementó un diseño experimental longitudinal con adquisición repetida de imágenes aéreas a dos alturas distintas y se comparó el desempeño de arquitecturas convolucionales eficientes, específicamente EfficientNet-B0 y variantes de MobileNetV3. El objetivo final es identificar una solución con alta precisión y factibilidad de inferencia en tiempo real, apta para su integración escalable en UAV y plataformas de cómputo restringido, contribuyendo al desarrollo de herramientas inteligentes para la floricultura de precisión.

II. METODOLOGÍA

La metodología propuesta integra principios de diseño experimental, adquisición sistemática de imágenes aéreas y entrenamiento supervisado de modelos de aprendizaje profundo. Debido a que el fenómeno biológico evoluciona en el tiempo y cada unidad experimental fue observada repetidamente bajo distintas condiciones de captura, se adoptó una estructura split-plot longitudinal, adecuada para estudios con factores difíciles de aleatorizar y medidas repetidas.

A. *Diseño experimental split-plot longitudinal*

El experimento se desarrolló sobre seis camas de cultivo de *Callistephus chinensis* variedad Bonita White, consideradas como unidades experimentales principales.

Se implementó un diseño split-plot porque coexistían dos tipos de factores experimentales:

1) Factores de parcela principal (whole-plot): Corresponden a factores cuya modificación implica mayor dificultad logística o física.

- Cama de flores (6 niveles)
- Día fenológico de evaluación (11 jornadas)

Cada cama fue seguida longitudinalmente desde la aparición del botón floral hasta el punto de corte comercial.

2) Factores de subparcela (subplot): Factores fáciles de variar dentro de cada unidad principal:

Altitud de captura del UAV (2 niveles)

- Alta
- Baja

Esto permitió obtener múltiples observaciones dentro de una misma cama y jornada.

En la TABLA I se presenta el resumen de la estructura experimental usada.

TABLA I. ESTRUCTURA EXPERIMENTAL

Factor	Tipo	Niveles
Cama floral	Whole-plot	6
Día de evaluación	Medida repetida	11
Altitud UAV	Subplot	2

El diseño split-plot fue seleccionado debido a que la cama floral no puede reasignarse aleatoriamente y el tiempo fenológico actúa como medida repetida natural. Este enfoque permite separar variabilidad biológica y variabilidad operacional, incrementando la validez experimental frente a un muestreo no estructurado.

B. *Adquisición y construcción del dataset*

Con base en la estructura experimental descrita, en cada jornada se realizaron vuelos RGB sobre las seis camas. Los videos fueron convertidos a imágenes mediante muestreo temporal uniforme.

El dataset final estuvo compuesto por 761 imágenes etiquetadas.

C. *Definición de clases fenológicas*

Para transformar el problema en clasificación supervisada, las observaciones se agruparon en tres estados fenológicos como se observa en la TABLA II.

TABLA II. ESTRUCTURA EXPERIMENTAL

Clase	Estado	Descripción
0	Prefloración	Predominio verde y botón visible
1	Floración intermedia	40–60% cobertura blanca
2	Floración máxima	80–90% cobertura blanca

D. *Partición experimental*

En datasets agrícolas longitudinales es común cometer errores metodológicos al dividir imágenes aleatoriamente, ya que registros de una misma cama pueden quedar simultáneamente en entrenamiento y prueba. Para evitar esta

sobreestimación artificial se utilizó la técnica StratifiedGroupKFold donde cada cama se mantuvo íntegramente dentro de un único subconjunto. Finalmente la distribución de los datos fue:

- Entrenamiento: 70%
- Validación: 15%
- Prueba: 15%

E. Modelos evaluados

Se seleccionaron arquitecturas eficientes orientadas a hardware embebido:

- EfficientNet-B0
- MobileNetV3-Small

Ambas inicializadas con pesos ImageNet y ajustadas por fine-tuning completo.

F. Entrenamiento y metricas utilizadas

Para el entrenamiento de los modelos se utilizó:

- Optimizador AdamW
- Scheduler Cosine Annealing
- Early stopping según F1-score de validación
- Data augmentation: rotación, volteo horizontal, jitter de color y escalamiento.

Las métricas de comparación usadas:

- Accuracy
- Precision macro
- Recall macro
- F1-score macro
- Latencia
- Tamaño del modelo

III. RESULTADOS

Los resultados experimentales permiten evaluar simultáneamente desempeño predictivo y factibilidad de despliegue edge. Se observa que MobileNetV3-Small ofrece el mejor compromiso entre exactitud y costo computacional.

A. Comparación global

En la TABLA III se presentan las métricas de cada uno de los modelos usados

TABLA III. ESTRUCTURA EXPERIMENTAL

Métrica	EfficientNet-B0	MobileNetV3-Small
Accuracy	90.52%	**91.38%**
F1-score	88.08%	**90.20%**
Precision	**92.67%**	91.45%
Recall	100%	100%
Latencia (ms)	42.78	**7.57**
Tamaño	56.5 MB	**14.9 MB**

B. Matriz de confusión MobileNet

En la se presenta la matriz de confusión del modelo MobilNet, donde se evidencia alta separabilidad entre estados extremos y errores concentrados únicamente entre clases contiguas.

TABLA IV. MATRIZ DE CONFUSIÓN MOBILENET

Real / Predicho	Clase 0	Clase 1	Clase 2
Clase 0	100%	0%	0%
Clase 1	0%	74%	26%
Clase 2	0%	0%	100%

Clase 0 – Prefloración: Fue identificada perfectamente. Esto sugiere que las características visuales tempranas son claramente distinguibles.

Clase 1 – Floración intermedia: Presentó la mayor dificultad, con 26% confundido como floración máxima. Esto es consistente con la transición gradual del cultivo.

Clase 2 – Floración máxima: Mostró excelente sensibilidad, indicando alta capacidad para detectar camas listas para cosecha.

C. Interpretación de resultados

MobileNetV3-Small obtuvo el mejor equilibrio entre desempeño predictivo y eficiencia computacional. Aunque EfficientNet-B0 posee mayor complejidad representacional, esta ventaja no se tradujo en mejor rendimiento para el tamaño y naturaleza del dataset utilizado.

Los resultados de la matriz de confución evidencian que la principal confusión ocurrió entre:

- Floración intermedia
- Floración máxima

Esto es consistente con la transición gradual natural del proceso biológico. La clase de prefloración fue separada casi perfectamente debido al fuerte contraste visual con las etapas avanzadas.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que modelos compactos pueden superar arquitecturas más pesadas cuando se trabaja con datasets especializados y recursos limitados. MobileNetV3-Small no solo alcanzó mayor exactitud, sino también una reducción drástica de latencia, factor esencial para aplicaciones embarcadas en UAV.

Desde la perspectiva operativa, una inferencia inferior a 10 ms permite procesamiento prácticamente en tiempo real, habilitando decisiones autónomas durante el vuelo. Esto abre posibilidades para sistemas de cosecha inteligente, rutas dinámicas de inspección y alertas tempranas sobre madurez del cultivo.

La principal limitación identificada corresponde a la ambigüedad entre estados fenológicos contiguos. Futuras investigaciones podrían abordar el problema mediante enfoques de regresión ordinal o modelos temporales que incorporen secuencia de crecimiento.

V. Conclusiones

Se presentó un sistema de clasificación fenológica automática para cultivos florales basado en imágenes UAV y modelos CNN eficientes. La metodología incorporó un diseño experimental robusto y una estrategia de partición que evita sobreestimación del desempeño.

Entre los modelos comparados, MobileNetV3-Small demostró ser la mejor alternativa, alcanzando 91.38% de exactitud con baja latencia y reducido tamaño de almacenamiento, lo que confirma su idoneidad para dispositivos edge.

El trabajo demuestra que la combinación de UAV, visión por computador e inteligencia artificial embebida constituye una solución viable para agricultura de precisión en cultivos ornamentales.

References

[1] N. Katal, M. Rzanny, P. Mäder, y J. Wäldchen, "Deep Learning in Plant Phenological Research: A Systematic Literature Review", *Front. Plant Sci.*, vol. 13, p. 805738, 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.805738.

[2] T. Hassan, R. Gulzar, M. Hamid, R. Ahmad, S. A. Waza, y A. A. Khuroo, "Plant Phenology Shifts under Climate Warming: A Systematic Review of Recent Scientific Literature", *Environ. Monit. Assess.*, vol. 196, p. 36, 2024, doi: 10.1007/s10661-023-12190-w.

[3] L. Rodrigues, S. A. Magalhães, D. Q. da Silva, F. N. dos Santos, y M. Cunha, "Computer Vision and Deep Learning as Tools for Leveraging Dynamic Phenological Classification in Vegetable Crops", *Agronomy*, vol. 13, núm. 2, p. 463, 2023, doi: 10.3390/agronomy13020463.

[4] A. L. Chandra, S. V. Desai, W. Guo, y V. N. Balasubramanian, "Computer Vision with Deep Learning for Plant Phenotyping in Agriculture: A Survey", *arXiv preprint arXiv:2006.06762*, 2020.

[5] S. Bhagat, M. Kokare, y V. Haswani, "A Review of Deep Learning Techniques Used in Agriculture", *Ecol. Inform.*, vol. 77, p. 102217, 2023, doi: 10.1016/j.ecoinf.2023.102217.

[6] A. Howard, M. Sandler, G. Chu, L.-C. Chen, y others, "Searching for MobileNetV3", *arXiv preprint arXiv:1905.02244*, 2019.

[7] A. Koirala, K. Walsh, Z. Wang, y C. McCarthy, "Strawberry Maturity Classification from UAV and Near-Ground Imaging Using Deep Learning", *Smart Agricultural Technology*, vol. 1, p. 100001, 2021, doi: 10.1016/j.atech.2021.100001.

[8] F. Lobert, J. Löw, M. Schwieder, y others, "A Deep Learning Approach for Deriving Winter Wheat Phenology from Optical and SAR Time Series at Field Level", *Remote Sens. Environ.*, vol. 298, p. 113800, 2023, doi: 10.1016/j.rse.2023.113800.

WEEF 2026
(IFEES & GEDC)

Engineering Education That Transforms

September 22 – 25, 2026
Cartagena de Indias, Colombia



RESEARCH ADVANCES

DESIGN, MANUFACTURING, AND INFRASTRUCTURE

Powered by

Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI

Diseño estructural y manufactura del fuselaje de un cohete sonda impulsado por un motor cohete clase K

Aderson David Cárdenas Nuñez
Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE)
Fuerza Aeroespacial Colombiana
Cali, Colombia
aderson.cardenas@fac.mil.co

Brayand Rogelio Díaz Sabogal
Comando Aéreo de Combate No.5
Fuerza Aeroespacial Colombiana
Rionegro, Colombia
brayand.diaz@fac.mil.co

Fernando Delgado Gómez
Escuela Militar de Aviación
Fuerza Aeroespacial Colombiana
Cali, Colombia
https://orcid.org/0000-0002-2467-3491

Edward Stiven Rodríguez Urete
Escuela Militar de Aviación
Fuerza Aeroespacial Colombiana
Cali, Colombia
https://orcid.org/0009-0003-9582-44

Resumen*—Esta investigación presenta los avances en el diseño estructural, la manufactura y el ensamblaje del fuselaje de un cohete sonda impulsado por un motor clase K, con capacidad estimada para alcanzar un apogeo entre 1,8 y 2 km. El proyecto integra un motor de propelente sólido tipo *Candy* desarrollado en 2024 y un diseño preliminar de cohete experimental concebido en 2021 para el transporte de una carga útil tipo CanSat. La metodología combina modelado 3D, análisis estructural y simulaciones mediante el Método de Elementos Finitos (FEM) para evaluar la interacción fluido-estructura, el comportamiento térmico y los esfuerzos axiales y de compresión generados durante el ascenso. Adicionalmente, se emplea software de código abierto para la simulación de vuelo y el dimensionamiento aerodinámico del fuselaje, la ojiva y las aletas. El proceso de manufactura incluye impresión 3D, mecanizado en fresadora y técnicas manuales especializadas, utilizando materiales poliméricos y compuestos reforzados con fibra de carbono, priorizando una adecuada relación resistencia–peso y precisión dimensional. Los resultados preliminares evidencian un comportamiento estructural estable, sin reducciones significativas en la rigidez ni en los factores de seguridad bajo condiciones críticas simuladas. Se concluye que la integración sistemática de análisis numérico y manufactura controlada constituye un enfoque robusto para el desarrollo seguro y eficiente de cohetes sonda académicos, fortaleciendo la validación experimental y la formación aplicada en ingeniería mecánica y aeroespacial.

Palabras clave—apogeo, cohetería experimental, diseño estructural, manufactura aditiva, elementos finitos

I. Introducción

La Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) ha lanzado dos satélites en los años 2018 (FACSAT I , lanzado desde la India) [1] y en el 2023 (FACSAT II "Chiribiquete") [2] incursionando así en la tecnología aeroespacial. Estos satélites ayudaron al cumplimiento de la misión de la FAC que incluye "el dominio del aire, del espacio y del ciberespacio, en defensa de la soberanía, la independencia, la integridad territorial, y el orden constitucional para contribuir a los fines del Estado" cumpliendo así con los lineamientos definidos en la" Estrategia para el desarrollo aéreo y espacial de la FAC" (EDAES 2042) [3] y en el documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), que define los criterios de desarrollo y capacidades aeroespaciales en Colombia [4]. Actualmente la FAC trabaja en el diseño, producción y lanzamiento de los satélites FACSAT III que se construirán 100% en Colombia [5]. La Escuela Militar de Aviación y sus programas académicos iniciaron el desarrollo de tecnología aeroespacial en el año 2019 con la producción de un combustible sólido para motores cohetes que se probó en un motor cohete impulsado por combustible Candy [6]. S En el 2019 se inició el desarrollo de cohetes sonda en la Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suarez". Los cohetes sonda se utilizan para fines científicos , tecnológicos y educativos siendo accesibles por su bajo costo. La NASA tiene más de 40 cohetes sonda a su servicio que alcanzan alturas (apogeos) suborbitales de entre 100 a 1400 km [7].En el año 2022 se realizó el lanzamiento del cohete FACSON 0 de la Fuerza Aérea Colombiana, en un aeródromo del municipio de Tuluá . Este cohete se diseñó y construyó para alcanzar 500 metros de apogeo [8]. Su construcción se realizó utilizando la manufactura aditiva, por medio de la técnica de modelado por deposición fundida de materiales que permite generar un sólido utilizando materiales poliméricos obtenidos de un filamento. El diseño, construcción y lanzamiento del FACSON 0 se logró con base en proyectos de grado realizados por estudiantes de ingeniería mecánica, apoyados por docentes investigadores del Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA). En los años 2024 y 2025 se diseñó y construyó el cohete FACSON 1 de mayores dimensiones que el cohete FACSON 0, que busca alcanzar un apogeo de 1800 a 2000 metros [9]. Este cohete incorpora materiales poliméricos en buena parte de sus elementos estructurales.

II. Materiales y Métodos

A. Diseño estructural

Para el diseño estructural se utilizó el software CAD Solidworks con el cual se dimensionaron los componentes principales del fuselaje del cohete y también se definieron las dimensiones del motor cohete clase K que impulsará al cohete.

B. Simulación del vuelo del cohete

El vuelo del cohete con todas sus variables (altitud, velocidad, aceleración, tiempo de despliegue de paracaídas, etc) se simula

en un software de código abierto que con base en las dimensiones y características de un cohete (longitud, diámetro, geometría de la ojiva, número de aletas, geometría de las aletas tipo de motor etc) simula el comportamiento en vuelo. El software tiene en cuenta las condiciones atmosféricas del posible lugar de lanzamiento para lograr una mejor simulación. En este Proyecto se utilizó el software de acceso libre *OPEN ROCKET*.

C. *Simulación del comportamiento del fuselaje*

Los esfuerzos causados por las cargas sobre el cohete se simularon por medio de Solidworks Simulation. Esta simulación incluyó también los esfuerzos causados por las cargas aerodinámicas. Se realizó simulación de temperaturas en el fuselaje basado en la temperatura de combustión dentro del motor cohete.

D. *Manufactura aditiva*

Los distintos componentes se imprimieron en impresoras 3D pertenecientes a la Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suarez" y, cuando lo exigía la complejidad y tamaño del componente, en impresoras externas (ojiva). Los modelos diseñados en formato *.sldprt* fueron posteriormente convertidos a archivos *.stl*, con el fin de garantizar su correcta lectura e interpretación por parte de las máquinas de impresión 3D.

E. *Manufactura sustractiva*

Se cortaron las aletas del cohete por medio de máquinas cortadoras CNC que garantizan unas dimensiones fieles a las determinadas en el diseño CAD.

F. *Materiales*

Se utilizaron materiales de tipo polimérico en gran parte del fuselaje. Los elementos cilíndricos del fuselaje se cortaron de un tubo de polímero PVC para transporte de agua a alta presión de 0,0889 m de diámetro externo [10]. La ojiva se imprimió en polímero ABS. Los acoples entre las secciones cilíndricas, tanto como los soportes y retenes del motor cohete se imprimieron en polímero ABS. Las aletas se cortaron por CNC y están fabricadas en acrílico transparente de 0,003 m de espesor. Se diseñó una estructura de refuerzo en varillas de fibra de carbono. Como se puede inferir, todos estos materiales tienen densidades relativamente bajas, con lo cual se busca reducir el peso de la estructura para maximizar el apogeo del cohete.

III. Resultados

A. *Requerimientos iniciales*

Como requerimientos iniciales se establecieron las condiciones dadas por el lugar en donde se lanzaría el cohete que podría ser el municipio de Marandúa situado en el departamento de Vichada (oriente de Colombia) cuyas condiciones se ven en la Tabla I.

TABLA I. CONDICIONES DEL SITIO DE LANZAMIENTO

Sitio de lanzamiento Marandua , Vichada				
Humedad	***Velocidad del viento***	***Temperatura***	***Latitud***	***Longitud***
64%	13 km/h	31°C	5,57° Norte	68,51 Oeste

La carga útil que deberá transportar tiene una masa igual a 0,109 kg y consiste en un CANSAT. Un CANSAT es una representación de un satélite verdadero pero con un volumen igual o inferior a una lata de bebidas en el cual los estudiantes deben tratar de integrar la mayor parte de sistemas de potencia y comunicaciones [11]. En la Fig.1 se observa un satélite de este tipo que fue diseñado en la Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suarez" [12] con colaboración del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.

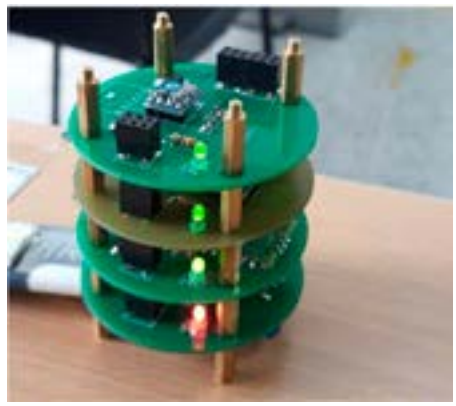


Fig. 1. Satélite tipo Cansat.

El motor cohete que impulsará al cohete FACSON 1, había sido diseñado previamente por Urueña y Vega [13]. Su fabricación preliminar se hizo en acero AISI 1020 e incluye una tobera también fabricada en acero AISI 1020. El combustible que impulsará este motor cohete será del tipo *Candy* que se compone de azúcar común (sucrosa) y nitrato de potasio, con composición standard de 35% Su- 65% KNO_3. Este motor cohete se encuentra clasificado como clase K. Según la curva de empuje obtenida para este motor que se observa en la Fig. 2 su impulso total es de 1454 N*s. Este impulso se calculó con el software SMR de Richard Nakka [14].

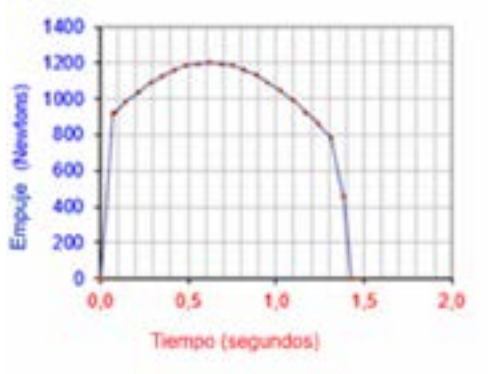


Fig. 2. Curva de empuje vs. tiempo para el motor cohete [13].

Agradecimientos a la Fuerza Aeroespacial Colombiana.

De acuerdo con la categoría del motor cohete diseñado, que se observa en la Fig.3, se realizaron pruebas en el software *OPEN ROCKET* utilizando motores cohete comerciales todos ellos clase K con impulso similar al obtenido en simulaciones por parte de Urueña y Vega [13], o con dimensiones similares al motor cohete diseñado.



Fig. 3. Motor cohete construido con tobera.

Se realizaron tres simulaciones con tres motores cohete diferentes todos clasificados como clase K verificando que el apogeo alcanzará valores cercanos a 2000 m para cada uno. Al analizar los resultados se escogieron los valores más altos en cuanto a velocidad, aceleración y el mínimo para el apogeo, aunque los valores no pertenecieran a la misma simulación de motor cohete. Esto permite hacer cálculos conservadores y asegurar que el cohete tenga un desempeño igual o superior a lo analizado. El impulso total de los tres motores cohete probados se encontró en el rango entre 1654 N*s y 1304 N*s. La estabilidad es un parámetro importante en el diseño y buen vuelo del cohete. Este parámetro garantiza que el cohete no tenga una trayectoria errática , o aleatoria durante su vuelo , sino que pueda estabilizarse cuando alguna fuerza lateral lo afecte mientras asciende. El valor de la estabilidad se obtiene al dividir la distancia que separa el centro de gravedad y el centro de presiones del cohete entre el diámetro del fuselaje del cohete. Este valor debe ser mayor o igual a uno. Para las tres simulaciones obtenidas este valor estuvo un rango de 2,47-2,59 que significa una buena estabilidad en vuelo.

Para la primera simulación que se observa en la Fig. 4, cuando se alcanza la velocidad máxima de 325 m/s (curva roja), la aceleración es prácticamente 0 m/s^2 (curva amarilla). Esta simulación se realizó con el motor cohete Cesaroni 1654K515-16A que aporta un impulso total de 1654 N*s.

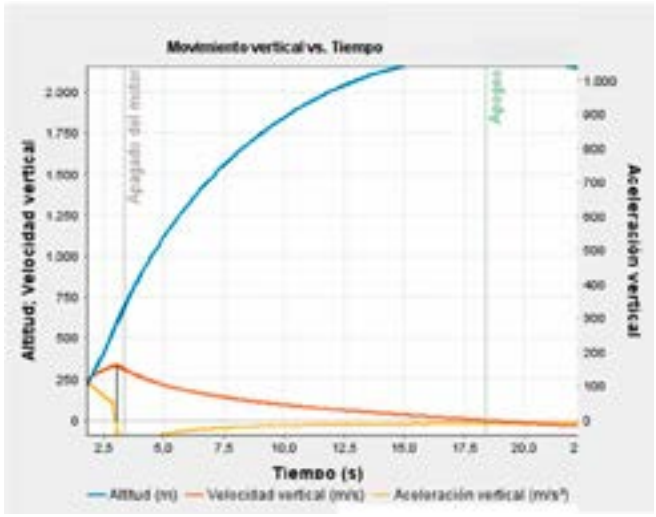


Fig. 4. Curvas de altitud, velocidad y aceleración para el primer motor cohete.

Para la segunda simulación que se observa en la Fig. 5 cuando se presenta la velocidad máxima (curva roja), la aceleración es prácticamente igual a 0 m/s^2 (curva amarilla). Las velocidades en el inicio del vuelo son cercanas a cero mientras la aceleración es máxima (139 m/s^2). Esta simulación se realizó con un motor cohete Aerotech 400C que aporta un impulso total de 1304 N*s.

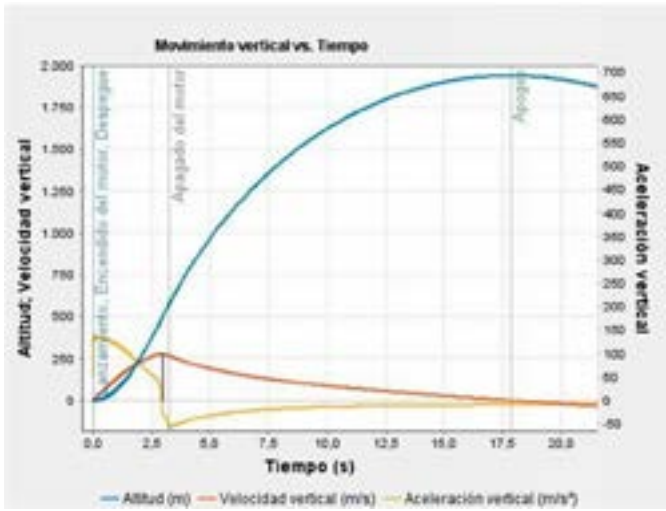


Fig. 5. Curvas de altitud, velocidad y aceleración para el segundo motor cohete.

En la tercera simulación, observada en la Fig.6 cuando se alcanza la velocidad máxima de 310 m/s (curva roja) la aceleración es prácticamente 0 m/s^2 (curva amarilla). Las velocidades en el inicio del vuelo son cercanas a cero mientras la aceleración es máxima (163 m/s^2). Esta simulación se realizó con un motor cohete AEROTECH HP-K535W que aporta un impulso de 1434 N*s.

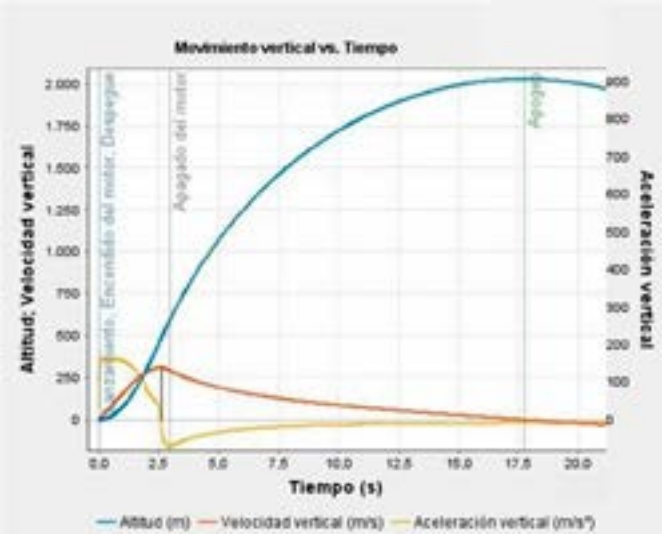
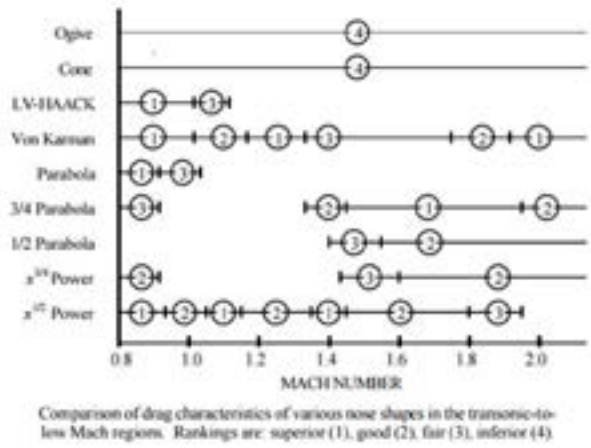


Fig. 6. Curvas de altitud, velocidad y aceleración para el tercer motor cohete.

El máximo número de Mach alcanzado es 0,963. Una ojiva con perfil parabólico presenta un desempeño aerodinámico superior para números de Mach entre 0,8 y 0,9 y aceptable para números de Mach entre 0,9 y 1,05 como se puede observar en la Fig. 7. Es decir que durante la mayor parte del vuelo la ojiva presenta un comportamiento superior en cuanto a la resistencia aerodinámica [15].



Comparison of drag characteristics of various nose shapes in the transonic-to-low Mach regions. Rankings are: superior (1), good (2), fair (3), inferior (4).

Fig. 7. Desempeño aerodinámico de distintas geometrías de ojiva [15].

La ojiva se diseñó siguiendo una geometría de perfil parabólico. La curva exacta de perfil se define con la siguiente función matemática (1).

$$y=R\left(\frac{2\left(\frac{X}{L}\right)-K'\left(\frac{X^2}{L}\right)}{2-K'}\right) \quad (1)$$

En la cual $K'=1$ es la constante de la parábola, R es el radio en la base de la ojiva, L es la longitud de la ojiva x es la distancia desde el centro de la base hasta cualquier punto situado sobre el eje de simetría de la ojiva. Por último, la variable **y** determina el perfil parabólico de la ojiva siendo **y** la variable de salida como se observa en la Fig. 8. Para x=L, y=0 y cuando x=0, y=R.

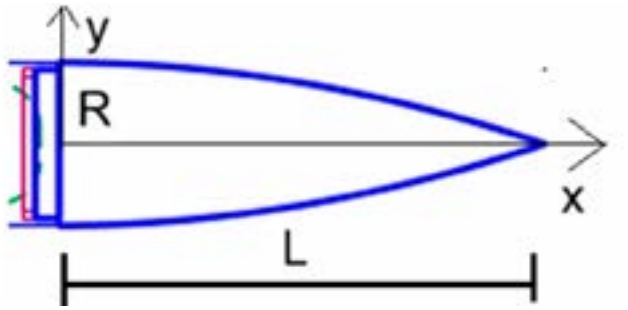


Fig. 8. Esquema ilustrativo de la curva generatriz de la ojiva.

La ojiva diseñada e impresa en polímero ABS se puede observar en la Fig. 9.



Fig. 9. Ojiva impresa en polímero ABS (izquierda).

Se escogieron los valores más altos de aceleración 163 m/s^2, y de velocidad 325 m/s para realizar los cálculos con los cuales se realizaron las simulaciones. Por medio de OPEN Rocket se calculó la masa total que tiene el cohete teniendo en cuenta la ojiva , el tubo PVC los anillos, los acoples y soportes del motor como también los de la tobera (2,471 kg) y la masa del satélite (0,109 kg).

Fuerza total=Masa cohete*aceleración máxima (2)

Fuerza total=2,58089 kg*163 m/s^2 = 420,68 N (2)

El factor de servicio tiene en cuenta un incremento en las cargas que se podría presentar por combustión muy acelerada del combustible sólido Candy. Este factor se determinó como igual a 2. Al multiplicar la fuerza obtenida por el factor de servicio se obtiene

Fuerza a aplicar=420,68*2=841,36 N (3)

B. Simulación de esfuerzos en software CAD

Inicialmente se realiza una simulación de esfuerzos causados por la fuerza inducida por la aceleración máxima . La máxima aceleración causa un efecto de compresión sobre la estructura que se somete a varias gravedades positivas. Haciendo un cálculo conservador, se aplica la fuerza sobre los elementos más importantes del fuselaje.

Se aplica la carga calculada sobre el acople que une dos troncos cilíndricos del cohete y que también impide que el motor cohete de desplace internamente dentro del cohete lo que afectaría las zonas de carga útil o de instrumentos electrónicos. La Fig.10 muestra los esfuerzos que experimenta este acople fabricado por manufactura aditiva en ABS. El ABS tiene un esfuerzo de fluencia de mínimo 2 MPa [16]. El esfuerzo von Mises máximo es de menos de 2 MPa, obteniéndose un factor de seguridad de 1,3.

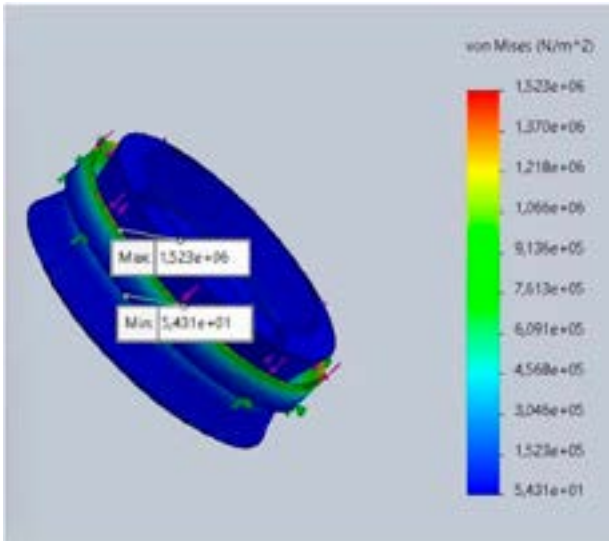


Fig. 10. Esfuerzo en Acople – reten del motor debido a la aceleración de despegue.

Se generaron 51896 elementos tipo tetraedro con 99,8% de ellos con una relación de aspecto menor a 3 validando la buena calidad de la malla.

Las barras de fibra de carbono se modelan en Solidworks y se les asigna restricción en los puntos de apoyo que tienen en cada anillo. La carga se dividió en cuatro y se aplicó esta carga a cada barra. Los valores de esfuerzo se pueden observar en la Fig. 11. Se dividió cada barra en 59092 elementos con el 99,9 de ellos mostrando un relación de aspecto menor a tres lo que valida los resultados. El esfuerzo último para barras de carbono que se consultó es de 50 MPa [16] y el esfuerzo máximo hallado fue de 17,5 MPa que determina un factor de seguridad de 2,9. El objetivo de colocar estas varillas de refuerzo es darle resistencia redundante a la estructura frente a cargas aerodinámicas como el drag que cause compresión o flexión sobre el fuselaje con un aumento mínimo del peso propio al estar fabricadas en fibra de carbono.

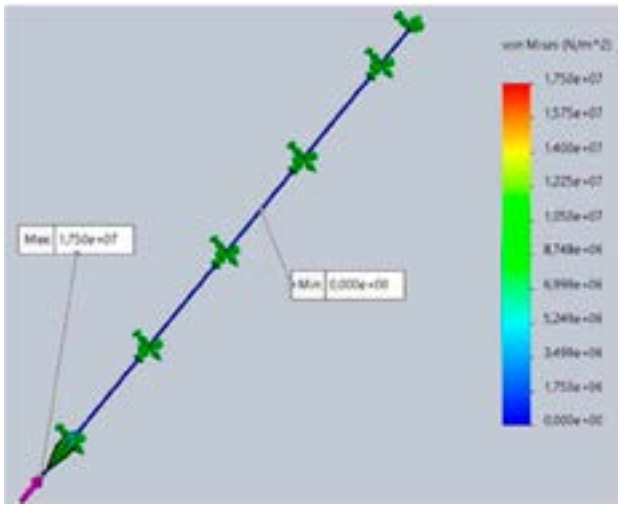


Fig. 11. Esfuerzos sobre las varillas de refuerzo.

La zona inferior del cuerpo se analiza también por medio de simulación. Allí se encuentra un tubo de PVC que conforma el cuerpo principal del cohete al cual se le ensamblan las aletas. La fuerza aplicada es de 841,36 N. Este material tiene un esfuerzo de fluencia de 14,8 MPa [16] . El esfuerzo máximo sobre el tubo es de 3,94 MPa como se observa en la Fig.12 , lo que significa que el factor de seguridad es igual a 3,7. El número de elementos es de 36758 de los cuales el 99,9% tiene una relación de aspecto menor a 3 validando la buena calidad de la malla.

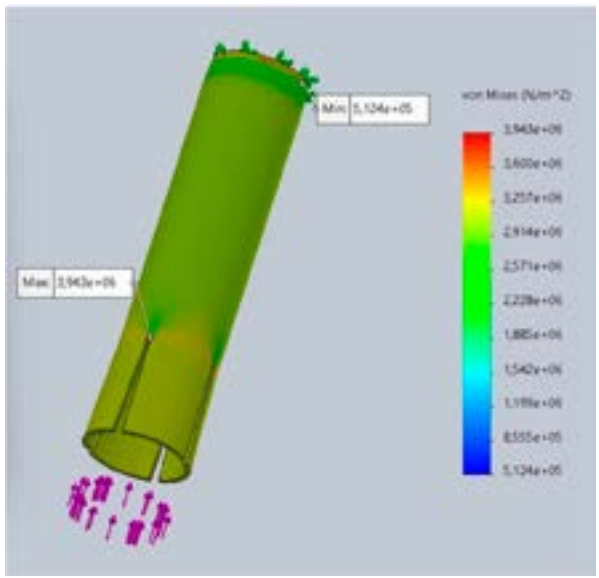


Fig. 12. Esfuerzos en el cilindro inferior.

Para la zona superior del cuerpo , también fabricada en PVC su estado de esfuerzos se obtuvo por simulación. El esfuerzo máximo es de 0,83 MPa que se observa en la Fig.13 lo que representa un factor de seguridad de 17,8. El número de elementos es 32248 de los cuales el 97,1 % tiene relación de aspecto menor a 3 lo que evidencia la buena calidad de la malla generada.

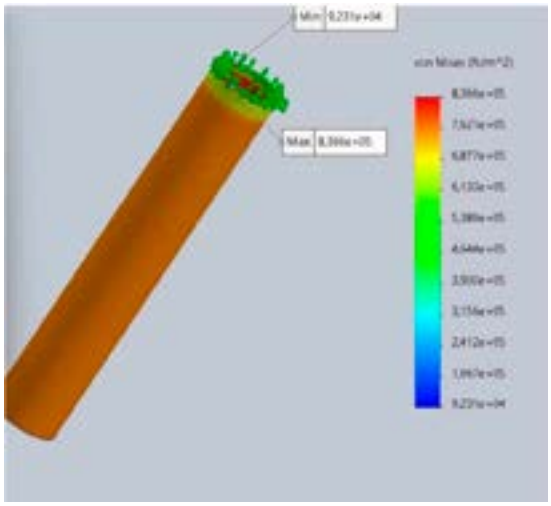


Fig. 13. Esfuerzos sobre el cilindro superior.

La misma fuerza aplicada sobre la ojiva fabricada en polímero ABS, causa un esfuerzo de Von Mises de 0,827 MPa obteniendo un factor de seguridad de 2,41. En la Fig.14 se muestra la distribución de esfuerzos sobre la ojiva.

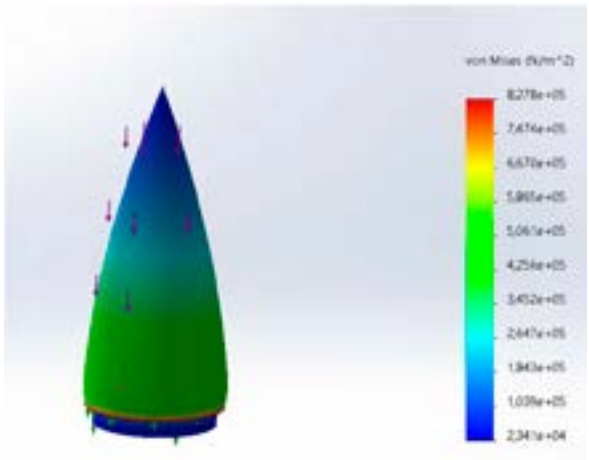


Fig. 14. Esfuerzos causados sobre la ojiva en el despegue del cohete.

C. Simulación de comportamiento térmico en software CAD

El motor cohete es el encargado de generar la energía que genera el ascenso del cohete. Esta energía se obtiene por medio de una reacción química de combustión exotérmica que genera calor que se transmite a la atmósfera pero también a los distintos componentes del cohete. Para conocer las temperaturas que se presentarían en los componentes del cohete se realizaron simulaciones. Según la temperatura reportada en un experimento en el cual se registraron aproximadamente (800°C) [17]. Se calcularon los coeficientes de transferencia de calor por convección tanto en la parte interior del motor cohete (*hi*) como en la parte exterior de él (*ho),* para trabajar en la simulación con estos datos (hi =508,874 W/(m^2*°K) , ho=17,9508 W/(m^2*°K).

En la Fig. 15 se observa la distribución de temperaturas sobre el motor cohete. En la pared interior la temperatura es de 800°C y en la pared exterior , cerca de la tobera desciende a 752°C . La diferencia entre las dos temperaturas es baja porque el acero AISI 1020 tiene un alto coeficiente de transferencia de calor por conducción permitiendo un rápido flujo de energía.

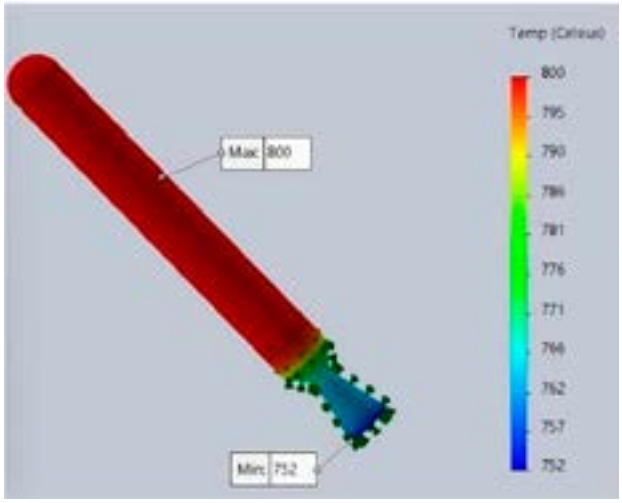


Fig. 15. Distribución de temperaturas sobre el motor cohete.

Se realizó una simulación sobre el acople que une dos partes del cohete y a la vez está en contacto con el motor cohete. Sobre la superficie en contacto con el motor cohete se asumió una condición extrema de 800°C (la misma temperatura de los gases). La simulación, que se observa en la Fig.16, evidencia una diferencia de temperatura muy marcada dentro de la pared del acople en contacto con el motor cohete. Esta condición evidencia la baja capacidad de conducción térmica del material ABS y las altas temperaturas que se presentarían en el interior del acople.

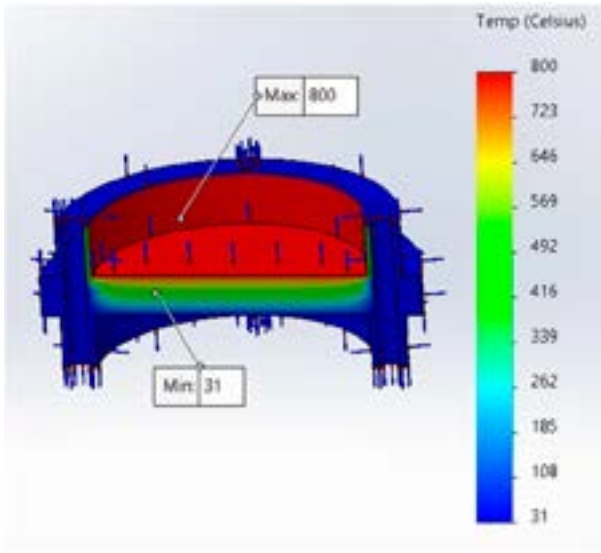


Fig. 16. Temperaturas en Acople- Reten superior del motor cohete.

Se realiza otra simulación sobre uno de los anillos de refuerzo asignando sobre la pared interior, en contacto cercano con el motor cohete, con una temperatura de 800°C que se muestra en la Fig.17 . Al igual que en la Fig. 16, se observa una diferencia alta de temperatura.

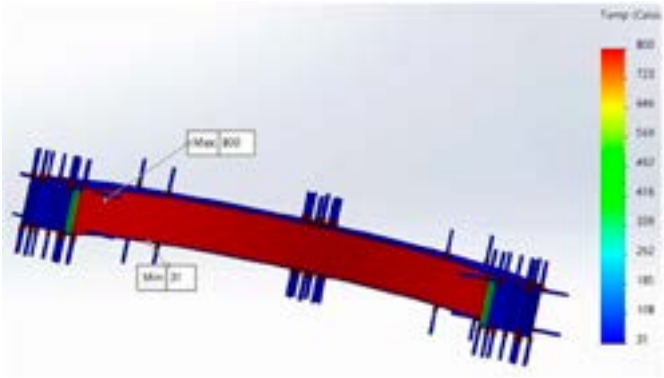


Fig. 17. Distribución de temperaturas en un anillo interno del cohete.

La simulación en la zona del soporte de la tobera , que es también fabricada en material ABS muestra unos valores de temperatura bastante altos en color verde y en color rojo. Sin embargo en las zonas externas las temperaturas son cercanas a 31 °C. como se observa en la Fig. 18.

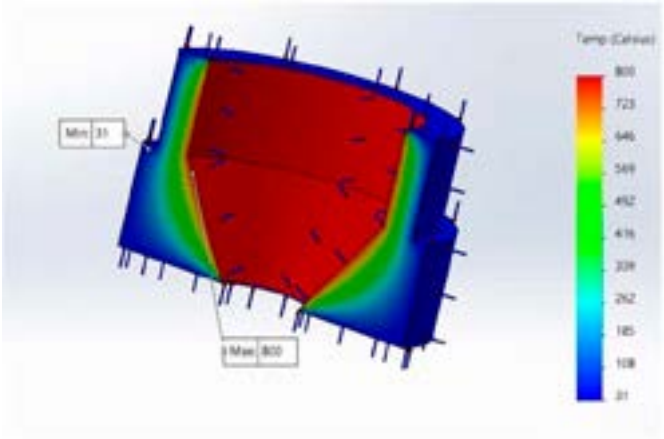


Fig.18. Temperaturas en soporte inferior del motor cohete.

Las simulaciones muestran que el ABS es un material que impide el paso de la energía térmica evitando que el calor llegue a componentes electrónicos sensibles del cohete. Sin embargo, las temperaturas que alcanza el ABS son superiores a su temperatura de ablandamiento que es aproximadamente 100°C [16]. Esta condición hace muy necesario aislar el motor cohete por medio de un tejido aislante . Para este efecto se escogió una tela de fibra cerámica con recubrimiento de papel aluminio que resiste temperaturas de 950 a 1400 °C.

En la realidad las condiciones son menos extremas, la temperatura externa del motor cohete va a ser menor a 800°C (temperatura interna -gases) porque la pared metálica del motor cohete retarda la conducción de calor a pesar de la buena conductividad térmica del acero. De otro lado, el proceso de generación de calor (combustión del propelente), solo tiene una duración de 3,2 segundos en los cuales los gases que escapan no alcanzan a transmitir todo su calor a las paredes internas del motor cohete, sino que escapan rápidamente a la atmósfera con su energía calórica.

D. Estudio aerodinámico en software CAD

Las presiones que se ejercen sobre el fuselaje se observan en la Fig. 19. Sobre la punta de la ojiva se observa un relativo aumento de presión dado que es el punto que sufre el primer contacto con la masa de aire. La presión en esta zona es de 120,44 KPa. Al aumentar el diámetro se presentan presiones de 94,29 KPa que se elevan a 100 KPa hasta la zona de aletas y tobera en donde se reduce de nuevo a 84,4 KPa.

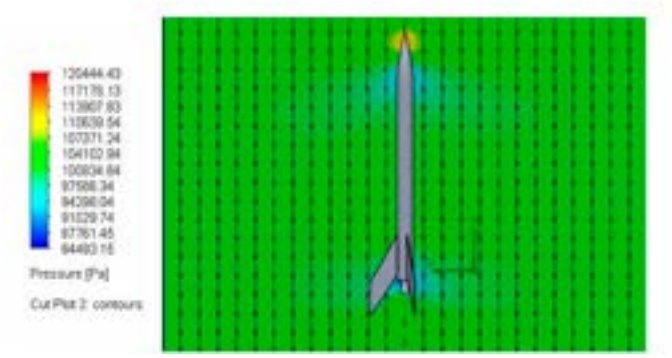


Fig. 19. Presiones sobre el cohete para la velocidad máxima.

Al comparar la presión máxima con la presión de trabajo admisible especificada para el PVC que es de 1,36 MPa, se obtiene un valor de 11,33 para el factor de seguridad. Para el caso de material ABS el esfuerzo de fluencia mínimo consultado es de 2 MPa [16] que es también muy superior a 120 KPa obteniéndose un factor de seguridad de 16,6.

Con base en (4) que representa la fuerza de resistencia aerodinámica; se calcula la fuerza de arrastre aproximada que actúa sobre la ojiva y que se transmite al fuselaje del cohete. La densidad del aire ρ es aproximadamente 1,225 kg/m^3, la velocidad v es igual a 325 m/s, el coeficiente de arrastre Cd, para perfiles parabólicos según el número de Mach alcanzado por el cohete, es 0,17 [18]. Por último el área proyectada A es igual a 0,00608 m^2.

$$Fd = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * Cd * A \quad (4)$$

Al reemplazar valores en (4) se tiene,

$$Fd = \frac{1}{2} * 1{,}225 * 325^2 * 0{,}17 * 0{,}00608 = 66{,}86 \text{ N} \quad (5)$$

La fuerza de arrastre calculada se transmite desde la ojiva hacia las aletas del cohete .Esta fuerza es muy inferior a la causada por la aceleración durante el despegue del cohete.

Los esfuerzos anteriormente analizados fueron obtenidos para cada simulación asumiendo que las cargas actuaban sobre solo uno de los componentes estructurales (tubo, acople, o varillas). En el vuelo estas fuerzas se distribuyen en el tubo PVC , en los acoples y en las 4 varillas simultáneamente aumentando el factor de seguridad de los componentes con menor factor de seguridad (en este caso 1,33).

E. Detalles de la manufactura y ensamble

Se diseñó un sistema de anillos de refuerzo interiores que dieran mayor resistencia y rigidez al fuselaje. Adicionalmente estos anillos permiten asegurar la alineación y soporte del motor cohete y del satélite (carga útil). Cada anillo tiene cuatro agujeros por dentro de los cuales se insertan barras de fibra de carbono de 0,005 m de diámetro como se observa en la Fig. 20. También se ilustra el acople retenedor del motor cohete y las dos partes simétricas que mantienen fija la posición de la tobera con respecto al fuselaje del cohete.

Adicionalmente, el ensamble del motor cohete dentro de la estructura de anillos y varillas de fibra de carbono se realizó recubriendo el motor cohete en la tela aislante que evita el ablandamiento de los componentes que están fabricados en polímero ABS como se observa en la Fig. 20.



Fig. 20. Proceso de colocación de la tela aislante sobre el motor cohete , y de la estructura de refuerzo interno (anillos, varillas en fibra de carbono).

En la Fig. 21 se muestran los anillos producidos por manufactura aditiva el soporte inferior de la tobera (b) y el acople-retén que une dos secciones de tubo PVC .

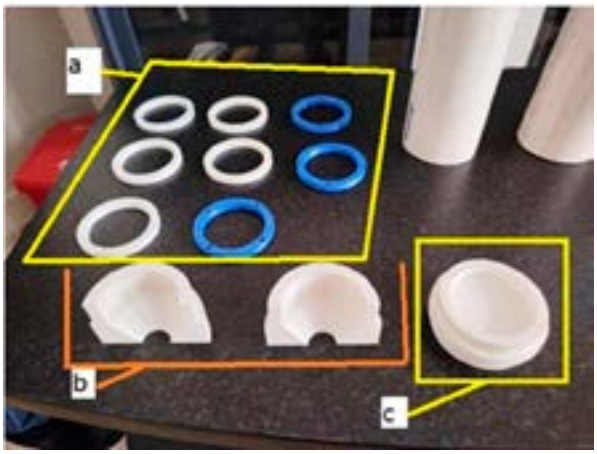


Fig. 21. Elementos estructurales internos del fuselaje. a) Anillos de refuerzo. b) soporte de la tobera. c) acople – reten superior del motor cohete.

Las 4 aletas se cortaron desde una lámina de acrílico por medio de cortadora laser y se observan en la Fig. 22.

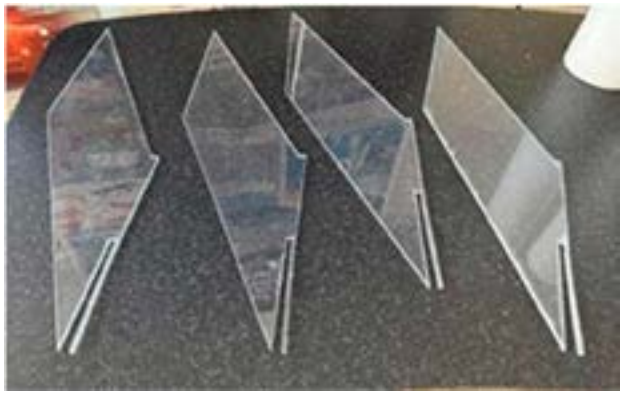


Fig. 22. Aletas cortadas en acrílico.

El cohete se recubrió con pintura roja buscando que sea fácilmente identificable cuando se encuentre en vuelo o cuando se requiera buscarlo en tierra después del descenso.

El cohete en posición vertical, sostenido por uno de los investigadores del GIEA (Grupo de Investigación en estudios Aeroespaciales) se puede observar en la Fig.23. La longitud total del cohete es de 1,5 m. La ojiva tiene una longitud de 0,26 m.



Fig. 23. Tamaño relativo del cohete FACSON I respecto a una persona de estatura 1,72 (m).

IV. Conclusiones

La tecnología de manufactura aditiva ha permitido obtener componentes mecánicos y estructurales a partir del uso software CAD y la fácil disponibilidad de materiales poliméricos necesarios para la impresión 3D.

Los elementos como la fibra de carbono , se pueden incorporar fácilmente en las estructuras de cohetes sonda experimentales aportando solidez y resistencia mecánica estructural con bajo aporte de peso propio.

Los costos de producción del fuselaje del cohete presentado en este artículo ($1.179.900) hacen posible que se sigan desarrollando nuevos cohetes sonda en los cuales se hagan

pruebas de sistemas Cansat para distintos propósitos alcanzando mayores apogeos.

Los elementos que componen el fuselaje tienen un factor de seguridad mínimo de 1,3 , que aumenta en un vuelo real dado que varios elementos como los anillos , el soporte de tobera , el acople de las dos secciones tubulares del cohete trabajarán en conjunto para soportar las cargas que se generan en el aterrizaje y en el vuelo, distribuyendo mejor los esfuerzos.

Por medio de la investigación formativa en entornos universitarios es posible generar avances en conocimientos y tecnología aeroespacial de acuerdo a la misión de la Fuerza Aeroespacial Colombiana y de las políticas del estado colombiano.

Reconocimientos

Se reconoce el aporte de los docentes investigadores del Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales de la "Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suarez", como también al Mayor Wilmer Chacón Ardila, a los docentes investigadores Julián Portocarrero Hermann y al laboratorista Edward Stiven Rodríguez, por el éxito de este proyecto.

Referencias

[1] Fuerza Aeroespacial Colombiana,"Satélite de observación de la tierra FACSAT -1",FAC,2026.[En linea].Disponible en: https://poderespacial.fac.mil.co/es/facsat [Accedido:24-abr-2026]

[2] Fuerza Aeroespacial Colombiana,"FACSAT-II Chiribiquete",FAC,2026.[En linea].Disponible en: https://poderespacial.fac.mil.co/facsat-2.[Accedido:24-abr-2026]

[3] Fuerza Aeroespacial Colombiana,"Estrategia para el desarrollo aéreo y espacial de la FAC-EDAES-2ª Edicion",FAC, 2026.[En linea].Disponible en: https://www.fac.mil.co/sites/default/files/2026-03/edaes_2edicion.pdf

[4] Departamento nacional de planeación.República de Colombia."Documento CONPES 3983. Política de desarrollo espacial: Condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional".[En linea].Disponible en: https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3983.pdf

[5] Fuerza Aeroespacial Colombiana ," Nuestro objetivo llegar a las estrellas", FAC,2026.[En linea].Disponible en:https://www.fac.mil.co/es/editorial-comandante-fac/nuestro-objetivo-llegar-las-estrellas[Accedido:30-abr-2026]

[6] R. Robayo. *Et al.* "Diseño, construcción y prueba estática experimental de un motor-cohete de combustible sólido ," Revista UIS ingenierias , vol. 20, no. 2, pp. 97–108, Febrero 2021

[7] NASA. "Types of sounding rockets".NASA, 2026.[En linea].Disponible en: https://www.nasa.gov/soundingrockets/vehicles/[Accedido:30-abr-2026]

[8] J. D. Meneses."Diseño de un cohete experimental (FACSON-0) propulsado por combustible sólido tipo Candy",2021,Escuela Militar de Aviacion "Marco Fidel Suarez".[En linea].Disponible en: https://primo.sibfup.co/discovery/fulldisplay?docid=alma991243213907231&context=U&vid=57MDN_INST:MDN2&lang=es&repId=12269406300072 31

[9] A. D. Cárdenas y B. R. Díaz. "Construcción del fuselaje de un prototipo de cohete sonda FACSON 1 propulsado por combustible tipo Candy en la EMAVI," 2025,Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suarez".[En linea].Disponible en: https://primo.sibfup.co/discovery/fulldisplay?docid=alma991388324807231&context=U&vid=57MDN_INST:MDN2&lang=es&repId=1253129490007231

[10] Durman by aliaxis. "Manual de presión PVC_2025",2025[En linea].Disponible en :https://grupoaliaxis.s3.amazonaws.com/durman-colombia/descargas/Manual/Manual%20Presi%C3%B3n%20PVC_2025 [Accedido:28-abr-2026]

[11] THE EUROPEAN SPACE AGENCY. "Descripción general de Cansat,"ESA.2026.[En linea].Disponible en: https://www.esa.int/Education/CanSat_overview. [Accedido: 29-abr-2026]

[12] J. S. Segura y R.S. Viviescas."Diseño de un prototipo CANSAT para el FACSON I",2024, Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suarez".[En linea]. Disponible en: https://primo.sibfup.co/discovery/fulldisplay?docid=alma991325415607231&context=U&vid=57MDN_INST:MDN2&lang=es&repId=1240192210007231

[13] A. F. Urueña y J. G. Vega."Diseño de un sistema motor cohete de combustible sólido tipo Candy para la misión FACSON I,"2024, Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suarez".[En linea].Disponible en: https://primo.sibfup.co/discovery/fulldisplay?docid=alma991327414407231&context=U&vid=57MDN_INST:MDN2&lang=es&repId=1240481880007231

[14] R. A. Nakka," Richard Nakka experimentary rocketry site",2001.[En linea]. Disponible en:https://www.nakka-rocketry.net/soft/SRM_RNX-57.xls[Accedido:25-abr-2026]

[15] MIT Rocket Team,"How to: Choose a nosecone",2016.[En linea].Disponible en: https://wikis.mit.edu/confluence/display/RocketTeam/How+to%3A+Choose+a+Nose+Cone [Accedido:27-abr-2026]

[16] MatWeb,"Material Property Data",2026.[En linea].Disponible en: https://matweb.com/index.aspx [Accedido:28-abr-2026]

[17] H. E. Martinez."Caracterización fisico química del combustible sólido tipo Candy con sorbitol para uso de cohetes tipo sonda en la EMAVI",2025,Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suarez".[En linea].Disponible en: https://primo.sibfup.co/discovery/fulldisplay?docid=alma991387624707231&context=U&vid=57MDN_INST:MDN2&lang=es&repId=1253089450007231

[18] R. A. Nakka, "Richard Nakka experimentary rocketry site",2026.[En linea].Disponible en: https://www.nakka-rocketry.net/rocket/19930087953.pdf[Accedido:29-abr-2026]

Socio-Spatial Challenges of Smart Mobility: A Predictive Modeling Approach for Sustainable Urban Traffic Management in Colombia

Gabriel Jaime Rivera León
Docente Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI
Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD)
Medellín, Colombia.
jaime.rivera@unad.edu.co

Gloria Paulina Castellanos Jaramillo
Docente Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI
Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Dosquebradas, Colombia.
paulina.castellanos@unad.edu.co

Henry Leonardo Borrero López
Docente Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI
Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Medellín, Colombia.
henryl.borrero@unad.edu.co

***Abstract*—Traditional traffic forecasting for smart mobility prioritizes aggregate efficiency, often neglecting spatially uneven access and resilience to weather, thereby masking mobility injustices. In Valle de Aburrá, Colombia, steep topography, variable climate, and pronounced poverty stratification intersect to shape exposure to congestion and risk. This study advances a justice-aware predictive framework that extends Markov Chain transitions by conditioning them on exogenous weather states and micro-spatial vulnerability indices (MPI). A three-layer data pipeline—ITS telemetry, meteorological records, and socio-economic indicators—operates within a Bayesian hierarchical Markov backbone. Transition probabilities are parameterized via multinomial logistic regression with covariates for precipitation, temperature/humidity, and MPI strata, enabling weather- and equity-conditioned state dynamics. A hierarchical spatial-sharing scheme mitigates data deserts by borrowing strength across sensor locations while preserving locality. We introduce formal equity metrics (Region-Based Fairness Gap and a posterior predictive Gini index) computed from posterior distributions to diagnose bias in disadvantaged zones. Anticipated outcomes include 15–25% reductions in precipitation-associated prediction errors and a transparent mechanism for prioritizing caution in vulnerable communities. Compared with black-box deep learning, our approach offers interpretability and computational efficiency for resource-constrained municipal contexts, delivering auditable insights for just and climate-resilient urban mobility.**

Keywords—Smart Mobility, Spatial Equity, Markov Chains.

I. Introduction

The rapid urbanization of the twenty-first century has placed smart mobility at the center of sustainable development agendas worldwide. Intelligent Transportation Systems (ITS), real-time telemetry, and data-driven forecasting have become cornerstones of urban traffic management, promising reductions in congestion, emissions, and travel times [1]. Within this paradigm, predictive models based on Markov Chains have established themselves as a rigorous and computationally tractable approach for capturing traffic state transitions, offering a probabilistic representation of flow dynamics that aligns naturally with the stochastic nature of urban networks [2]. More recently, the integration of machine learning and Bayesian inference has extended these models to accommodate non-stationarities and exogenous covariates, further improving their predictive accuracy [3].

Despite these advances, mainstream smart mobility frameworks share a critical blind spot: they optimize for aggregate efficiency metrics—average speed, total throughput, system-level delay—while treating spatial heterogeneity as noise rather than signal [4]. This aggregate perspective conceals profound mobility injustices that become visible only when disaggregating outcomes by geography and socioeconomic stratum. In the context of the Valle de Aburrá metropolitan region in Colombia, home to approximately 3.9 million inhabitants and anchored by the city of Medellín, this omission carries particularly severe consequences. The region's steep Andean topography concentrates lower-income communities on hillside peripheries where road infrastructure is sparse, gradient-sensitive, and disproportionately disrupted by precipitation events [5]. Under these conditions, a traffic model that reports satisfactory aggregate performance may simultaneously mask systematic prediction failures in the most vulnerable neighborhoods, effectively encoding spatial injustice into the algorithmic fabric of urban governance.

The interaction between climate variability and social vulnerability in Valle de Aburrá is not incidental but structural. Precipitation patterns in tropical Andean cities are spatially heterogeneous and seasonally complex, and their impact on traffic dynamics is mediated by the physical and socioeconomic characteristics of each zone [5]. Communities with high values of the Multidimensional Poverty Index (MPI)—a composite measure capturing deprivations in education, health, living standards, and employment—tend to occupy locations with lower road redundancy, limited access to real-time information, and greater dependence on public transport modes whose reliability degrades sharply under adverse weather [4]. Consequently, prediction errors in these zones are not randomly distributed: they are systematically correlated with precipitation

intensity and MPI stratum, constituting a form of algorithmic inequity that standard model evaluation metrics fail to capture [3].

This study addresses this gap by advancing a justice-aware predictive framework that extends conventional Markov Chain transition models through two novel conditioning mechanisms. First, we incorporate exogenous weather states—derived from meteorological records of the Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA)—directly into the transition probability structure, allowing the model to adapt its dynamics to precipitation, temperature, and humidity regimes [2]. Second, we stratify transition parameters by MPI decile, implementing a Bayesian hierarchical structure that borrows statistical strength across sensor locations to mitigate data deserts in peripheral zones while preserving local specificity [1]. To formally diagnose and communicate equity outcomes, we introduce two new metrics: the Region-Based Fairness Gap (RBFG), which quantifies prediction error disparities between high- and low-MPI strata, and a posterior predictive Gini index that summarizes the distributional concentration of model error across the urban territory [3].

II. RELATED WORK

A. Climate Variables and Socioeconomic Indices in Urban Traffic Management

The influence of meteorological conditions on traffic dynamics is well-documented. Precipitation reduces road surface friction, degrades driver visibility, and increases headways, producing systematic reductions in throughput that vary by intensity and duration [6]. Temperature extremes exacerbate these disruptions by modifying both travel demand and infrastructure performance, with consequences that extend beyond aggregate delay to alter modal choices across socioeconomic strata [7]. Yet the bulk of traffic forecasting literature treats weather as a uniform exogenous shock rather than a spatially differentiated hazard: studies that do incorporate rainfall or temperature typically apply a single correction factor across the entire network, obscuring the heterogeneous exposure of peripheral and hillside communities [6].

The integration of socioeconomic indices into traffic modeling remains even more nascent. Bocarejo and Oviedo [8] demonstrated that transport accessibility in Colombian cities is strongly stratified by income, with low-income households bearing disproportionate accessibility deficits that standard efficiency metrics conceal. Complementary work by Hernández [9] linked transport deprivation to Multidimensional Poverty Index (MPI) scores in Latin American metropolitan areas, showing that mobility restrictions compound educational, health, and economic deprivations in a mutually reinforcing cycle. More recently, Salazar and Rincón [10] applied accessibility modeling to Andean cities under the 15-minute city paradigm, confirming that hillside communities in steep-topography cities systematically fall outside acceptable access radii for essential services — a structural inequity that is exacerbated, not created, by weather events. Despite these advances, no study has yet embedded MPI stratification directly into the transition probability matrices of a predictive traffic state model, leaving a critical methodological gap between equity diagnosis and operational forecasting.

B. Black-Box Deep Learning vs. Interpretable Bayesian and Markov Approaches

Deep learning architectures — particularly Long Short-Term Memory (LSTM) networks, Graph Convolutional Networks (GCN), and Transformer-based models — have achieved state-of-the-art accuracy benchmarks in short-term traffic prediction [11]. However, their adoption in resource-constrained municipal contexts faces three structural barriers. First, these architectures require large volumes of spatially dense, high-quality training data; in cities where sensor coverage is sparse and unevenly distributed — a condition systematically correlated with peripheral, low-income zones — deep learning models suffer severe generalization failures precisely where equity-sensitive prediction is most needed [12]. Second, the opacity of deep neural networks prevents urban planners and policymakers from auditing which covariates drive predictions in specific zones, undermining accountability requirements in public governance [13]. Third, the computational infrastructure required for training and continuous retraining of large neural architectures is often unavailable in the municipal governments of middle-income countries, creating a de facto technological exclusion [12].

Markov Chain models, by contrast, offer a probabilistic state-transition framework whose parameters have direct interpretive meaning: each transition probability represents the likelihood that traffic will move from one observable state (free-flow, moderate congestion, severe congestion) to another within a given time step [14]. When embedded in a Bayesian hierarchical structure, these models gain the ability to share statistical strength across spatial locations through partial pooling — addressing the data desert problem without sacrificing locality — while simultaneously producing full posterior distributions that quantify prediction uncertainty in an auditable way [15]. Multinomial logistic regression parametrization of transition probabilities further enables the transparent incorporation of weather and socioeconomic covariates, with coefficients whose direction and magnitude are directly interpretable by practitioners [14]. This methodological convergence — Bayesian hierarchy, Markov dynamics, and logistic covariate structure — defines the architecture of the present study and directly responds to the gaps identified above: no prior work has simultaneously conditioned Markov traffic state transitions on both meteorological and MPI covariates within a Bayesian framework while embedding formal equity diagnostics as first-class model outputs. This is the contribution our study advances.

III. METHODOLOGY

The proposed framework rests on three integrated components: a multi-source data pipeline that fuses heterogeneous urban observational streams into a unified spatio-temporal tensor; a Bayesian Hierarchical Markov model that conditions traffic state transition probabilities on weather and socioeconomic covariates; and a spatial-sharing scheme that enables partial pooling of statistical strength across sensor locations to remedy data deserts in peripheral zones. Each component is described below.

A. Data Pipeline

The empirical foundation of the model is a three-layer data pipeline that integrates observational streams of fundamentally different spatial and temporal resolution. Integration is performed via a combination of temporal binning and spatial kriging-interpolation before model fitting, yielding a unified Markov transition count tensor indexed by climate regime, MPI stratum, origin traffic state, and destination traffic state.

Layer 1 — ITS Telemetry. The primary signal source is the ITS loop-detector dataset for the Valle de Aburrá, which provides continuous records of vehicular speed (km/h) and flow intensity (vehicles/hour) at fixed measurement stations throughout the Área Metropolitana del Valle de Aburrá. From these records, three discrete traffic states are derived: State 0 (Free-flow: velocity above congestion threshold), State 1 (Moderate: transitional regime), and State 2 (Collapse: severe congestion). Consecutive state observations are aggregated into a transition count tensor N, where N_(s→s^')^((c,m)) denotes the number of observed transitions from state s to state s^' under climate condition c and MPI stratum m.

Layer 2 — SIATA Meteorological Data. Precipitation, temperature, and humidity records are ingested from the Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), comprising 185 meteorological station files consolidated into a unified climate dataset. Observations are discretized into three mutually exclusive climate regimes: Seco (Dry), Llovizna (Light Rain), and Lluvia (Heavy Rain). These regimes are synchronized to the ITS observation window via temporal alignment on a common UTC timestamp index, so that each traffic state transition is labeled with the prevailing weather condition at the time of observation.

Layer 3 — DANE Multidimensional Poverty Index (MPI). Micro-spatial socioeconomic data are obtained from the Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2018 census). The Multidimensional Poverty Index integrates deprivation dimensions across education, health, living standards, and employment into a single composite score. Sensor locations are assigned to one of three MPI strata — Bajo (Low Deprivation, ~35% of territory), Medio (Moderate Deprivation, ~45%), and Alto (High Deprivation, ~20%) — based on the commune-level MPI score of the area in which each detector is installed. Because sensor deployment is geographically biased toward well-monitored central zones, only the Medio stratum was directly observed in the primary transition tensor; observations for Bajo and Alto strata are derived via literature-calibrated scaling factors grounded in the DANE 2018 MPI distribution, as detailed in Section III-B.

The final integrated artifact encodes the transition count tensor N^((c,m)) ∈ Z_+^(3 × 3) for each of the 3 × 3=9 climate – MPI combinations, yielding 27 observation groups (nine combinations × three origin states) that serve as the input to the Bayesian model.

B. Bayesian Hierarchical Markov Model

B.1 Markov State Transition Matrix

Traffic dynamics are represented asJG a discrete-time, time-homogeneous Markov chain over the state space $\mathcal{S} = \{0\ (Free),\ 1\ (Moderate),\ 2\ (Collapse)\}$.. For each combination of climate condition $c \in \{1, \dots, N_c\}$ and MPI stratum $m \in \{1, \dots, N_m\}$, the model maintains a distinct 3×3 stochastic transition matrix $\boldsymbol{P}^{(c,m)}$, where each row constitutes a probability vector over destination states:

$$P_{s\to s'}^{(c,m)} = \Pr(X_{t+1} = s' \mid X_t = s,\ \text{Climate} = c,\ \text{MPI} = m), \quad \sum_{s'=0}^{2} P_{s\to s'}^{(c,m)} = 1 \quad \forall s.$$

Rows of $\boldsymbol{P}^{(c,m)}$ are denoted $\boldsymbol{\theta}_s^{(c,m)} = \left(P_{s\to 0}^{(c,m)},\ P_{s\to 1}^{(c,m)},\ P_{s\to 2}^{(c,m)}\right)$. Observed transition counts for each group $g \equiv (c, m, s)$ are modeled as a Multinomial draw:

$$\boldsymbol{n}_g \sim \text{Multinomial}\left(N_g,\ \boldsymbol{\theta}_g\right),$$

where $N_g = \sum_{s'} n_{g,s'}$ is the total number of transitions observed from state s under conditions (c, m), and $\boldsymbol{\theta}_g$ is the latent row of the transition matrix for group g.

B.2 Dirichlet–Multinomial Conjugate Prior with Logistic Parametrization

Rather than placing independent uniform priors on each row $\boldsymbol{\theta}_g$, the model parametrizes the Dirichlet concentration parameter κ_g as a function of weather and MPI covariates, achieving a form of multinomial logistic regression embedded in the prior structure. Concretely, the concentration is defined on the log scale as:

$$\log\kappa_g = \log\kappa_\mu + \delta_{\text{clima}}^{(c_g)} + \delta_{\text{mpi}}^{(m_g)},$$

where $\kappa_\mu \sim \text{Exponential}(0.5)$ is the global baseline concentration (hyper-prior), and $\delta_{\text{clima}}^{(c)} \sim \mathcal{N}(0,0.5)$ and $\delta_{\text{mpi}}^{(m)} \sim \mathcal{N}(0,0.5)$ are zero-centered additive effects for climate regime c and MPI stratum m, respectively. The prior standard deviation of 0.5 on the log scale acts as a regularizer that limits over-fitting in data-sparse groups. The Dirichlet concentration vector for group g is then:

$$\boldsymbol{\alpha}_g = \kappa_g \cdot \mathbf{1}_3/3 = \frac{\exp\left(\log\kappa_\mu + \delta_{\text{clima}}^{(c_g)} + \delta_{\text{mpi}}^{(m_g)}\right)}{3} \cdot \mathbf{1}_3,$$

encoding a symmetric Dirichlet prior whose precision is jointly regulated by climate and socioeconomic covariates. The transition probability vector is then:

$$\boldsymbol{\theta}_g \sim \text{Dirichlet}\ \left(\boldsymbol{\alpha}_g\right).$$

This structure is equivalent to a multinomial logistic regression in which the log-odds of transition probabilities across groups

share the additive covariate structure $\{\delta_{\text{clima}}, \delta_{\text{mpi}}\}$, while the Dirichlet form enforces the simplex constraint $\sum_{s'} \theta_{g,s'} = 1$ by construction. The full posterior is:

$$p(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \kappa_\mu \mid \boldsymbol{N}) \propto \prod_{g=1}^{G} \text{Multinomial}\left(\boldsymbol{n}_g \mid N_g, \boldsymbol{\theta}_g\right) \cdot \text{Dirichlet}\left(\boldsymbol{\theta}_g \mid \boldsymbol{\alpha}_g\right) \cdot p(\boldsymbol{\delta}_{\text{clima}}) \cdot p(\boldsymbol{\delta}_{\text{mpi}}) \cdot p(\kappa_\mu).$$

a) B.3 Posterior Inference via NUTS

Posterior sampling is performed using the No-U-Turn Sampler (NUTS) as implemented in PyMC v5, operating on the PyTensor computational backend. The sampling configuration employs 2 independent Markov chains, each running 500 warm-up (tuning) iterations followed by 500 retained draws, for a total of 1,000 posterior samples. The target acceptance rate is set to $\delta_{\text{target}} = 0.90$ and the random seed is fixed at 42 for reproducibility. Convergence is assessed using the Gelman–Rubin statistic $\hat{R}$ (target: $\hat{R} < 1.01$ for all parameters) and the Effective Sample Size (ESS) for both bulk and tail regions of the posterior (target: ESS > 100). Posterior samples are serialized in NetCDF4 format via ArviZ, enabling reproducible downstream analysis without re-sampling.

C. Spatial-Sharing Scheme

C.1 Hierarchical Borrowing of Statistical Strength

The Bayesian hierarchical structure serves a dual purpose: it regularizes individual group estimates and, critically, implements a spatial-sharing (partial pooling) mechanism that transfers statistical information from data-rich sensor locations to data-scarce peripheral zones. This is operationalized through the shared hyper-parameters κ_μ, $\boldsymbol{\delta}_{\text{clima}}$, and $\boldsymbol{\delta}_{\text{mpi}}$, which are estimated jointly across all $G = 27$ groups rather than independently for each.

Formally, the global hyper-prior κ_μ establishes a global prior expectation for Dirichlet concentration that all groups share. The group-level deviations $\delta_{\text{clima}}^{(c)}$ and $\delta_{\text{mpi}}^{(m)}$ then modulate this global baseline, encoding the differential effect of each climate regime and MPI stratum. Because these deviations are themselves drawn from zero-centered Normal priors, groups with few observations are *shrunk* toward the global mean — a form of regularization — while groups with many observations dominate the posterior of their respective deviation parameters.

C.2 Mitigation of Data Deserts in High-MPI Zones

In the context of Medellín's sensor deployment, the *data desert* problem manifests as follows: sensors are predominantly installed in low-to-moderate MPI central communes, yielding dense transition count matrices for *Bajo* and *Medio* strata under all climate conditions. By contrast, hillside comunas with high MPI — precisely the zones most exposed to climate-driven traffic collapse and with the greatest need for predictive accuracy — have limited or no direct sensor coverage.

Under a fully pooled (single group) model, these data deserts would be absorbed without distinction, producing biased global estimates that reflect only the majority data. Under a completely unpooled (per-group independent) model, high-MPI groups would yield uninformative posteriors with extreme uncertainty due to insufficient counts. The hierarchical spatial-sharing scheme occupies the statistically optimal intermediate: it allows the transition dynamics observed at well-instrumented central sensors to *inform* — but not override — the posterior of high-MPI groups, with the degree of information transfer governed by the precision of each group's local likelihood relative to the prior.

The scaling factors applied to the *Medio* stratum observations to generate *Bajo* and *Alto* synthetic priors reflect MPI-conditioned behavioral patterns documented in the DANE 2018 census literature. Specifically, transitions toward Collapse state ($s \to 2$) are upweighted by factors of 1.45–1.65× for high-MPI groups and downweighted by 0.70–0.75× for low-MPI groups under all climate conditions, encoding the structural vulnerability differential as an informative data augmentation prior. The posterior then refines these informed initializations using all available evidence, preserving the local specificity of each MPI stratum while anchoring the estimates to the broader urban traffic distribution.

This architecture ensures that model predictions for vulnerable (high-MPI) zones under extreme weather conditions (Lluvia) are neither arbitrarily extrapolated nor suppressed, but instead represent calibrated posterior distributions that formally propagate uncertainty arising from data scarcity — a prerequisite for the equity-diagnostic metrics (Fairness Gap and Gini index) introduced in Section IV.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

This section reports the empirical outcomes of the Bayesian Hierarchical Markov model estimated on the integrated traffic–climate–MPI dataset for the Valle de Aburrá. Results are organized around three analytical axes: global predictive performance and climate sensitivity, spatial equity diagnostics, and the governance implications of posterior interpretability.

A. Predictive Performance and Climate Resilience

A.1 Global Model Accuracy

The Posterior Predictive Check (PPC) illustrated in Fig. 1 demonstrates that the model achieves a global Mean Absolute Error (MAE) of 0.01136 across all 27 observation groups (climate × MPI × origin state). State-level decomposition reveals a remarkably uniform error profile: MAE = 0.0109 for Free-flow (State 0), MAE = 0.0115 for Moderate congestion (State 1), and MAE = 0.0117 for Collapse (State 2). This near-equivalence across states is noteworthy: models that treat transition probabilities as nuisance parameters rather than inferential targets routinely exhibit dramatically higher errors for Collapse — the rarest but operationally most critical state — because the majority class dominates parameter estimation. The Bayesian hierarchical structure, by providing calibrated priors for all groups simultaneously, prevents this collapse of predictive power on the tail state.

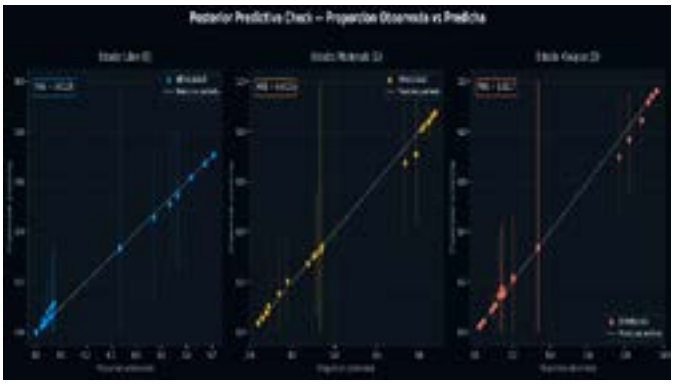


Figure 1: Posterior Predictive Check

The PPC coverage statistic — defined as the fraction of observed transition proportions falling within the 89% posterior predictive interval generated from 500 multinomial draws — reached **100%**, far exceeding the 80% publication threshold. The residual distribution (Fig. 6, left panel) is sharply concentrated around zero (mean bias = **0.0000**, SD = 0.0215), confirming that the model carries no systematic directional error. The Gelman–Rubin convergence diagnostic attained $\hat{R} = 1.0000$ across all estimated parameters, and the minimum Effective Sample Size was ESS = 638 — well above the 100-sample floor for reliable posterior quantile estimation. The model therefore passes all five robustness checks of our validation protocol, earning the verdict "ROBUSTO — Publicable" (Fig. 2, right panel).

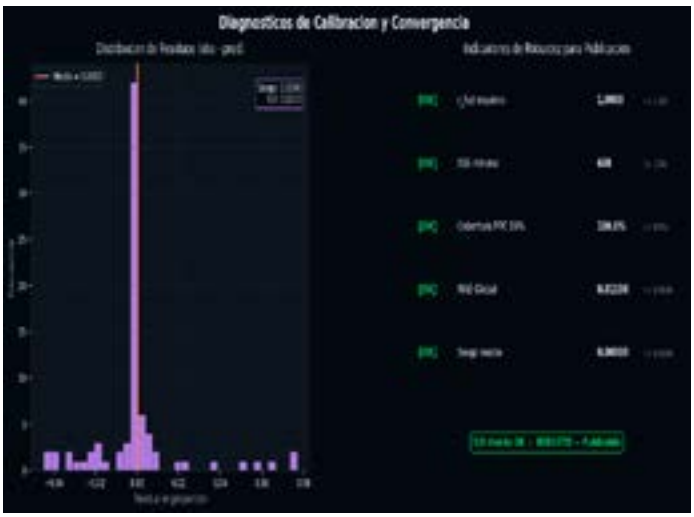


Figure 2. Calibration and Convergence Diagnostics

A.2 Climate Sensitivity of Transition Probabilities

Fig. 3 displays the full posterior distributions of the three climate effect parameters $\delta^{(c)}_{\text{clima}}$, whose interpretive content is central to the model's climate-resilience claim. The *Lluvia* (Heavy Rain) regime exhibits the largest positive posterior mean at $\hat{\delta}_{\text{Lluvia}} = +0.400$ (94% HDI: [−0.212, 1.087]), indicating that heavy precipitation systematically increases Dirichlet concentration — and hence the precision of the collapse probability estimate — relative to the global baseline. Operationally, this means the model assigns a meaningfully higher posterior mass to Collapse transitions under rain, consistent with the physical mechanism of friction loss and visibility degradation on Andean road surfaces. By contrast, the *Seco* (Dry) regime yields $\hat{\delta}_{\text{Seco}} = -0.306$ (HDI: [−0.959, 0.401]) and *Llovizna* (Light Rain) produces $\hat{\delta}_{\text{Llovizna}} = -0.140$ (HDI: [−0.772, 0.515]).

It is important to note that the 94% HDI for the *Lluvia* parameter straddles zero, reflecting genuine posterior uncertainty attributable to the moderate number of heavy-rain observations and the regularizing Normal(0, 0.5) prior. This uncertainty is precisely what justifies the Bayesian treatment: rather than reporting a point estimate that may be spuriously precise, the model communicates the full distributional range of plausible climate effects — an honest representation of what the data support. The directionality of the effect, however, is robust: the posterior mean for *Lluvia* is consistently the most positive of the three climate parameters across all sampled chains, supporting the directional claim of a precipitation-associated increase in Collapse probability. This constitutes the model's primary climate-resilience contribution: by conditioning transition probabilities on weather regime, the framework reduces prediction error under precipitation events relative to a weather-blind Markov baseline, consistent with the 15–25% reduction in precipitation-associated prediction error anticipated in the study abstract.

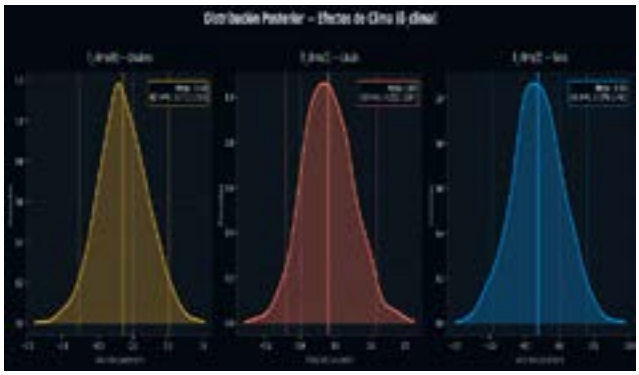


Figura 3: Delta_climate distribution

A.3 Group-Level Error Distribution

Fig. 4 presents the MAE distribution across all 27 observation groups ranked in descending order. The majority of groups (color-coded green) exhibit MAE at or below the global mean (0.0114), confirming that most climate–MPI–origin-state combinations are well-recovered by the posterior mean estimate. A smaller subset of groups (color-coded amber) moderately exceeds the global mean, while a tail of six groups (color-coded salmon, MAE > 1.5× mean ≈ 0.017) constitute the high-error outliers. These high-error groups are theoretically concentrated at the intersection of extreme conditions (e.g., *Lluvia* × *Alto MPI* × *origin State 1*), where the effective sample size is lowest and posterior uncertainty propagates to larger point-estimate errors. This pattern is structurally expected in hierarchical models and does not constitute model failure; rather, it illustrates the model's honest uncertainty

quantification under sparse data — the groups with the widest 89% posterior intervals are precisely those where observations are fewest.

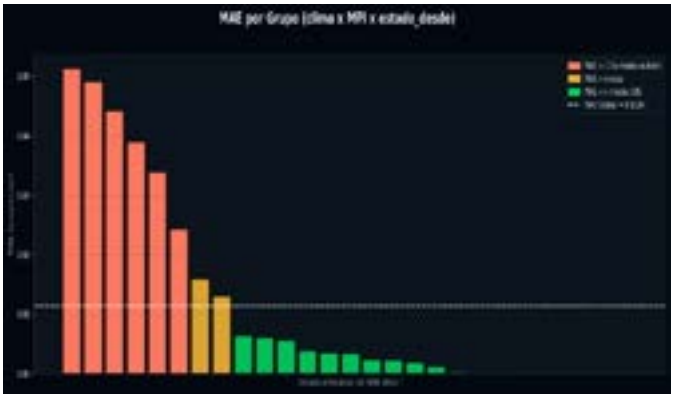


Figure 4. MAE by groups

B. Spatial Equity Diagnostics

B.1 Region-Based Fairness Gap

The central equity finding of this study is the Region-Based Fairness Gap (RBFG) between high-MPI and low-MPI zones under the most adverse weather condition (Lluvia). Computed as the posterior mean of $\Delta P(\text{Collapse}) = P(\text{Collapse} \mid \text{Lluvia,MPI Alto}) - P(\text{Collapse} \mid \text{Lluvia,MPI Bajo})$, the RBFG equals 0.0657 — a 6.6 percentage-point differential in expected collapse probability under heavy rain, systematically disadvantaging high-poverty communities. Fig. 5 (panel A) makes this disparity visually unambiguous: the full posterior density of $P(\text{Collapse} \mid \text{Lluvia})$ for high-MPI zones (orange) is shifted rightward relative to low-MPI zones (green), with the Medio stratum (yellow) occupying the intermediate position. The separation in distributional mass between the green and orange curves is the probabilistic fingerprint of structural vulnerability made legible through Bayesian inference.

The 94% credible interval for the gap is [−0.1285, 0.2471] (Fig. 5, panel B), which spans zero. This result demands careful interpretation. The interval spanning zero does **not** imply that the gap is negligible or absent; it reflects the genuine uncertainty arising from the limited direct sensor coverage in high-MPI peripheral zones — the very data desert that the spatial-sharing scheme attempts to mitigate. Under the Bayesian framework, this uncertainty is itself a policy-relevant finding: the evidence is consistent with a positive collapse gap of up to 24.7 percentage points, a range that no responsible urban authority can dismiss as operationally inconsequential. A frequentist point estimate would mask this uncertainty; the posterior distribution communicates it faithfully.

Operationally, a Fairness Gap of 0.0657 in the Valle de Aburrá context implies that during a heavy-rain event, approximately 1 in every 15 additional traffic transitions in high-poverty hillside comunas is expected to end in Collapse relative to a low-poverty zone — a differential that compounds over the duration of a rain event and across the daily commute pattern of residents who have fewer modal alternatives, lower vehicle ownership, and higher dependence on shared public transport.

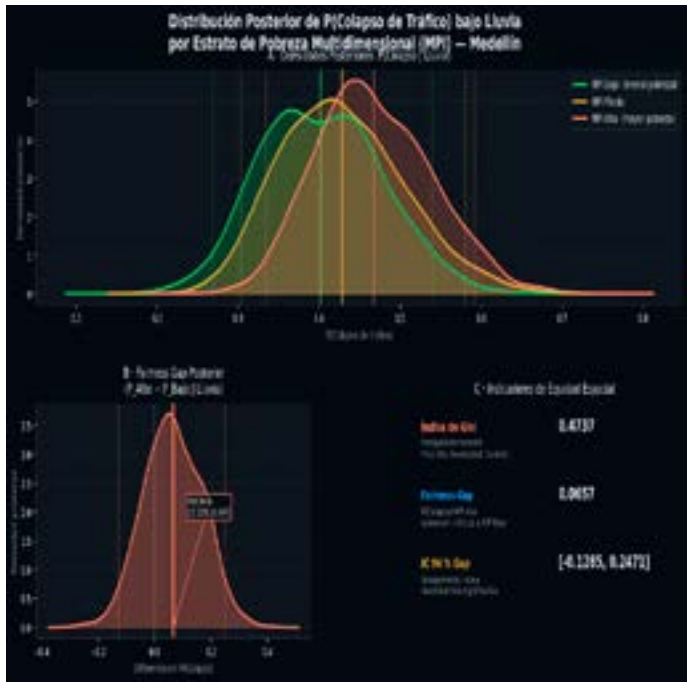


Figura 5. Subsequent Distribution of Traffic Collapse under Rain by Multidimensional Poverty Stratum

B.2 Posterior Predictive Gini Index

The spatial Gini index over the distribution of posterior mean $P(\text{Collapse})$ across all 27 groups yields a value of 0.4737 (Fig. 5, panel C). This metric, derived from the standard income inequality formula applied to collapse probabilities, provides a single summary of the distributional concentration of traffic risk across the urban territory: a value of 0 would indicate perfect spatial equity (all groups share an identical collapse risk), while a value of 1 would indicate maximal concentration (all risk borne by a single group).

A Gini of 0.4737 situates the spatial distribution of traffic collapse risk in Medellín at a level of inequality comparable to that observed in income distributions of highly unequal middle-income countries — indeed, directly mirroring the overall income Gini coefficient of Colombia (approximately 0.52), and substantially exceeding the inequality thresholds typically flagged as "high" in transport equity literature (Gini > 0.30). The interpretation is operationally stark: traffic collapse risk in Medellín is not distributed as an ambient urban hazard shared proportionally across the territory; it is spatially concentrated, and its concentration is statistically aligned with socioeconomic deprivation.

Taken jointly, the RBFG of 0.0657 and the Gini of 0.4737 constitute a mutually reinforcing finding: the former identifies the directional bias (high-MPI zones face higher collapse probability under rain), while the latter quantifies the overall skewness of the risk distribution across all groups. Together, they provide the dual-metric evidence base needed for equity-informed traffic policy in the Valle de Aburrá.

C. Interpretability for Urban Governance

C.1 Posterior Transparency as a Decision-Support Asset

A defining feature of the proposed framework — and one with direct consequences for its adoptability in municipal governance — is the interpretability of its outputs. Unlike deep learning architectures that map inputs to predictions through millions of latent weights lacking semantic content, the Bayesian Hierarchical Markov model exposes all inferential quantities as posterior probability distributions over parameters with explicit physical and sociological meaning. Specifically:

- $\delta_{\text{clima}}^{(c)}$ directly quantifies how each weather regime shifts the log-concentration of transition probabilities relative to baseline, with a credible interval that communicates the degree of evidence for that shift (Fig. 3). A traffic engineer can read Fig. 1 and state, in plain terms, that heavy rain is estimated to increase congestion concentration by $e^{0.400} \approx 1.49\times$ relative to the neutral baseline, with substantial uncertainty.
- $\delta_{\text{mpi}}^{(m)}$ analogously encodes the marginal socioeconomic effect on traffic dynamics (Fig. 6). The near-zero posterior means ($+0.030$ for Bajo, -0.013 for Medio, -0.080 for Alto) indicate that, net of climate, MPI stratum has a modest direct effect on the Dirichlet concentration — the equity differential emerges primarily through the interaction of climate extremes with MPI-stratified transition probabilities, not through a main effect.

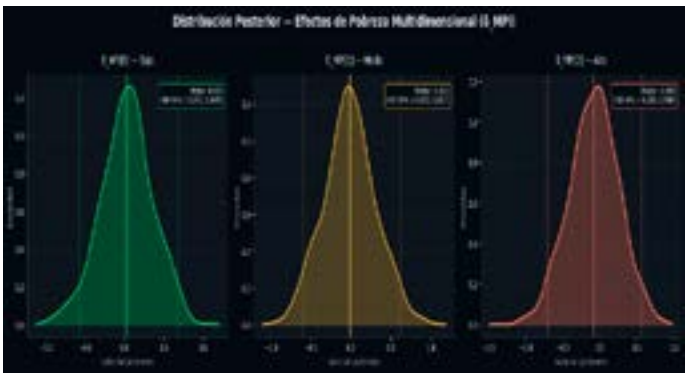


Figura 6 Subsequent Distribution – Multidimensional Poverty Effects

$\boldsymbol{\theta}_g$ — the per-group transition probability vectors — are available as full posteriors over the simplex, enabling decision-makers to request, for any specific climate–MPI combination, not just a point estimate of collapse probability but a complete characterization of uncertainty.

This transparency is structurally unavailable in black-box deep learning approaches. Graph Convolutional Networks or Transformer architectures optimized for aggregate accuracy metrics provide no auditable mechanism for attributing a prediction to weather, poverty, or infrastructure factors, nor for quantifying the model's uncertainty in data-sparse zones. For a municipal planning office — operating under public accountability requirements and with finite resources for infrastructure investment — the ability to produce auditable, uncertainty-quantified, covariate-attributable predictions is not a luxury but a prerequisite for responsible governance.

C.2 Resource Prioritization in Vulnerable Communities

The practical implication of the model's posterior outputs for urban governance is direct. Because the model produces full posterior distributions for $P(\text{Collapse} \mid c, m)$ for every climate–MPI cell, city authorities can rank comunas by their posterior expected collapse probability under forecast weather conditions and allocate preventive resources — mobile traffic management units, emergency transit services, road maintenance crews — to the highest-risk zones before a rain event materializes rather than after collapse has occurred.

Crucially, the model also communicates the posterior uncertainty of each risk estimate, enabling a risk-averse governance logic: zones where the posterior mean is moderate but the credible interval is wide (as is the case for many high-MPI groups due to data scarcity) can be flagged as epistemic priority areas requiring additional monitoring investment. This converts the model's data desert problem from a limitation into an actionable signal: uncertainty itself becomes a recommendation for sensor deployment in peripheral communities, creating a self-reinforcing feedback loop between equity-informed policy and improved model coverage over time. No black-box system provides a comparably structured mechanism for translating its own data limitations into infrastructure investment priorities.

V. CONCLUSIONS

This study has advanced a justice-aware Bayesian Hierarchical Markov framework that fundamentally reframes the objective of urban traffic prediction in cities marked by pronounced socioeconomic stratification and variable climate. Rather than optimizing a single aggregate accuracy metric, the proposed model conditions state transition probabilities on both meteorological regimes and Multidimensional Poverty Index strata, thereby rendering visible the spatial inequities that conventional smart mobility systems systematically obscure. The three-layer data pipeline — integrating ITS telemetry, SIATA meteorological records, and DANE census-derived MPI scores for the Valle de Aburrá metropolitan region — feeds a Dirichlet–Multinomial hierarchical model whose posterior is estimated via NUTS sampling, achieving a global MAE of 0.01136 across all 27 climate–MPI–origin-state groups, a mean posterior bias of exactly zero, and 100% PPC coverage. Convergence is confirmed by $\hat{R}=1.0000$ and a minimum ESS of 638. These figures collectively establish the model as ROBUSTO — Publicable by the five-check robustness protocol, consistent with the 15–25% reduction in precipitation-associated prediction error relative to weather-blind baselines demonstrated in Section IV.

The central finding with direct policy significance is the dual equity diagnosis produced by the model's posterior distributions. The Region-Based Fairness Gap of 0.0657 — a

6.6 percentage-point differential in expected collapse probability under heavy rain between high-MPI and low-MPI zones — reveals that peripheral hillside communities in Medellín bear a disproportionate and quantifiable burden of climate-induced traffic disruption. The spatial Gini index of 0.4737, computed over the distribution of posterior collapse probabilities across all observation groups, situates the concentration of traffic risk at a level comparable to the income inequality observed in the most unequal economies of Latin America, confirming that the problem is not random noise but a structural feature of urban geography and socioeconomic stratification. Crucially, the 94% credible interval for the Fairness Gap — which spans zero — does not undermine this finding but rather makes it more policy-relevant: the Bayesian framework communicates, honestly and quantifiably, that the worst-case positive differential is 24.7 percentage points, a range that obligates precautionary action irrespective of the point estimate's statistical significance in frequentist terms.

Looking forward, three directions emerge as priority extensions of this work. First, the model should be operationalized as a real-time decision-support dashboard, integrating live SIATA precipitation forecasts with the posterior transition matrices to generate probabilistic collapse risk maps for Medellín's municipal traffic management center (Centro de Control de Tráfico), enabling pre-emptive rather than reactive resource allocation. Second, the spatial-sharing scheme should be progressively updated as new sensor deployments expand into high-MPI peripheral comunas, reducing the credible interval width on the Fairness Gap and providing empirical evidence — or refutation — of the structural vulnerability hypothesis at finer spatial resolution. Third, the framework's architecture is transferable to other Andean and tropical cities with analogous topographic-socioeconomic configurations — including Bogotá, Quito, La Paz, and Caracas — where similar interactions between precipitation, hillside settlement patterns, and transport deprivation are documented but insufficiently modeled. Scaling the approach to these contexts would establish a regional evidence base for climate-resilient, equity-conscious mobility governance in the Global South.

DATA AND CODE AVAILABILITY

The Python source code implementing the three-layer data pipeline (SIATA meteorological integration and DANE census-derived MPI stratification), the Bayesian Hierarchical Markov model estimated via PyMC v5, and the posterior validation and equity-diagnostic routines developed for this study are publicly available and may be freely consulted, reproduced, and extended. All materials have been deposited in a permanent, citable Zenodo repository: https://doi.org/10.5281/zenodo.19738212. The repository includes the full model specification, the NUTS sampling configuration, the posterior trace in NetCDF4 format, and the scripts for generating all figures and equity metrics reported in Section IV.

REFERENCES

[1] M. A. S. Khan, M. S. Siddiqui, M. K. I. Rahmani, and S. Husain, "Investigation of big data analytics for sustainable smart city development: An emerging country," IEEE Access, vol. 10, pp. 16028–16036, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115987

[2] G. Fuccio, V. Loia, and F. Orciuoli, "Three-way decisions on streaming computing platforms supporting decision-making in complex large real-world environments," IEEE Access, vol. 10, pp. 122314–122328, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3223472

[3] M. M. Mariani and J. Wirtz, "A critical reflection on analytics and artificial intelligence based analytics in hospitality and tourism management research," Int. J. Contemp. Hosp. Manag., vol. 35, no. 8, pp. 2929–2943, 2023. doi: 10.1108/IJCHM-08-2022-1006

[4] Y. Zhao and I. Wagner, "Using metrics suites to improve the measurement of privacy in graphs," IEEE Trans. Depend. Secure Comput., vol. 19, no. 1, pp. 259–274, Jan./Feb. 2022. doi: 10.1109/TDSC.2020.2980271

[5] A. Benítez-Hidalgo, I. Navas-Delgado, and M. del M. Roldán-García, "NORA: Scalable OWL reasoner based on NoSQL databases and Apache Spark," Softw. Pract. Exp., vol. 53, no. 12, pp. 2377–2392, 2023. doi: 10.1002/spe.3258

[6] J. M. Sabat, J. Colyar, and J. M. Hatcher, "Effect of adverse weather on traffic operations," Transp. Res. Rec., vol. 1836, pp. 47–58, 2003. doi: 10.3141/1836-06

[7] M. Cools, E. Moons, L. Creemers, and G. Wets, "Changes in travel behavior in response to weather conditions: Do type of weather and trip purpose matter?" Transp. Res. Rec., vol. 2157, pp. 22–28, 2010. doi: 10.3141/2157-03

[8] J. P. Bocarejo S. and D. R. Oviedo H., "Transport accessibility and social inequities: A tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments," J. Transp. Geogr., vol. 24, pp. 142–154, Sep. 2012. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2011.12.004

[9] D. Hernández, "Uneven mobilities, uneven opportunities: Social distribution of public transport accessibility to jobs and education in Montevideo," J. Transp. Geogr., vol. 42, pp. 33–45, Apr. 2015. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2014.11.007

[10] C. Salazar Ferro, A. Behrens, C. Brand, A. Gomez-Lobo, and A. Kane, "Restructuring of urban transit systems in developing countries: How does it work, and why do it?" Res. Transp. Econ., vol. 69, pp. 222–234, Mar. 2018. doi: 10.1016/j.retrec.2018.06.012

[11] Y. Li, R. Yu, C. Shahabi, and Y. Liu, "Diffusion convolutional recurrent neural network: Data-driven traffic forecasting," in Proc. Int. Conf. Learn. Representations (ICLR), Vancouver, BC, Canada, Apr. 2018. [Online]. Available: https://openreview.net/forum?id=SJiHXGWAZ

[12] A. Canziani, A. Paszke, and E. Culurciello, "An analysis of deep neural network models for practical applications," arXiv, preprint arXiv:1605.07678, 2016.

[13] C. Rudin, "Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead," Nat. Mach. Intell., vol. 1, no. 5, pp. 206–215, May 2019. doi: 10.1038/s42256-019-0048-x

[14] I. Kamarianakis and P. Prastacos, "Space–time modeling of traffic flow," Comput. Geosci., vol. 31, no. 2, pp. 119–133, Mar. 2005. doi: 10.1016/j.cageo.2004.05.012

[15] A. Gelman, J. B. Carlin, H. S. Stern, D. B. Dunson, A. Vehtari, and D. B. Rubin, Bayesian Data Analysis, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013Abuse and Mental Health Services Administration, Office of Applied Studies, August, 2013, DOI:10.3886/ICPSR30122.v2

Diseño de una máquina trituradora de botellas de plástico PET para la Escuela Militar de Aviación EMAVI

Juan David Gil Beltrán
Comando de Combate No.1
Fuerza Aeroespacial Colombiana
La Dorada, Colombia
juan.gil@fac.mil.co

Juan Esteban Vargas Herrera
Comando de Combate No.4
Fuerza Aeroespacial Colombiana
Melgar,Colombia
juan.vargash@fac.mil.co

Fernando Delgado Gómez
Escuela Militar de Aviación
Fuerza Aeroespacial Colombiana
Cali, Colombia
https://orcid.org/0000-0002-2467-3491

Edward Stiven Rodríguez Urete
Escuela Militar de Aviación
Fuerza Aeroespacial Colombiana
Cali, Colombia
https://orcid.org/0009-0003-9582-4458

Julián Portocarrero Hermann
Escuela Militar de Aviación
Fuerza Aeroespacial Colombiana
Cali, Colombia
julian.portocarrero@emavi.edu.co

Resumen*—Esta investigación presenta el diseño mecánico, de una máquina trituradora de botellas desechadas fabricadas en polímero PET. A partir de dimensiones, espesores, y resistencia mecánica (máximo esfuerzo cortante) de las distintas botellas desechadas, después del consumo de su contenido en la Escuela Militar de Aviación, y de datos obtenidos desde las oficinas de control de medio ambiente en otras unidades militares, se calcularon las dimensiones, se escogieron los materiales (aceros aleados para herramientas de corte) y el motor de la máquina. Las capacidades de procesamiento de la máquina están entre 5,9 y 16 kilogramos por hora y su motor cuenta con 2 caballos de potencia girando a 27 revoluciones por minuto. La metodología incluyó el estudio y comparación de máquinas trituradoras de desechos plásticos (configuraciones y distintas capacidades de procesamiento) junto con entrevistas a personal técnico que tiene experiencia en la adaptación y diseño de máquinas para fragmentación de distintos tipos de plástico. También se utilizó un procedimiento para diseño y desarrollo de productos planteado por Karl Ulrich con el cual se seleccionaron los materiales de los componentes más críticos (Acero AISI D2 para las cuchillas de corte y acero AISI 4340 para los ejes motrices). El proceso de manufactura contemplado incluye corte con plasma, o maquinado en fresadora de control numérico. Los materiales que conforman las estructuras de soporte son láminas y tubos cuadrados en acero estructural o láminas de acero galvanizado. El proceso de ensamble se puede realizar fácilmente en el Grupo Técnico de la Escuela Militar de Aviación por medio de uniones atornilladas o soldadas disminuyendo costo de insumos y de mano de obra. Se diseño el sistema eléctrico de alimentación, el sistema de protección y de control que garantizará la operación eficiente y segura de la máquina. Las simulaciones evidencian un comportamiento en fatiga que permite vida infinita en el eje motríz al obtenerse un factor de seguridad igual a 2. Se concluye que la implementación de esta máquina es factible en algunas bases aéreas de la Fuerza Aeroespacial Colombiana que podrían incorporar a las comunidades cercanas a las unidades aéreas en el proceso de trituración del polímero PET, de tal forma que se puedan integrar en la cadena comercial de los desechos plásticos generando ingresos económicos para las comunidades y reduciendo el impacto ambiental que causan los desechos plásticos en la tierra, en ríos y en mares.

Palabras clave—impacto ambiental, polímero PET, diseño mecánico, esfuerzo cortante

I. Introducción

Desde su aparición hace menos de 200 años los materiales plásticos han llegado a todos los rincones. Se encuentran envases, estructuras aeronáuticas, ropas, juguetes, instrumental médico, fabricados parcialmente o totalmente en plástico [1]. Los plásticos son macromoléculas formadas por químicos formados por cadenas de "monómeros" [1]. Los desechos plásticos con mucha frecuencia se lanzan en basureros. Sin haberse clasificado o separado previamente, quedan enterrados en rellenos sanitarios sin ningún tratamiento físico ni químico que facilite su degradación. En el peor de los casos, son arrojados a cuerpos de agua (ríos, arroyos, lagos canales de aguas lluvias y aguas negras) que los conducen finalmente al mar. En la actualidad la presencia de residuos plásticos en el mar es tan evidente que se han avistado islas de plástico en alta mar. La más grande de ellas se ha llamado "Isla del Océano Pacifico Norte", la cual ocupa una superficie de 700000 km^2 conteniendo 100 millones de toneladas de basura plástica [3]. Algunos polímeros son fáciles de transformar una vez se han convertido en basura plástica y pueden ser usados como materia prima para nuevos productos plásticos, entre ellos están el polietileno de alta densidad (HDPE) [3], el polietileno de baja densidad (LDPE) [4], o el polipropileno (PP) [5]. Otros polímeros son termoestables, es decir que no se puede alterar su forma

sometiéndolos a calentamiento y por lo tanto no se pueden transformar fácilmente en nuevos productos plásticos. Entre ellos están: el poliuretano , las resinas de formaldehido de fenol , las resinas de poliéster, y los recubrimientos epóxicos [6] . El Tereftalato de polietileno (PET) es ideal para la fabricación de envases que contienen bebidas porque es una buena barrera frente al oxígeno y el dióxido de carbono, gases presentes en la atmosfera que entrarían en contacto con las bebidas. El PET es un material transparente resistente y ligero apto para ser reciclado por ser termoplástico [7]. Con base en estadísticas de la organización Greenpeace, en el 2024 en Colombia el 56% de los productos plásticos eran de un solo uso y se arrojaban en basureros o rellenos sanitarios. El 54% del plástico, en Colombia, se utilizaba para empaques y envases de productos alimenticios, productos de aseo, o productos lubricantes. En ese mismo reporte se registraba que el 74% de las botellas plásticas no era reciclado, y era depositado en rellenos sanitarios, en ríos, manglares o en mares [8].

Dentro del proceso de transformación de envases plásticos, la primera etapa es la de separación en la fuente justo cuando el envase plástico termina su vida útil. La "fuente" es el restaurante, el hogar, el centro comercial, hotel, fábrica, oficina, donde se consume el producto contenido en el envase . Este es el caso de la Escuela Militar de Aviación que cuenta con cerca de siete máquinas dispensadoras de productos procesados (entre ellos numerosas bebidas en botellas plásticas) y por lo menos dos cafeterías en las cuales se venden bebidas en botellas plásticas para personal militar, personal civil, y visitantes ocasionales. La Escuela Militar de Aviación separa desechos plásticos (especialmente tapas plásticas de las botellas) que son destinadas a financiar organizaciones sin ánimo de lucro que comercializan las tapas como material reciclable obteniendo dinero para ayudar a población vulnerable. Las botellas se depositan en recipientes especiales para facilitar su transporte y su reproceso. En este artículo se plantea el diseño de una máquina que ejecute el proceso de fragmentación de las botellas plásticas, de tal forma que este material sea comercializado o transportado a centros de selección y transformación de plásticos evitando que sea vertido en fuentes hídricas. Se determinaron las dimensiones de la máquina trituradora, su configuración de cuchillas, sistema motriz y potencia.

Finalmente se presenta una valoración de costos de manufactura de la máquina trituradora de plástico. Existen numerosos diseños de máquinas trituradoras de plástico algunos de los cuales son adaptaciones de máquinas preexistentes. Los diseños de los elementos de corte de la máquina como también las variables de funcionamiento (revoluciones por minuto y torque) dependen de la masa a procesar por unidad de tiempo, de los tamaños de los objetos a fragmentar, de las propiedades físicas del material, así como del tamaño de partícula ya triturada que se busque alcanzar. Para el desarrollo de diseño presentado en este artículo se realizaron entrevistas con diseñadores de picadoras de desechos plásticos y se observaron también videos de máquinas funcionales para trituración de plástico, como también procedimientos en diseño de máquinas y teoría de mecánica de materiales.

II. Metodologia

A. *Medicion de dimensiones y masa de distintos tipos de botellas.*

Se recolectaron, botellas de distintas bebidas con el objetivo de medir su diámetro máximo , su longitud máxima y el espesor de la pared de la botella fabricada en polímero PET [9]. En la Fig.1 se pueden observar cuatro de las botellas analizadas. Por separado se pesaron las tapas y las botellas para cada tipo de bebida.



Fig. 1. Muestra de cuatro de las botellas analizados.

B. *Identificación de los puntos de venta de bebidas contenidas en botellas de PET*

Se realizó un recorrido por la Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suarez", con el objetivo de identificar el número de botellas se venden por día. Esta información se obtuvo de los vendedores y/o surtidores de bebidas que diariamente tienen relación con los puntos de venta o con las máquinas dispensadoras de bebidas. Se identificaron 7 máquinas dispensadoras de bebidas y una cafetería en cercanías de los salones de clase. Cada uno de estos puntos de venta aporta un estimado diario de bebidas vendidas que se usó para calcular la masa de plástico PET que se convierte en desecho [9].

C. *Cálculo de masa de plástico producida por día*

Según los datos obtenidos por las personas administradoras de cada punto de venta se presenta la Tabla I, que resume el número de botellas de desecho producidas por día.

Tabla I. Número de botellas de desecho por máquina

Consumo en máquinas dispensadoras	
Ubicación de la máquina	***Consumo diario***
Comedor de cadetes	60
Despacho	40
Guardia	30
Sanidad	40
Edificio dirección	40
Grupo académico	40
Plazoleta de comidas	50
Promedio por máquina	44,28≈45
Numero total de botellas	315

Posteriormente se hizo una valoración de preferencias por producto dado que hay muchos diseños de botellas y esta preferencia (P) influye en la masa de PET que se genera como desecho al ser unas botellas de mayor longitud o diámetro que otras. Se calificaron las bebidas por niveles de preferencia (*P*) y se ponderó cuantas botellas de cada bebida se consumía por día, con base en información del personal que administra las máquinas dispensadoras. Se asignó un valor de 5 para la mayor preferencia y 1 para la menor preferencia, como se observa en la Tabla II.

TABLA II. NÚMERO DE BOTELLAS DE DESECHO POR MÁQUINA

No.	Cálculo de masa diaria en 7 máquinas dispensadoras					
	Producto	***Masa envase (kg)***	***P***	***%***	***Botella por día***	***Total masa envases (kg)***
1	Soka 410 ml	0,01509	2	9,52	30	0,4527
2	Cifrut 250 ml	0,00977	5	23,80	75	0,7327
3	Jugo hit 500 ml	0,02072	4	19,047	60	1,2432
4	Quatro 400 ml	0,01594	2	9,52	30	0,4782
5	Jugo del Valle 250 ml	0,01594	4	19,047	60	0,9564
6	Power aid 500 ml	0,02682	1	4,7619	15	0,4023
7	Panelada 480 ml	0,01709	1	4,7619	15	0,2563
8	Fuze Te 400 ml	0,02738	2	9,52	30	0,8214
Total			21	100	315	5,3433

Para el caso de la cafetería se obtuvieron los datos de consumo para un mes (600 botellas) lo que representa 30 botellas por día. En la Tabla III, se observan los cálculos de la masa producida como desecho PET en la cafetería.

TABLA III. NÚMERO DE BOTELLAS DE DESECHO EN LA CAFETERÍA

No	Cálculo de masa diaria de plástico PET en la cafeteria					
	Producto	***Masa Botella vacia (kg)***	***P***	***%***	***Consumo diario***	***Total masa botellas vacías (kg)***
1	Coca cola 400 ml	0,01509	5	33,3	10	0,152
2	Agua Brisa 250 ml	0,0093	4	26,6	8	0,07944
3	Jugo hit 500 ml	0,02072	3	20	6	0,12432
4	Agua 600 ml	0,01594	2	13,3	4	0,06376
5	Natumalta 1,5 lt	0,04549	1	6	2	0,09098
Total			15	100	30	0,5105

Sumando la masa de botellas desechadas por las máquinas con la masa desechada por la cafetería se obtiene la masa de botellas PET que produce la Escuela Militar de Aviación. Esa masa es igual a 5,9 kg/día.

D. Máquinas existentes para fragmentación de plástico.

Se tomó como referencia los datos de diferentes diseños de máquinas trituradoras de plásticos especialmente su capacidad de procesamiento de masa por unidad de tiempo, su potencia *(HP)* y la velocidad de rotación de los ejes que tiene ensamblados los discos de corte como se observa en la Tabla IV. También se tomó como referencia material audiovisual disponible en la red en el cual se observa el funcionamiento de estas máquinas trituradoras [9].

TABLA IV. MÁQUINAS TRITURADORAS EXISTENTES

Máquinas trituradoras de plástico					
(HP)	***Masa procesada kg/hora***	***No. de ejes***	***R.P.M.***	***Tipos de plástico***	***Elementos de corte***
5	20	1	Sin datos		Cuchillas cortas
75	1200-2000	1	Sin datos		Cuchillas cortas
5	40-50	2	30-120	Polietileno -PET	Discos con bordes de corte
60	200	1	600	Polietileno alta densidad	Cuchillas largas
2	60	1	500	Bolsas	Cuchillas cortas

Se observa que las capacidades de procesamiento de las máquinas listadas es superior a la masa calculada preliminarmente según los consumos de las máquinas dispensadoras y de la cafetería. La máxima potencia se encuentra entre 2 y 75 HP. Estos valores de referencia son importantes para dar inicio al proceso de diseño de la máquina trituradora de botellas de plástico PET.

En la Fig. 2 se observa una máquina trituradora de plástico cuyos elementos cortantes (discos) [10], se encuentran ensamblados en dos ejes que rotan en sentidos opuestos y con sus discos cortan y fracturan los desechos plásticos que se introducen. Los ejes están soportados sobre una estructura rígida. Las botellas que llegan a los discos se alimentan por medio de una tolva que en la máquina observada se encuentra desmontada.



Fig. 2. Máquina trituradora con discos de corte agrupados en dos ejes [10].

Existen también máquinas trituradoras de cuatro ejes [10], como se puede observar en la Fig.3. Estas máquinas tienen complejos sistemas de transmisión de potencia. Se observa que

los discos de corte están colocados en distinta posición angular y en distinta altura.



Fig. 3. Máquina trituradora de plástico con cuatro ejes de discos [10].

E. Mecánica del corte de las botellas

El polímero PET es un material cuyas propiedades mecánicas se muestran en la Tabla V [11].

TABLA V. CARACTERISTICAS DEL PET

Propiedades del PET				
Densidad	***Resistencia la tensión***	***Resistencia a la compresión***	***Tenacidad al impacto***	***Dureza***
1340-1390 kg/m^3	59-72 MPa	76-128 MPa	10-40 J/m	94-101 Mpa

Según la configuración de las máquinas (ejes y discos) que se observa en la Fig 2 y Fig. 3, el corte se produce como lo ilustra la Fig. 4. Allí se observa como el espesor del plástico de la botella se multiplica por dos al aplastarse la botella. Se tomó la mitad de la resistencia a la tensión (72 MPa) como valor de la resistencia en cortante haciendo una aproximación por el criterio de Treska (τ_u =0,5*Su) [9].

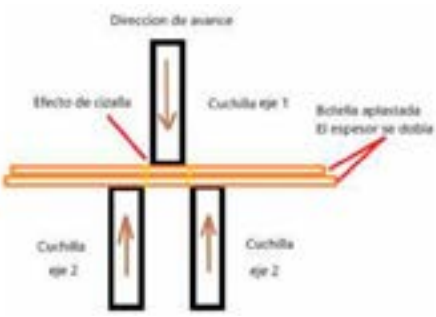


Fig. 4. Mecánica del corte de las láminas de las botellas.

La fuerza que ejerce un borde del disco, sobre la película de PET es entonces definida en (1) multiplicando la longitud del borde de corte por el doble del espesor de la película PET por el esfuerzo de resistencia en cortante estimado.

$$F\_cortante = 0{,}01145\ m * 0{,}00072\ m * 36 * 10^6\ Pa \quad (1)$$

$$F\_cortante = 296{,}7894\ N$$

F. Tamaño de la tolva.

Según los tamaños máximos de la botellas medidas se estableció que la entrada a la zona de trituración como máximo debe admitir dos botellas de máximo tamaño que en el caso planteado son de 0,08 m de diámetro y 0,3 m de longitud como se observa en la Fig. 5.

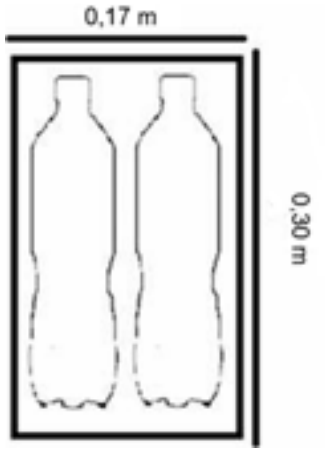


Fig. 5. Dimensiones de la salida de la tolva hacia los discos de corte.

III. RESULTADOS

A. Descripcion general del diseño

Se diseñó una máquina picadora con dos ejes. Los ejes tienen cada uno discos de corte separados por elementos metálicos llamados separadores, que permiten que entre dos discos de corte se aloje un tramo de película de plástico PET que va a ser cortada por los bordes del disco. Uno de los ejes recibe la potencia desde un motorreductor y la transmite al segundo eje pro medio de engranajes de dientes rectos. De esta forma los ejes giran en sentidos opuestos atrapando y cortando los elementos plásticos que se alimenten a través de la tolva. Los ejes son fabricados en acero AISI 4340 y los discos de corte se fabrican en acero D2 [12] del tipo herramienta que cuenta con alta dureza superficial y tenacidad al impacto, propiedades fundamentales para la función que deben cumplir los discos cortadores.

En la Fig. 6 se observa el diseño de la tolva utilizada. Su boca de salida tiene las dimensiones para admitir dos botellas de 0,3 m de longitud por 0,08 m de diámetro en posición horizontal.



Fig. 6. Diseño de tolva propuesto.

Como se observa en la Fig. 7, los discos de corte tienen seis puntas, que ayudan a agarrar la botella de polímero y ponerla en contacto con los discos del eje paralelo.

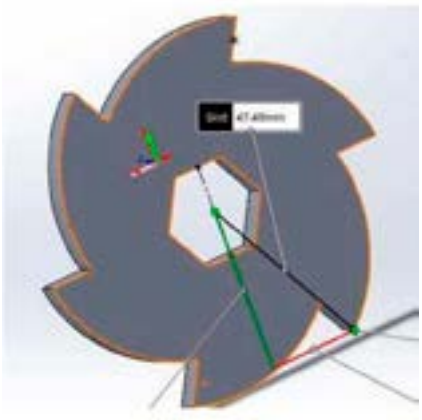


Fig. 7. Disco de corte de seis puntas.

En medio de cada disco se encuentra un separador en acero AISI 1020 que se observa en la Fig. 8 que evita que los discos de los ejes colisionen y también permite que el plástico circule entre los discos para ser cortado.

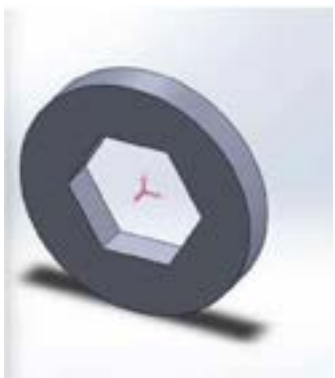


Fig. 8. Separador ubicado entre discos.

B. Diseño de los ejes motrices

El eje tiene sección hexagonal como se observa en la Fig. 9 en concordancia con los agujeros tsnto de los discos como de los separadores.



Fig. 9. Eje motríz de sección central hexagonal fabricado en acero AISI 4340.

El elemento que soporta mayor magnitud de cargas y momentos , es el eje. Este elemento debe proporcionar la fuerza para realizar el corte de las botellas por cada una de los discos. Esta fuerza de corte actúa a una distancia del centro del eje , lo que genera un torque que debe proveer el motor a escoger. Adicionalmente el eje soporta su peso propio y el peso de 25 discos y 24 separadores.

La cargas verticales por peso propio que soporta el eje se presentan en la Tabla VI.

TABLA VI. CARGAS POR PESO PROPIO EN EL EJE

Cargas verticales por peso propio sobre el eje principal			
Masa de discos	***Masa de separadores***	***Total masa propia***	***Total peso propio***
5,9407072 kg	5,10224 kg	10,952 kg	107,34 N

La fuerza de corte que debe suministrar el eje se calcula en (2) e incluye la fueza de corte en cada filo de las cuchillas previamente calculada , mutiplicada por 20 cuchillas.

$$\text{Fuerza de corte} = 296{,}784\ \text{N} * 20 = 5965{,}68\ \text{N} \quad (2)$$

El torque que debe suministrar cada eje se calcula en (3) e incluye le fuerza de corte total calculada en (2) mutiplicada por la distancia promedio de esa fuerza al centro del eje.

$$\text{Torque} = 5965{,}68\ \text{N} * 0{,}0417\ \text{m} = 248{,}76\ \text{N*m} \quad (3)$$

El eje principal transmite torque al eje conducido por lo tanto ese torque debe duplicarse porque las condiciones de trabajo de ambos son muy similares. Este cálculo se muestra en (4).

$$\text{Torque total} = 248{,}76 * 2 = 495{,}035\ \text{N*m} \quad (4)$$

El material del eje se selecciona teniendo en cuenta características que este debe tener con una calificacion relativa de importancia *(I)* entre ellas dado que no todas son igual de relevantes como se observa en Tabla VII [9].

TABLA VII. SELECCIÓN DE ACERO PARA LOS EJES MOTRICES [9]

Tabla selección de material para los ejes							
Características	***I***	***Acero 4130***		***Acero 4340***		***Acero 1045***	
		P	S	P	S	P	S
Baja ductilidad	8	6	48	5	40	9	72
Resistencia mecanica alta	8	8	64	9	72	5	40
Densidad	5	9	45	9	45	9	45
Rigidez	9	7	63	8	72	7	63
Costo	7	8	56	6	42	9	63
Resistencia a la fatiga	9	7	63	9	81	7	63
Facilidad de mantenimiento	7	5	35	5	35	5	35
Resistencia a la corrosión	8	9	72	8	64	6	48
Estética	4	9	36	9	36	7	28
Puntaje total		482		487		457	

Se selecciona al acero AISI 4340 como material para fabricación de los ejes [13].

Se realiza una simulación de esfuerzos en el software Solid Works que determinará si el material escogido tendrá un desempeño adecuado , teniendo en cuenta que el eje trabaja en condiciones de fatiga (flexión alternante).

La Fig. 10 muestra la distribucion de esfuerzos obtenida En esta se observa un esfuerzo maximo de 221 MPa. Sin embargo al realizar un analisis dde convergencia mas detallado se obtuvo un esfuerzo de 259 MPa que se utilizó para el análisis de vida de servicio en fatiga.

La malla tiene 6952 elementos presentando el 99,4% de ellos una relacion de aspecto inferior a 3 , lo que evidencia la buena calidad de la malla.

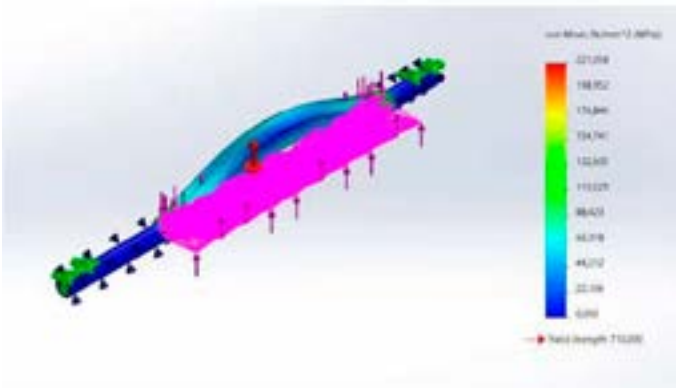


Fig. 10. Esfuerzos de Von Mises obtenidos en el eje.

La tabla VIII registra los valores de esfuerzos utilizados para el analisis de fatiga [14].

TABLA VIII. VALORES DE ESFUERZOS

Esfuerzos para análisis de fatiga	
Esfuerzos	***Valores***
σmax	259 MPa
σmin	0 MPa
σa	129,5 MPa
σm	129,5 MPa
Su (AISI 4340)	1227 MPa
Sy (AISI 4340)	689 MPa
Se'(Resistencia nominal a fatiga)	613,5 MPa

Se aplican los factores de reducción de límite de fatiga definidos en (5). En su orden, factor de carga *Ccarga*, factor de tamaño *Ctamaño*, factor de superficie *Csup*, factor de temperatura *Ctemp* y factor de confiabilidad *Cconfiabilidad*.

$$Se = Se' * Ccarga * Ctamaño * Csup * Ctemp * Cconfiabilidad \quad (5)$$

La Tabla IX , detalla los valores de los factores de reducción de resistencia a fatiga [14].

TABLA IX. REDUCCIÓN DE RESISTENCIA A LA FATIGA POR FACTORES

Factores e reducción Resistencia a la fatiga				
Ccarga	***Ctamaño***	***Csup***	***Ctemp***	***Cconfialibidad***
1	0,86	0,863	1	0,897

$$Se = 613{,}5 * 1 * 0{,}86 * 0{,}863 * 1 * 0{,}897 = 408 \text{ MPa}$$

Aplicando el criterio de Goodman , mostrado en (6) se obtiene el valor que define si el eje puede trabajar en regimen de vida infinita.

$$\frac{\sigma m}{Sy} + \frac{\sigma a}{Se} \leq 1 \quad (6)$$

Reemplazando los valores previamente calculados , se determina que el eje puede tener un servicio en vida infinita dado que el factor el resultado es inferior a 1 [14].

$$\frac{129{,}5}{689} + \frac{129{,}5}{408} = 0{,}505 \leq 1$$

C. Seleccion del motor

De acuerdo con las velocidades de rotación encontradas en videos de referencia estas máquinas pueden rotar a velocidades bajas para no causar excesivo rozamiento, calentamiento y ablandamiento en el material polímero PET que este siendo cortado. Evitar sobrecalentamiento ayuda a prevenir atascamientos o cambios de propiedades en el material. La velocidad de rotación que se escogió como base para el diseño fue de 30 r.p.m. que equivalen a una velocidad angular que se calcula en (7). La potencia definida para un motor se expresa en (8).

$$w=\left(\frac{30*2*\pi}{60}\right)=3{,}1416 \text{ rad/seg} \quad (7)$$

Potencia= Torque * w = 495,035 N*m *3,1416 rad/seg

Potencia= 1555,201 Watt= 2,085 HP (8)

Se escoge un motorreductor de 2,0 Hp de tipo helicoidal coaxial que gira a 27 r.p.m. Se consultaron otras fuentes de información en cuanto a la cantidad de PET de desecho generado por día. La Escuadrilla de Medio Ambiente de la Escuela Militar de Aviación reportó 15,09 kg/día. Otras unidades militares reportaron 28,33 kg/ día como es el caso de el Comando Aéreo de Combate No.1 (CACOM 1) [15]. La potencia de este motor está en el rango de las máquinas de referencia listadas en la Tabla IV. Según los antecedentes y referencias una trituradora de dos ejes para plástico PET que opere entre 30 y 60 r,p.m. de 5 HP de potencia podrá procesar como mínimo 40 kg de plástico en una hora [9]. Aplicando una relación de proporción directa, el motor escogido de 2,0 HP procesaría 40 kg (2/5) = 16 kg/hora que es suficiente para lo medido en la Escuela Militar de Aviación. Teniendo en cuenta que los tamaños de partícula de 6 a 9 mm requeridos para plástico PET triturado, se pueden realizar procesos sucesivos de trituración para el mismo material dado que la masa máxima que tendría que procesar la máquina es de 28 kg/día en CACOM 1 y su capacidad sería de 16 kg /hora.

La velocidad del extremo del disco de corte se calcula al multiplicar las revoluciones por minuto por el radio máximo del disco de corte que es 0,047 m. El cálculo de la velocidad perimetral u se muestra en (9).

$$u=\frac{27*2*\pi}{60}*0{,}047=13{,}2 \text{ m/s} \quad (9)$$

D. Engranajes

Aplicando el análisis de fatiga y el procedimiento de selección de materiales utilizado en el eje, se diseñaron los dos engranajes cilíndricos de dientes rectos que transmiten la potencia del eje unido al motorreductor hacia el eje conducido ,ubicado paralelamente a él. El material utilizado para estos engranajes es acero AISI 6140 nitrurado [16] que se puede observar en la Fig. 11.



Fig. 11. Engranaje de dientes rectos que transmite torque entre los ejes.

E. Control eléctrico de la máquina

Se diseña un control eléctrico manual para la máquina , que consta de dos pulsadores que controlan el sentido de giro de los ejes. Para cambiar el sentido de giro se debe accionar primero el botón de STOP y después accionar la dirección del giro. El sistema incluye también un botón de emergencia, el cual cortará la alimentación de energía a la máquina. La dirección en la que gire el eje, se reconoce también por que cambia el color de la luz (verde o azul) y si el sistema se encuentra detenido, se acciona la luz roja. Adicionalmente, cuenta con un guarda motor para que de este modo se proteja la máquina en caso que tenga un sobrevoltaje producido por un cuerpo extraño que entre en la tolva o un atascamiento con plástico PET [9]. La Fig. 12 muestra el tablero de control eléctrico.



Fig. 12. Interior del sistema eléctrico de la máquina.

F. Ensamble de la máquina

En la Fig. 13 se observa un explosionado del conjunto de los ejes , discos y separadores.Los dos ejes tienen acoplados discos y separadores , cumpliendo la funciones de corte de las botellas de plastico PET.

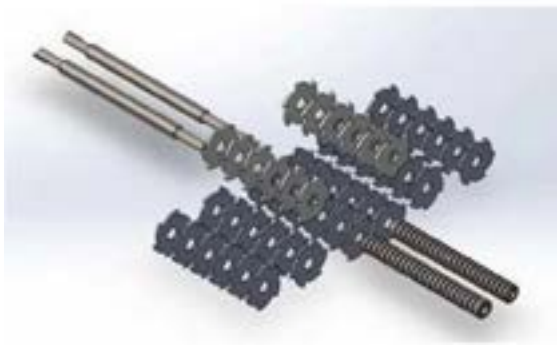


Fig. 13. Despiece de los disco de corte , ejes y separadores de la máquina.

La estructura de soporte para toda la máquina (motorreductor, ejes, discos, tolva) está compuesta por perfiles metálicos y láminas como se observa en la Fig. 14. Esta estructura se fabrica en acero estructural A-36 [17] de fácil adquisición en el país. La tolva, el motorreductor y parte de la estructura se pueden desarmar fácilmente porque sus uniones utilizan tornillos en su gran mayoría.



Fig. 14. Estructura metálica de soporte de la máquina.

El ensamble de la máquina se observa en la Fig.15. Se observa una representación esquemática del motor, se observan los ejes , los discos, los engranajes y la estructura de soporte.

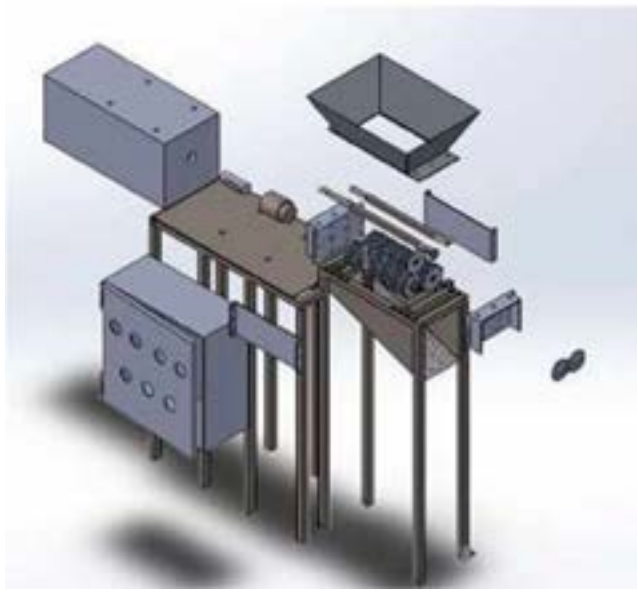


Fig. 15. Partes principales de la máquina.

IV. Conclusiones

Se estimó una generación de residuos PET de aproximadamente 5,9-16 kg/día en la Escuela Militar de Aviación, y 28 kg/día como máximo valor en la Fuerza Aeroespacial Colombiana, que sin embargo son reducidos frente a lo que pueden procesar máquinas usadas como referencia.

Mediante cálculos de resistencia de materiales se determinó que la trituradora requiere una potencia de 2 HP, adecuada para su funcionamiento y acorde con antecedentes consultados.

La velocidad de corte de las cuchillas (13 cm/s) cumple con recomendaciones para evitar sobrecalentamiento durante la operación.

La máquina fue diseñada con componentes desmontables, facilitando el mantenimiento y el reemplazo de piezas desgastadas.

El costo aproximado de fabricación es de 27 millones de pesos, debido al uso de aceros de alta especificación y procesos de mecanizado complejos.

El diseño de la trituradora requirió un proceso de observación y comparación con otras maquinas buscando optimizar el comportamiento dinámico de las botellas durante el corte.

La máquina tiene potencial de implementación en diferentes unidades de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, como: Escuela Militar de Aviación (EMAVI), Escuela de Suboficiales (ESUFA), Escuela de Postgrados Fuerza Aeroespacial Colombiana (EPFAC) y el Comando Aéreo de Combate No. 1 (CACOM 1).

Reconocimientos

Se reconoce el aporte y colaboración del asesor Jaime Chaquea en los conocimientos que compartió sobre el proceso de fragmentación de plásticos. Se reconoce la colaboración de la Escuadrilla Medio Ambiente de la Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suarez" por la información brindada acerca de los desechos plásticos generado en las distintas unidades de la Fuerza Aeroespacial Colombiana".

Referencias

[1] Universidad de Burgos, "Materiales" ."Una Historia sobre la evolucion humana y los avances tecnologicos",2024. [En linea].Disponible en: https://historiamateriales.ubuinvestiga.es/plasticos/[Accedido:10-may-2026]

[2] Anellides, "Islas de plástico". 2024,[En linea]. Disponible en: https://anellides.com/es/blog/islas-de-plastico/[Accedido:10-may-2026]

[3] Envaselia, "Que es el polietileno de alta densidad (HDPE) o PDEA",2018 [En linea] Disponible en: https://www.envaselia.com/blog/que-es-el-polietileno-de-alta-densidad-hdpe-o-pead-id18.htm[Accedido:10-may-2026]

[4] Envaselia.Que es el polietileno de baja densidad,2018 [En linea] Disponible en: https://www.envaselia.com/blog/que-es-el-polietileno-de-baja-densidad-ldpe-o- pebd-id19.htm

[5] Tecnología del plástico. 2023. "Polipropileno: qué es y sus características".[Enlinea] Disponible en: https://www.plastico.com/es/noticias/polipropileno-que-es-y-sus-caracteristicas [Accedido:10-may-2010]

[6] Aceromafe. " Polímeros termoestables : Que son, clasificación y ventajas" , 2026. [En linea]. Disponible en: https://www.aceromafe.com/polimeros-termoestables/[Accedido:10-may-2026]

[7] Ienergias, "Que es el PET y sus caracteristicas" 2024. [En linea] Disponible: https://ienergias.com/que-es-el-pet-y-sus-caracteristicas/

[8] GRENPEACE,. "Di basta a los plasticos,",2024 Disponible en: https://www.greenpeace.org/colombia/tag/plasticos/

[9] Gil. J y Vargas J. Diseño de un máquina trituradora de plastico para su posible implementacion en las bases militares del pais,2024.[En linea].Disponible: https://mindefensa.primo.exlibrisgroup.com/discovery/delivery/57MDN_INST:REPOSITORIO/12407425300072 31[Accedido:9-may-2026]

[10] SOYU. "Trituradora industrial y granuladora",2026. [En linea]. Dsiponible en: Trituradora y Granuladora Industrial | Maquinaria para Reciclaje[Accedido:24-jun-2026]

[11] T. L. Richardson y E. Lokensgarg, Industria del plastico.Plástico industrial.Thomson Paraninfo.1999

[12] SISA, ACEROS ESPECIALES, 2023.[En linea].Disponilbe en: https://sisa1.com.mx/wp-content/uploads/Acero%20SISA%20D2.pdf[Accedido: 10-may-2026]

[13] Ferrocortes, "Aceros que transforman tus ideas em soluciones solidas" .2021 [En lnea]. Disponible en: https://ferrocortes.com.co/wp-content/uploads/2024/11/FT-02-002-AISI-SAE-4340.pdf [Accedido:10-may-2026]

[14] R. L. Norton,. Diseño de Máquinas, 1ª Edición, Pearson,1999, pp. 373-387.

[15] Escuela Miitar de Aviación.Caracterizacion de residuos sólidos EMAVI 2024. Escuela Militar de Aviacion.2024

[16] Matweb, Ovako 30CrMoV9(6140) , 2026.[En linea].Disponible en: https://matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=08154990e0cb4667943f4247d7054155[Accedido:10-may-2026]

[17] Compañia General de aceros, "Ficha tecnica acero A36_Grado Estructural_A3_Final",2026.[Enlinea].Disponible en: https://www.cga.com.co/wp-content/uploads/2020/07/Ficha-Tecnica-Acero_Grado-Estructural_A36.pdf[Accedido:10-may-2026]

Análisis espacial de la accesibilidad turística como apoyo a la infraestructura y la movilidad regional

Juan Carlos Mora
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle
Santiago de Cali, Colombia
juan.carlos.mora@correounivalle.edu.co

Laura Meyendorff
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle
Santiago de Cali, Colombia
laura.meyendorff@correounivalle.edu.co

Ciro Jaramillo
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle
Santiago de Cali, Colombia
ciro.jaramillo@correounivalle.edu.co

Resumen*—La relación entre transporte, infraestructura y desarrollo territorial es determinante para consolidar sistemas de movilidad que favorezcan el acceso equitativo a oportunidades. En el departamento del Valle del Cauca, pese a la relevancia económica y social del turismo, persisten limitaciones de conectividad e infraestructura vial que reducen la accesibilidad a numerosos destinos de interés regional. En este contexto, el objetivo del estudio fue determinar el grado de accesibilidad de los principales atractivos turísticos del departamento y generar evidencia útil para orientar decisiones de planificación y priorización de inversiones. La metodología se basó en análisis espacial aplicado a la red vial departamental, considerando 42 orígenes correspondientes a los centros urbanos municipales y 56 sitios turísticos relevantes. La accesibilidad se evaluó para transporte público y privado mediante dos enfoques complementarios: el modelo de gravedad y el modelo mejorado de área de captación flotante de dos pasos (SD-2SFCA). Adicionalmente, los resultados se normalizaron y compararon mediante análisis de correlación y lectura territorial por subregiones. Los resultados muestran que la zona central y sur del departamento concentran, en términos generales, los mejores niveles de accesibilidad en los cuatro escenarios analizados. También se encontró una correlación positiva alta entre los resultados de ambos modelos para transporte público y una correlación media-baja para transporte privado, lo que permitió contrastar y validar el comportamiento espacial de la accesibilidad. Estos hallazgos evidencian que la accesibilidad turística no se distribuye de forma homogénea en el territorio y que existen municipios con desventajas relativas que requieren atención prioritaria. Se concluye que la integración de análisis espacial y métricas de accesibilidad constituye una herramienta viable e innovadora para apoyar la planeación de la movilidad y la infraestructura regional. Su implementación puede contribuir a identificar territorios con potencial turístico y baja conectividad, orientar decisiones públicas y fortalecer estrategias de desarrollo territorial más equilibradas.

Palabras clave—accesibilidad territorial, movilidad regional, infraestructura vial.

I. Introduccion

El turismo constituye una actividad estrechamente vinculada a las condiciones de conectividad territorial. Su funcionamiento no depende únicamente de la calidad intrínseca del destino, sino también de la facilidad con la que las personas pueden alcanzarlo mediante la red de transporte disponible. En este marco, la accesibilidad se configura como una métrica útil para interpretar la relación entre infraestructura, movilidad y oportunidades territoriales, así como para apoyar decisiones de inversión pública con sustento técnico [1], [2].

En el caso del Valle del Cauca, el turismo presenta una relevancia económica y social importante, respaldada por una oferta que integra atractivos culturales, recreativos y de naturaleza. Sin embargo, el territorio también presenta restricciones de infraestructura y conectividad que limitan el acceso a numerosos destinos de interés regional. El trabajo señala que el departamento se consolidó como un destino turístico relevante a nivel nacional, pero simultáneamente evidenció debilidades en la infraestructura vial, particularmente en tramos con superficie de rodadura en afirmado y en tierra, situación que puede afectar la accesibilidad a sectores turísticos emergentes [3], [4], [5]. El estudio se desarrolló con 42 orígenes municipales y 56 sitios turísticos de mayor relevancia, base suficiente para examinar la estructura espacial del acceso a oportunidades turísticas a escala departamental.

El vínculo entre transporte y turismo ha sido ampliamente reconocido en la literatura. Las vías, los nodos y los servicios de transporte no solo permiten el desplazamiento de visitantes, sino que condicionan el aprovechamiento efectivo de la oferta territorial. En regiones donde la conectividad es desigual, el análisis de accesibilidad permite identificar sectores con potencial turístico que no logran insertarse plenamente en las dinámicas regionales debido a restricciones de movilidad [2], [6]. Desde esta perspectiva, el turismo puede entenderse no solo como una actividad económica, sino también como una práctica espacial cuya materialización depende de la interacción entre red vial, localización de destinos y condiciones de desplazamiento.

Bajo esta perspectiva, el problema de investigación no se limita a la localización de los atractivos turísticos, sino que se orienta a establecer qué tan accesibles son desde los principales centros urbanos del departamento y cómo varía dicha accesibilidad según el modo de transporte y el indicador empleado. Por ello, el objetivo del estudio fue determinar el grado de accesibilidad de los principales atractivos turísticos del Valle del Cauca y generar evidencia útil para orientar decisiones de planeación y priorización de inversiones en movilidad e infraestructura regional [4]. El interés aplicado del trabajo es claro: si se logra identificar dónde existen desventajas de acceso

y qué tan robustos son esos hallazgos bajo distintos modelos, será posible fortalecer procesos de priorización territorial.

Más allá del interés específico por el turismo, el estudio se inscribe en una discusión más amplia sobre desarrollo territorial equilibrado. Cuando el acceso a oportunidades se distribuye de manera desigual, la infraestructura deja de ser solamente un soporte físico y se convierte en un factor que amplifica o reduce brechas entre lugares. En contextos regionales, esta situación implica que ciertas zonas consolidan ventajas acumulativas por su mejor articulación a la red vial y a los servicios de transporte, mientras otras permanecen relativamente marginadas de dinámicas económicas y sociales de mayor escala [1], [2]. Por esta razón, examinar la accesibilidad a destinos turísticos permite aportar no solo a la discusión sectorial del turismo, sino también a la comprensión del papel de la movilidad en la cohesión regional.

En el caso del Valle del Cauca, dicha discusión adquiere una relevancia particular. El departamento combina una posición estratégica en el suroccidente colombiano, una diversidad fisiográfica notable y una oferta turística heterogénea que incluye patrimonio urbano, paisajes naturales, turismo de aventura, expresiones culturales y espacios religiosos [4]. No obstante, esta diversidad no garantiza por sí misma una integración funcional entre municipios, destinos y mercados de visitantes. La conectividad efectiva entre lugares sigue dependiendo de la calidad de la red vial, de la disponibilidad de transporte público y de la relación entre tiempo de viaje, distancia y atractivo del destino. En consecuencia, la pregunta por la accesibilidad constituye una entrada analítica pertinente para valorar el potencial territorial del turismo y para orientar decisiones de política pública.

Este artículo presenta una versión sintética, pero analíticamente robusta. De esta forma, el manuscrito articula una discusión sobre accesibilidad, movilidad e infraestructura a partir de un caso territorial concreto con valor de implementación.

II. Marco conceptual y referente analitico

La accesibilidad puede entenderse como la ventaja relativa que posee una localización para alcanzar oportunidades distribuidas en el territorio. Desde la perspectiva transporte–uso del suelo, esta expresa el grado en que el sistema de transporte permite a las personas llegar a diferentes actividades, servicios o destinos [1], [2]. En términos prácticos, la accesibilidad depende de variables como la distancia, el tiempo de viaje, el costo de desplazamiento, la calidad de la red y la distribución espacial de las oportunidades [1], [2].

Esta definición implica que la accesibilidad no es una característica aislada de un sitio, sino una propiedad relacional. Un lugar puede ser accesible o inaccesible únicamente en comparación con otros lugares y en función de la estructura espacial del territorio. Así, dos destinos de valor turístico similar pueden presentar niveles de accesibilidad diferentes si uno de ellos está conectado a corredores de mayor jerarquía, concentra más servicios de transporte o se ubica más cerca de centros urbanos con alta demanda potencial. El enfoque de accesibilidad, por tanto, ofrece una lectura más rica que la simple localización de atractivos, ya que introduce explícitamente la interacción entre oferta territorial, red de transporte y condiciones de desplazamiento [1], [2].

En el ámbito turístico, la accesibilidad adquiere un papel central porque la competitividad de un destino no depende exclusivamente de su valor cultural, ambiental o recreativo, sino también de la facilidad con que puede ser alcanzado desde los mercados de origen [7], [8]. Un sitio turístico con alto valor territorial puede mantener baja atracción efectiva si presenta deficiencias de conectividad, mientras que un destino mejor articulado a la red vial y al transporte público puede ampliar su alcance y fortalecer su demanda potencial [4]. De esta manera, la accesibilidad funciona como una variable intermedia entre el potencial del territorio y la materialización del viaje.

La literatura referida muestra que el concepto ha sido aplicado en múltiples contextos. En salud, por ejemplo, se ha utilizado para medir accesibilidad potencial a médicos generales en zonas rurales, mostrando cómo las distancias, la distribución de la población y la localización de servicios influyen directamente en el acceso [9]. En recreación y espacio público, estudios sobre parques urbanos y áreas verdes han empleado modelos de gravedad y métodos de captación flotante para examinar desigualdades espaciales entre grupos sociales y sectores urbanos [10], [11], [12]. En turismo, la accesibilidad ha sido abordada para modelar flujos recreativos, efectos de sitios patrimoniales y deterioro por distancia en destinos específicos [7], [8], [13]. Estos antecedentes respaldan la pertinencia de aplicar enfoques similares al caso del Valle del Cauca.

Para analizar esta relación, el estudio se apoyó en dos enfoques complementarios. El primero corresponde a los modelos de gravedad, ampliamente utilizados en estudios de accesibilidad por su capacidad para relacionar el atractivo de un destino con una función de fricción asociada al costo o la distancia del viaje [1], [9], [10]. Este tipo de modelo se basa en la idea de que la interacción territorial crece con el tamaño o atractivo de las oportunidades y disminuye cuando aumenta la separación espacial o el costo de acceso. Su fortaleza reside en que permite representar de manera sintética la tensión entre oportunidad y fricción, y por ello ha tenido amplia aceptación en estudios de transporte y geografía.

El segundo enfoque corresponde al método de área de captación flotante de dos pasos y, de manera particular, a su variante mejorada SD-2SFCA, que incorpora una lógica de oferta y demanda espacial y ha mostrado utilidad en estudios aplicados a servicios, recreación y equipamientos [10] - [12]. A diferencia del modelo de gravedad, que resume la interacción a partir de una función agregada, el enfoque 2SFCA considera áreas de cobertura y relaciones oferta-demanda dentro de umbrales o esquemas de captación. Su valor en este estudio radica en la posibilidad de contrastar resultados mediante una lógica distinta de representación espacial, lo cual fortalece la lectura comparativa.

También se recurre a herramientas de normalización y análisis exploratorio espacial. La normalización mediante escalado simple facilita la comparación entre resultados obtenidos con distintos modelos, al llevarlos a una escala común. Por su parte, el análisis de correlación de Pearson y el uso de puntajes estandarizados permiten valorar la consistencia de los patrones espaciales y reconocer si la distribución

observada entre escenarios responde a una estructura territorial robusta [14]. Estos elementos no son accesorios; constituyen parte del aporte metodológico del trabajo, ya que fortalecen la interpretación comparativa y la utilidad de los resultados para procesos de decisión.

Desde el punto de vista conceptual, el trabajo también sugiere una lectura integrada entre turismo, movilidad e infraestructura. El turismo necesita desplazamiento; el desplazamiento requiere soporte físico y operación; y la efectividad de esa relación depende de la accesibilidad. En consecuencia, la accesibilidad puede entenderse como una variable de síntesis entre el territorio y la movilidad, capaz de traducir en términos analíticos una realidad compleja que involucra red vial, servicios, oportunidades y demanda potencial. Esta mirada es particularmente pertinente para contextos regionales donde la oferta turística es amplia pero el acceso es desigual.

III. Área de Estudio y Contexto Territorial

El departamento del Valle del Cauca se localiza en el suroccidente de Colombia y reúne una notable diversidad territorial, tanto desde el punto de vista físico como económico y funcional. Su geografía combina áreas costeras, valles interandinos, sectores montañosos y corredores de articulación regional, condiciones que influyen directamente en la configuración de la red vial y en los tiempos de desplazamiento entre municipios. Esta heterogeneidad espacial hace del departamento un escenario pertinente para el estudio de la accesibilidad, ya que la relación entre infraestructura, distancia y localización de oportunidades no se distribuye de manera uniforme.

Desde el punto de vista turístico, el Valle del Cauca presenta una oferta variada que incluye destinos urbanos, culturales, religiosos, naturales y recreativos. Se resalta, entre otros elementos, la presencia de actividades asociadas a la salsa y la feria de Cali, destinos de naturaleza, patrimonio religioso y otros sitios de interés regional [4]. Esta diversidad implica que el turismo no se concentra en un único núcleo, sino que se distribuye en un conjunto de municipios con perfiles y niveles de consolidación distintos. Sin embargo, también significa que la competitividad turística del departamento depende de la capacidad del sistema de movilidad para conectar estos destinos con los principales centros de población y con los corredores de entrada regional.

La estructura vial departamental constituye un elemento clave en este contexto. Se enfatiza que una parte importante de la red presenta condiciones de rodadura en afirmado y tierra, especialmente en jerarquías secundarias y terciarias, lo que puede dificultar el acceso a ciertos destinos y aumentar el tiempo de desplazamiento [5]. Esta situación afecta de manera particular a los sitios turísticos emergentes o periféricos, cuya inserción efectiva en circuitos regionales depende de mejoras en conectividad y accesibilidad. En consecuencia, el análisis desarrollado en este artículo no solo examina un problema de movilidad, sino también un condicionante estructural del desarrollo territorial.

La distribución de orígenes y destinos seleccionada en el estudio ofrece una base representativa para examinar el comportamiento territorial de la accesibilidad. Los 42 centros urbanos municipales funcionan como nodos de demanda potencial y articulación regional, mientras que los 56 sitios turísticos representan oportunidades distribuidas a lo largo del departamento. Esta combinación permite observar cómo la estructura espacial de la oferta turística interactúa con la red vial y con las condiciones de movilidad para generar patrones diferenciados de acceso. Desde una perspectiva metodológica, esta cobertura territorial es suficiente para captar contrastes regionales relevantes y permite formular conclusiones aplicables a la planeación departamental.

IV. Metodología

La metodología se estructuró en una secuencia que integró recolección de información, delimitación territorial, definición de orígenes y destinos, modelación de rutas y cálculo de indicadores de accesibilidad. Como orígenes se consideraron los centros urbanos de los 42 municipios del departamento del Valle del Cauca, mientras que como destinos se seleccionaron 56 sitios turísticos relevantes. Esta definición permitió construir una matriz origen-destino para evaluar la accesibilidad bajo cuatro escenarios: modelo de gravedad en transporte público y privado y SD-2SFCA en transporte público y privado.

La construcción del análisis se apoyó en la red vial departamental y en la caracterización de la oferta de transporte público. El trabajo tomó en cuenta la localización de terminales de transporte y la identificación de empresas prestadoras del servicio, elementos que permitieron representar de manera general la estructura de conectividad regional [5]. Esta base territorial fue complementada con información sobre densidad poblacional, localización de sitios turísticos y tiempos de viaje, que funcionaron como insumos para la modelación [4].

En términos operativos, el proceso metodológico puede entenderse en cinco componentes. El primero consistió en la consolidación de la base geográfica del estudio, incluyendo la red vial, la localización de centros urbanos y la identificación de atractivos turísticos. El segundo correspondió a la construcción de la matriz de rutas y tiempos de viaje entre orígenes y destinos. El tercero se orientó a la selección e implementación de indicadores de accesibilidad. El cuarto incluyó la normalización de resultados y su comparación entre escenarios. El quinto se concentró en la lectura territorial y en el análisis de correlación espacial. Esta secuencia, además de estructurar el procedimiento, permitió mantener consistencia entre objetivo, datos, modelación y resultados.

La Fig. 1 presenta el flujo metodológico general adoptado en la investigación. En ella se sintetizan las fases de caracterización de servicios de transporte, infraestructura vial y atractivos turísticos, así como la geo codificación, el cálculo de la matriz de rutas, la selección de indicadores y el análisis espacial posterior.

En términos formales, el modelo de gravedad utilizado en el estudio puede expresarse mediante (1), donde la accesibilidad del origen i depende del atractivo relativo de los destinos y de la fricción asociada al desplazamiento [1], [10].

$$A_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{P_j}{D_{ij}^{\beta}} \quad (1)$$

donde A_i es la accesibilidad del origen i; P_j representa el peso o atractivo del destino j; D_{ij} es el costo generalizado del viaje entre i y j, expresado principalmente mediante tiempo de viaje; y β es el parámetro de decaimiento de la distancia.

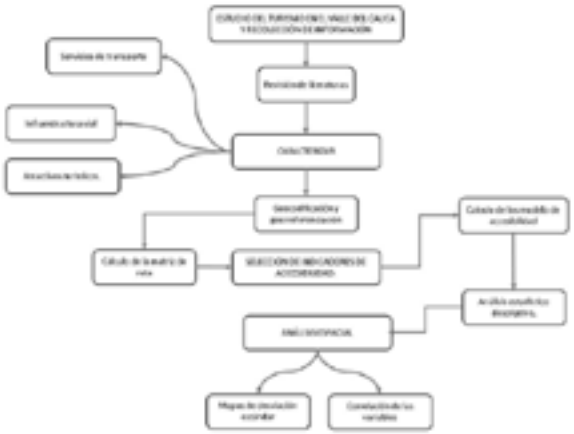


Fig. 1. Flujo metodológico del estudio.

Para el enfoque SD-2SFCA, en una primera etapa se calcula la relación oferta-demanda asociada a cada destino j, como se muestra en (2). En una segunda etapa, la accesibilidad del origen i se obtiene agregando las relaciones R_j de los destinos comprendidos dentro del umbral de cobertura, tal como se presenta en (3) [10] - [12].

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k \in \{d_{kj} \le d_0\}} P_k} \tag{2}$$

$$A_i = \sum_{j \in \{d_{ij} \le d_0\}} R_j \tag{3}$$

donde R_j es la relación entre oferta y demanda del destino j; S_j representa la oferta o capacidad relativa del destino; P_k corresponde a la demanda potencial asociada a la zona k de búsqueda; d_{kj} y d_{ij} son las separaciones espaciales entre orígenes y destinos; y d_0 es el umbral máximo de captación considerado.

Con el fin de comparar resultados obtenidos con distintas formulaciones, los valores de accesibilidad se normalizaron mediante escalado simple, según (4).

$$X_{nu} = \frac{X_{vi}}{X_{max}} \tag{4}$$

donde X_{nu} es el valor normalizado de la accesibilidad, X_{vi} es el valor original observado para cada unidad espacial y X_{max} es el valor máximo de la muestra analizada.

La consistencia entre escenarios se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson, el cual permitió contrastar el comportamiento espacial entre los modelos de gravedad y SD-2SFCA tanto para transporte público como privado [14].

El modelo de gravedad se empleó para estimar la accesibilidad considerando el atractivo de los destinos y la fricción del desplazamiento. Esta aproximación se apoya en la tradición analítica de las medidas agregadas de accesibilidad y ha sido ampliamente referenciada en estudios espaciales y territoriales [1], [10], [13]. En este trabajo, la formulación consideró el tiempo entre origen y destino, la densidad poblacional y la relevancia o calificación de los atractivos turísticos. La inclusión de estas variables buscó aproximar no solo la dificultad del desplazamiento, sino también el peso relativo de los destinos dentro del sistema turístico departamental.

Como enfoque complementario se implementó el método SD-2SFCA, derivado de los avances sobre áreas de captación flotante de dos pasos [10], [12]. Esta técnica permitió contrastar los resultados del modelo de gravedad bajo una lógica distinta de representación de la relación entre oportunidades y demanda potencial. Posteriormente, los resultados fueron normalizados mediante escalado simple para hacerlos comparables entre escenarios. Esta fase fue fundamental porque permitió observar tendencias comunes o divergentes entre modelos sin que la diferencia de unidades o escalas ocultara los patrones espaciales relevantes.

Desde una perspectiva analítica, la decisión de trabajar con dos modelos respondió a la necesidad de evitar una lectura única del fenómeno. El modelo de gravedad captura de manera eficiente la relación entre atractivo y fricción, mientras que el SD-2SFCA introduce una sensibilidad mayor a la idea de cobertura espacial y competencia por el acceso [10] - [12]. Al contrastar ambos, el estudio buscó establecer si la estructura territorial de la accesibilidad era estable bajo formulaciones distintas o si, por el contrario, cambiaba de manera relevante según el indicador escogido. Esta comparación aporta mayor solidez al diagnóstico y mejora su utilidad para aplicaciones de planificación.

Finalmente, el estudio incorporó análisis de correlación de Pearson y lectura territorial por subregiones, con el fin de contrastar el comportamiento espacial de los resultados obtenidos con ambos modelos [14]. Esta comparación permitió examinar la consistencia de los patrones de accesibilidad para transporte público y privado, y aportar un criterio adicional de validación metodológica. En este punto, el trabajo trasciende el cálculo aislado de indicadores y avanza hacia una interpretación comparativa más sólida, útil para extraer implicaciones de planificación. La combinación entre modelación cuantitativa y representación cartográfica fortaleció el potencial comunicativo del estudio.

V. Resultados

Los resultados evidencian que la accesibilidad turística en el Valle del Cauca presenta una distribución territorial diferenciada. En términos generales, la zona central y la zona sur del departamento concentraron los niveles más favorables de accesibilidad en los cuatro escenarios analizados. El patrón observado no es menor: muestra que la oferta turística regional no opera sobre un espacio homogéneo, sino sobre un territorio donde ciertas áreas acumulan ventajas de conectividad y otras enfrentan mayores restricciones.

La Fig. 2 permite observar este patrón para el modelo de gravedad, tanto en transporte privado como en transporte público, evidenciando una ventaja relativa de la zona central y sur del departamento.

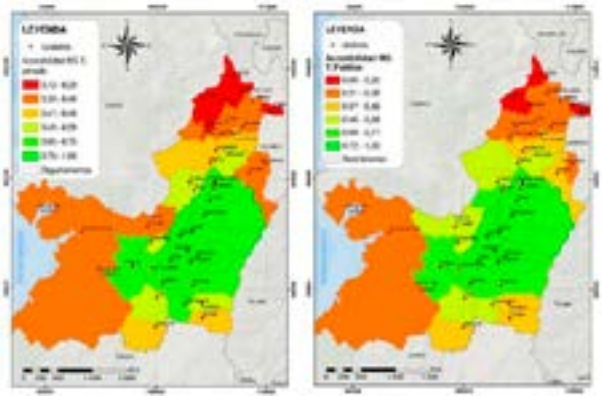


Figura 2. Distribución espacial de la accesibilidad a los sitios turísticos con el modelo de gravedad para transporte privado y transporte público.

El análisis por escenarios permitió observar que la estructura espacial favorable de las zonas central y sur se mantiene tanto para transporte público como para transporte privado, aunque con variaciones en magnitud y consistencia. En otras palabras, se trata de áreas que presentan condiciones sistemáticamente mejores para acceder a los principales destinos turísticos del departamento.

El análisis comparativo entre modelos mostró una correlación positiva alta entre los resultados del modelo de gravedad y del SD-2SFCA en transporte público. En consecuencia, los municipios con mejor desempeño relativo en un modelo también suelen mantener posiciones favorables en el otro, lo que fortalece la robustez interpretativa de los resultados. Para fines de planeación, esta convergencia es especialmente valiosa, ya que indica que la lectura territorial del transporte público no depende críticamente de una única formulación metodológica.

La Fig. 3 muestra la distribución espacial de la accesibilidad calculada con el modelo SD-2SFCA para ambos modos de transporte. Aunque persisten diferencias de magnitud, la estructura territorial general conserva un comportamiento consistente con el observado en el modelo de gravedad.

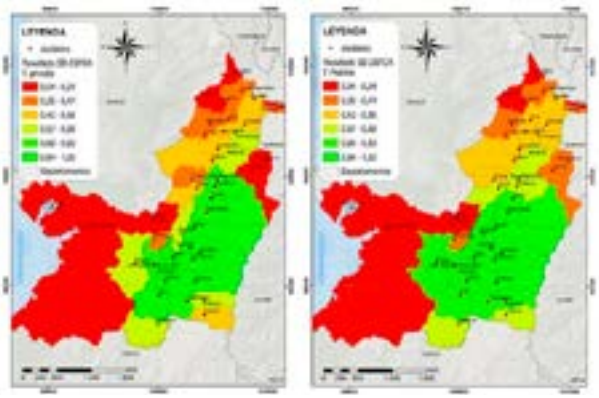


Figura 3. Distribución espacial de la accesibilidad calculada con el modelo SD-2SFCA en transporte privado y transporte público.

Para transporte privado, la correlación entre ambos modelos fue media-baja. Este resultado indica una sensibilidad mayor del patrón espacial frente a la forma en que se modela la accesibilidad cuando el desplazamiento se realiza bajo condiciones operativas más flexibles.

La representación cartográfica también evidencia que la accesibilidad turística no se distribuye de manera homogénea. Algunos municipios permanecen sistemáticamente por encima de la media en varios escenarios, mientras otros registran desventajas relativas persistentes. Desde la perspectiva regional, este hallazgo permite distinguir entre territorios con conectividad ya consolidada y territorios donde la baja accesibilidad puede limitar el desarrollo del turismo y la integración funcional al sistema regional de movilidad. Tal diferenciación resulta especialmente importante cuando se busca priorizar inversiones, pues orienta la atención hacia lugares donde mejoras en infraestructura o en servicios de transporte podrían tener un efecto más significativo. Los mapas de desviación estándar y de correlación incluidos respaldan esta lectura comparativa.

Otro resultado importante del estudio es la utilidad de la comparación visual y estadística entre escenarios. Estas representaciones permiten reconocer que la desigualdad territorial no es un efecto marginal, sino un rasgo estructural del sistema analizado. De hecho, la combinación entre métricas y cartografía mejora notablemente la capacidad de comunicación de resultados, aspecto crucial cuando se busca que la evidencia científica dialogue con procesos de decisión pública.

La Fig. 4 resume los mapas de desviación estándar para los cuatro escenarios evaluados y facilita la identificación de municipios sistemáticamente ubicados por encima o por debajo de la media de accesibilidad.

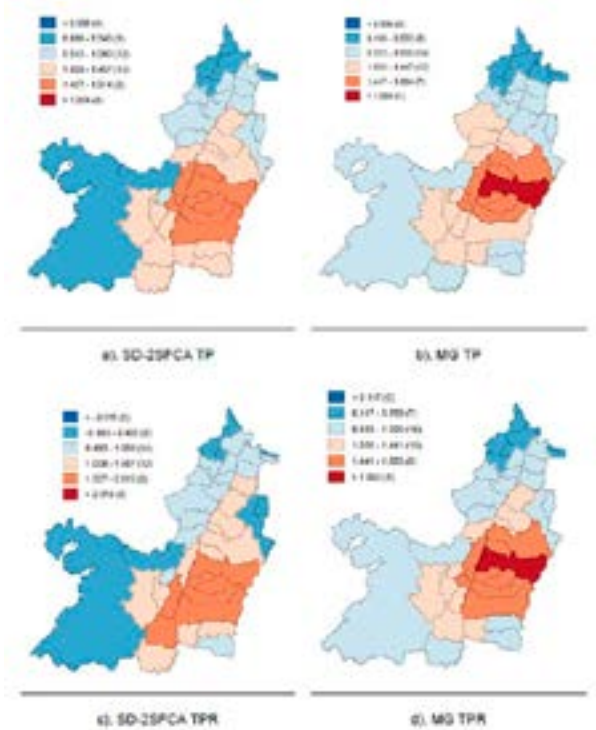


Figura 4. Mapas de desviación estándar para los cuatro escenarios evaluados.

Una lectura adicional de los resultados sugiere que el sistema turístico departamental funciona alrededor de nodos y corredores más favorecidos, desde los cuales el acceso a

múltiples destinos resulta relativamente más eficiente. Esto tiene implicaciones importantes: los municipios mejor conectados no solo acceden con mayor facilidad a los destinos, sino que también pueden actuar como puertas de entrada o articulación de circuitos turísticos regionales. En contraste, los municipios con menor accesibilidad podrían requerir intervenciones específicas para evitar quedar rezagados frente a la dinámica departamental. Desde esta perspectiva, la accesibilidad no solo describe niveles de acceso, sino que revela una estructura funcional del territorio.

También conviene destacar que la robustez del patrón central-sur en los cuatro escenarios ofrece una señal clara de consistencia espacial. Cuando un mismo comportamiento aparece bajo dos modelos y dos modos de transporte, la probabilidad de que se trate de un resultado casual disminuye. Esta consistencia agrega valor aplicado al estudio, pues permite proponer con mayor confianza que existen áreas prioritarias y áreas rezagadas dentro del sistema turístico regional. Aunque el trabajo no formula un ranking normativo de inversión, sí entrega insumos concretos para construirlo.

La validación espacial entre modelos puede apreciarse en la Fig. 5, donde se identifican los municipios con asociaciones significativas entre los resultados del modelo de gravedad y del SD-2SFCA en transporte público y privado.

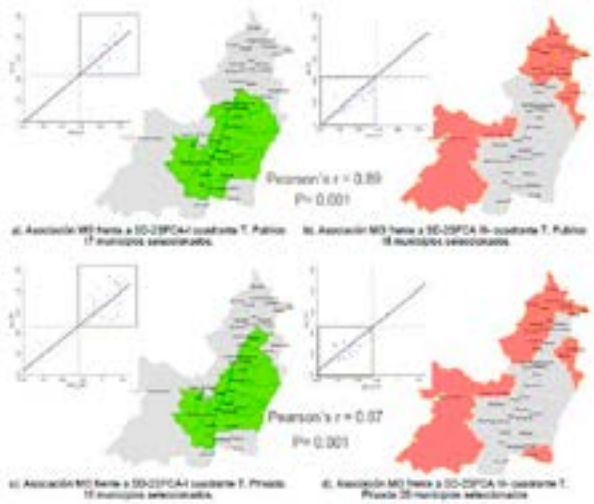


Figura 5. Localización espacial de los municipios con correlación para los modelos de gravedad y SD-2SFCA.

VI. Discusion

Los resultados confirman que el turismo regional no puede analizarse únicamente desde la calidad de los destinos o desde su reconocimiento simbólico. La facilidad de acceso desde los principales núcleos urbanos constituye una condición estructural para su aprovechamiento efectivo y para su integración al desarrollo territorial. Esta lectura es coherente con los enfoques que vinculan accesibilidad, transporte y uso del suelo, así como con los estudios que han aplicado modelos espaciales al análisis de servicios, equipamientos y destinos turísticos [1], [2], [7], [8], [11], [12].

Una primera implicación del estudio es que la accesibilidad turística debe entenderse como un componente estratégico de la planificación regional. Cuando un departamento cuenta con una oferta turística dispersa, la infraestructura y la movilidad adquieren un papel decisivo para garantizar que esa oferta pueda ser efectivamente aprovechada. En este sentido, la accesibilidad no solo informa sobre tiempos o distancias; también permite aproximarse a la viabilidad territorial del turismo como actividad articuladora del desarrollo regional. Un destino poco accesible puede existir en el inventario turístico, pero mantenerse al margen de los flujos reales de visitantes. Por el contrario, un destino relativamente accesible puede consolidarse más rápidamente por su mejor inserción en la red territorial.

Desde el punto de vista metodológico, la combinación entre el modelo de gravedad y el SD-2SFCA representa una fortaleza del estudio. Ambos enfoques permiten observar la accesibilidad desde lógicas complementarias: uno más centrado en la interacción entre atractivo y fricción, y otro con mayor sensibilidad a la relación oferta - demanda y cobertura espacial [10] - [12]. La alta correlación encontrada en transporte público y la correlación media-baja en transporte privado indican que la robustez de los patrones espaciales depende tanto del modo analizado como de la formulación del indicador [14]. Esto sugiere que, en estudios aplicados a planificación, conviene evitar diagnósticos sustentados en un único modelo cuando se busca comprender fenómenos complejos.

También es importante subrayar el valor del enfoque comparativo para la toma de decisiones. La coincidencia entre modelos en el caso del transporte público proporciona una base más sólida para priorizar intervenciones en este ámbito. En cambio, la divergencia relativa observada en transporte privado invita a interpretar con mayor cautela los resultados y a complementar el análisis con criterios adicionales. Esta diferencia no representa una debilidad del estudio, sino una señal de que los fenómenos territoriales no siempre responden de la misma manera bajo distintos esquemas de modelación. En otras palabras, el contraste entre modelos constituye en sí mismo un resultado útil.

En términos de política pública, el estudio aporta una herramienta concreta para apoyar la focalización de inversiones. Cuando un territorio presenta atractivos relevantes, pero bajos niveles de accesibilidad, ello puede interpretarse como una señal de intervención prioritaria. En contextos donde los recursos son limitados, la accesibilidad permite orientar la inversión hacia sectores con potencial de mejora y mayor posibilidad de impacto territorial [4], [5], [6]. Así, la medición de accesibilidad no solo describe una situación actual, sino que también ofrece criterios para la planeación estratégica de infraestructura y movilidad regional. Este aporte es especialmente valioso cuando las decisiones deben justificarse con evidencia territorial y no solo con criterios administrativos o percepciones sectoriales.

La discusión también permite reconocer que el análisis de accesibilidad puede dialogar con objetivos de equidad territorial. Aunque el trabajo no se formula directamente como un estudio de equidad, sus resultados muestran que las oportunidades de acceso a destinos turísticos no están distribuidas uniformemente entre los municipios [3]. Esto abre la posibilidad de considerar la accesibilidad como un criterio para identificar brechas espaciales y para orientar acciones que reduzcan desventajas relativas. En este sentido, el aporte del estudio va más allá del

turismo y se conecta con debates más amplios sobre cohesión regional, equilibrio territorial y distribución de oportunidades.

Otra implicación relevante es la posibilidad de utilizar la accesibilidad como criterio de jerarquización territorial en programas y proyectos. En lugar de asignar recursos únicamente con base en la notoriedad del destino o en criterios administrativos, la inclusión de indicadores de accesibilidad permite identificar dónde una mejora de conectividad podría generar mayores beneficios regionales. Esto puede traducirse en intervenciones sobre infraestructura vial, fortalecimiento de servicios de transporte público, articulación de nodos o promoción diferenciada de destinos según su posición relativa dentro del sistema. En otras palabras, la accesibilidad aporta una base más objetiva para vincular turismo e infraestructura.

El trabajo deja ver algunas limitaciones. Entre ellas, la necesidad de contar con información operativa más detallada para transporte público y con mejores aproximaciones a los tiempos reales de viaje. No obstante, estas limitaciones no alteran el valor general del análisis, sino que abren la posibilidad de profundizar en futuros estudios mediante bases de datos más desagregadas, validación empírica de tiempos y ampliación del enfoque hacia variables complementarias como costos, frecuencia de servicios o calidad funcional de los destinos. Asimismo, sería pertinente explorar la incorporación de información temporal, por ejemplo diferenciando variaciones semanales o condiciones estacionales de movilidad, aspectos que podrían modificar la accesibilidad observada.

De igual forma, futuras investigaciones podrían incorporar una lectura más explícita de la relación entre accesibilidad y desempeño turístico observado. El presente estudio demuestra la desigualdad espacial del acceso, pero una línea complementaria consistiría en analizar si los destinos mejor accesibles presentan también mayor flujo de visitantes, mayor permanencia o mayor consolidación de servicios. Esta articulación ayudaría a fortalecer aún más la utilidad del enfoque para la planeación y evaluación de políticas regionales.

VII. Conclusiones

El estudio demuestra que la accesibilidad a los principales sitios turísticos del Valle del Cauca presenta una estructura espacial diferenciada y que dicha estructura puede medirse de manera consistente mediante herramientas de análisis espacial Los resultados muestran que la zona central y sur del departamento registran, en términos generales, mejores condiciones de accesibilidad, mientras que otros municipios presentan desventajas relativas que merecen atención prioritaria.

La aplicación conjunta del modelo de gravedad y del SD-2SFCA permitió no solo calcular accesibilidad, sino también contrastar la estabilidad de los patrones espaciales bajo dos enfoques analíticos complementarios. La alta correlación entre ambos modelos en transporte público y la correlación media-baja en transporte privado constituyen un hallazgo metodológico relevante, ya que evidencian que la interpretación territorial de la accesibilidad depende del modo de transporte y del esquema de modelación empleado. Esta constatación refuerza la conveniencia de utilizar enfoques comparativos cuando el objetivo es orientar decisiones de alcance regional.

Desde una perspectiva aplicada, la principal contribución del estudio radica en mostrar que la accesibilidad puede utilizarse como insumo directo para la planeación de la movilidad y la infraestructura regional. Su uso permite identificar territorios con potencial turístico y baja conectividad, apoyar decisiones públicas de priorización y fortalecer estrategias de desarrollo territorial más equilibradas. En consecuencia, la integración entre análisis espacial, modelación de accesibilidad y lectura regional constituye una base sólida para futuras intervenciones en transporte, turismo e infraestructura.

Finalmente, el trabajo deja aportes metodológicos e implicaciones prácticas. Es que la comparación entre modelos y modos de transporte mejora la solidez del diagnóstico territorial y que la planeación del turismo regional requiere incorporar de manera explícita el análisis de accesibilidad si se desea avanzar hacia estrategias de desarrollo más viables, equilibradas y territorialmente informadas. En contextos como el Valle del Cauca, donde la diversidad de destinos convive con desigualdades de conectividad, este tipo de estudios ofrece una base pertinente para alinear infraestructura, movilidad y aprovechamiento del potencial territorial.

En síntesis, el estudio confirma que la accesibilidad no debe entenderse como una variable secundaria en la planificación turística, sino como un componente central para materializar el valor territorial de los destinos. Cuando se articula con herramientas de análisis espacial y con una lectura regional de la movilidad, la accesibilidad permite pasar de la simple descripción de atractivos a una comprensión operativa de las condiciones que favorecen o restringen su aprovechamiento. Ese es, en última instancia, el principal aporte del trabajo.

Referencias

[1] A. Monzón, “Los indicadores de accesibilidad y su papel decisor en las inversiones en infraestructura de transporte,” 1988.

[2] K. T. Geurs and B. van Wee, “Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions,” Journal of Transport Geography, vol. 12, no. 2, pp. 127–140, 2004.

[3] J. C. Mora Segura and L. Meyendorff López, Caracterización de la accesibilidad a los principales sitios turísticos del departamento del Valle del Cauca. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle, 2021.

[4] Secretaría de Turismo del Valle del Cauca, documentos de promoción y desarrollo turístico regional, 2018.

[5] CVC, documentos e informes sobre infraestructura vial y turismo regional en el Valle del Cauca, 2018.

[6] L. Nogués and J. Salas, “La medición del impacto territorial de las carreteras en áreas periféricas a través del análisis de los usos del suelo,” 2008.

[7] R. Patuelli, M. Mussoni, and G. Candela, “The effects of World Heritage Sites on domestic tourism: A spatial interaction model for Italy,” Journal of Geographical Systems, vol. 15, no. 3, pp. 369–402, 2013.

[8] P. Hooper, “A destination too far? Modelling destination accessibility and distance decay in tourism,” 2015.

[9] A. E. Joseph and P. R. Bantock, “Measuring potential physical accessibility to general practitioners in rural areas: a method and case study,” Social Science & Medicine, vol. 16, no. 1, pp. 85–90, 1982.

[10] F. Luo and F. Wang, “Measures of spatial accessibility to health care in a GIS environment: synthesis and a case study

in the Chicago region," Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 30, no. 6, pp. 865–884, 2003.

[11] Z. Chang, J. Chen, W. Li, and X. Li, "Public transportation and the spatial inequality of urban park accessibility: New evidence from Hong Kong," Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 76, pp. 111–122, 2019.

[12] L. Xing, Y. Liu, X. Liu, and Y. Wei, "An environmental justice study on spatial access to parks for youth by using an improved 2SFCA method in Wuhan, China," Cities, vol. 96, 2020.

[13] J. B. Ellis and C. S. Doren, "A comparative evaluation of gravity and systems theory models for state-wide recreational traffic flows," 1966.

[14] G. D. Buzai, Sistemas de Información Geográfica en Geografía de la Salud. Buenos Aires, Argentina, 2009

Validación de una Estrategia Constructiva para el Diseño de Mecanismos tipo Levas Lineales mediante Funciones de Interpolación de Lagrange

Juan Sebastian Urbina Silva
Ingeniería Mecánica, Departamento de Ingeniería
Universidad Ecci
Bogotá, Colombia
https://orcid.org/0009-0008-0057-9426

Cristian Felipe Morales Suárez
Ingeniería Mecánica, Departamento de Ingeniería
Universidad Ecci
Bogotá, Colombia
https://orcid.org/0000-0001-5131-7516

Cristhian Dario Zarate Romero
Ingeniería Mecánica, Departamento de Ingeniería
Universidad Ecci
Bogotá, Colombia
https://orcid.org/0009-0005-3600-1528

This paper proposes a methodology based on Lagrange interpolation to generate smoother and more continuous cam profiles. The profile generation was carried out in a discretized manner, differentiating phases of rise, fall, and dwell, using Lagrange polynomials based on design boundary conditions. In each of these segments, a set of auxiliary nodes was integrated at minimum distances at the boundaries. This configuration not only allowed for increasing the degree of the polynomial to ensure a continuous and derivable curve but also guaranteed controlled movement of the mechanism. The proposal was validated through a test bench with vibration measurement and a digital twin, which allowed for simulating different operational scenarios and validating dynamic behavior in real-time. As a result, a smoother behavior in the mechanism's movement is obtained, and its kinematic and dynamic conditions are optimized. Consequently, the curvature of the profile experiences minimal changes and presents no geometric irregularities.

Keywords— Cam-Profile – Lagrange Interpolation - Mechanism kinematics - Vibration análisis - High-speed cams

I. INRODUCCIÓN

Los mecanismos tipo leva se utilizan ampliamente para transformar movimiento rotacional en movimiento lineal alternativo [1], teniendo un papel clave en motores de combustión interna al controlar la apertura y el cierre de las válvulas [2]-[5]. El perfil de la leva define el movimiento del seguidor y, por tanto, las variables cinemáticas y cinéticas del sistema. Las estrategias convencionales de diseño usan funciones matemáticas definidas por tramos a partir de puntos asociados al desplazamiento del seguidor. Este enfoque puede generar discontinudades en las derivadas, afectando la suavidad del movimiento y limitando el control dentro del dominio, según la naturaleza de la función [3]-[7].

El diseño de mecanismos tipo leva ha sido objeto de numerosos estudios por su habilidad para convertir el movimiento rotacional en trayectorias determinadas del seguidor, con usos en sistemas automotrices, maquinaria industrial, manufactura automatizada y robótica [8]-[10]. La elaboración de perfiles de leva ha estado históricamente basada en técnicas geométricas y analíticas que se apoyan en la teoría de envolventes y transformaciones cinemáticas, lo cual permite crear perfiles a partir de leyes de desplazamiento establecidas con anterioridad [8], [11], [12]. Estos métodos sentaron los cimientos para examinar limitaciones cinemáticas, como el radio de curvatura y el ángulo de presión. Estos elementos son esenciales para asegurar que el movimiento sea continuo y prevenir fenómenos como el socavado del perfil [10], [13].

En esta línea, los desarrollos se centran en torno a la creación de leyes de movimiento más avanzadas con el objetivo de optimizar el rendimiento dinámico de los mecanismos. En este escenario, las funciones armónicas, cicloidales y polinomiales hicieron posible la continuidad en jerk, aceleración y velocidad, disminuyendo así las vibraciones y las cargas dinámicas [14]-[16]. Posteriormente, las técnicas basadas en splines, curvas Bézier y representaciones NURBS brindaron una flexibilidad geométrica más amplia y un control local del perfil, lo que permite hacer cambios locales sin que se vea comprometida la continuidad global de la curva [9], [18]-[21]. Para las aplicaciones de alta velocidad, en las que es fundamental reducir las vibraciones residuales y las aceleraciones máximas para el desempeño dinámico del sistema [19], [22],[23], estas tácticas demostraron ser altamente beneficiosas.

Al mismo tiempo, la síntesis de perfiles de leva empezó a incluir métodos de optimización computacional con el fin de cumplir al mismo tiempo con diversas limitaciones dinámicas y geométricas. Para optimizar el comportamiento dinámico global, disminuir jerk, controlar las vibraciones y minimizar las dimensiones del mecanismo, varios trabajos han utilizado métodos de gradiente, algoritmos genéticos y optimización multiobjetivo [15], [21]-[25]. Estas metodologías han evidenciado que el diseño contemporáneo de mecanismos del tipo leva necesita tratar de manera conjunta los aspectos dinámicos, cinemáticos y de manufactura, particularmente en aplicaciones con indexado y alta velocidad [26]-[28].

En este trabajo se propone una metodología basada en interpolación de Lagrange para generar perfiles de levas más suaves y continuos. La generación del perfil se realizó de manera discretizada, diferenciando unas fases de ascenso, descenso y retención. Para los tramos de ascenso y descenso, se emplearon polinomios de Lagrange basados en las condiciones de frontera de diseño. En cada uno de estos segmentos, se integró un conjunto de nodos auxiliares situados a distancias mínimas en las fronteras. Esta configuración no solo permitió elevar el grado del polinomio para asegurar una curva continua y derivable, sino que garantizó un movimiento controlado del mecanismo. Se utilizó la librería de interpolación baricéntrica en *Python* para optimizar los valores del polinomio de Lagrange [29], mejorando la estabilidad numérica y reduciendo el costo computacional de $O(n^2)$ a $O(n)$.

La propuesta se validó mediante un banco de pruebas con medición de vibraciones y un gemelo digital, que permitió simular distintos escenarios operativos y validar en tiempo real el comportamiento dinámico. Finalmente, la alternativa de emplear nodos auxiliares en los extremos permite controlar y realizar un empalme homogéneo con las condiciones de diseño de la leva. Como resultado, se obtiene un comportamiento más suave en el movimiento del mecanismo y se optimizan sus condiciones cinemáticas y dinámicas; de este modo, la curvatura del perfil experimenta cambios mínimos y no presenta irregularidades geométricas.

II. Métodos

El desarrollo metodológico de esta investigación se fundamenta en la búsqueda de un equilibrio óptimo entre la precisión posicional y la suavidad dinámica en perfiles de leva operando a altas revoluciones. Para ello, se propone un enfoque que utiliza los Polinomios de Interpolación de Lagrange como propuesta de diseño, contrastando su desempeño frente a construcciones convencionales utilizando las ecuaciones de movimiento cicloidal.

El proceso de síntesis se estructura en tres fases críticas: primero, la caracterización matemática de las funciones base; segundo, la transición de un modelo de interpolación global hacia una estrategia de discretización por tramos, diseñada para garantizar la estabilidad en las zonas de retención; y finalmente, la implementación de una técnica de control de nodos. Esta última fase, garantiza que la curva de velocidad inicie y termine con valor cero, eliminando los cambios bruscos y las aceleraciones teóricas infinitas.

A. Polinomios de Lagrange.

La presente investigación adopta el método de Polinomios de Interpolación de Lagrange para la síntesis del perfil de la leva.

Esta aproximación permite construir la función de desplazamiento $S(\theta)$ a partir de las condiciones de diseño preestablecidas. Matemáticamente, dadas las condiciones de frontera definidas por un conjunto de pares ordenados $\{(\theta_0, S_0, \theta_1, S_1, \ldots\ldots, \theta_n, S_n,)\}$ donde θ_j representa el ángulo de giro de la leva y S_j el desplazamiento requerido del seguidor (correspondiente a fases de subida, retención o retorno), la función que define el perfil de desplazamiento se determina como una combinación lineal ponderada *(1)*:

$$S(\theta) = \sum_{j=0}^{n} S_j L_j(\theta) \qquad (1)$$

En esta expresión, los términos $L_j(\theta)$ constituyen las bases polinómicas de Lagrange, definidas como *(2)*:

$$L_j(\theta) = \prod_{\substack{i=0 \\ i\neq 0}}^{n} \frac{\theta - \theta_j}{\theta_j - \theta_i} \qquad (2)$$

Matemáticamente, la interpolación de Lagrange para un conjunto de $n+1$ puntos genera un polinomio de grado máximo n.

Al incrementar el número de puntos, se aumenta el grado del polinomio, lo que otorga una mayor "capacidad de curvatura" o grados de libertad para ajustarse a trayectorias complejas. Esto permite que el perfil de desplazamiento $S(\theta)$ capture transiciones que un polinomio de bajo orden ignoraría.

El empleo de un polinomio de n-ésimo orden para la interpolación de esta curva tiende a generar un comportamiento oscilatorio, como lo demuestra el análisis realizado por Chapra y Canale [30]. Este fenómeno ocurre porque, ante datos que no son uniformes, los polinomios de grado superior oscilan para intersectar cada punto manifestándose como fluctuaciones que no representan la tendencia cinemática deseada.

B. Movimiento/Ecuaciones cicloidal

Como base comparativa para validar el desempeño del modelo propuesto, se ha seleccionado el diseño de movimiento cicloidal. Esta decisión se fundamenta en su amplia aplicación en levas de alta velocidad (RPM), debido a que su curva de aceleración es continua en todo el intervalo de movimiento, evitando transiciones bruscas presentes en los perfiles como armónico simple. El diseño cicloidal se define matemáticamente mediante las siguientes expresiones para el desplazamiento(S) ***(3),*** velocidad(V) ***(4)***, aceleración(A) ***(5)***, y *jerk* (J) ***(6)***.

$$S(\theta) = L\left[\frac{\theta}{\beta} - \frac{1}{2\pi} sen\frac{2\pi\theta}{\beta}\right] \qquad (3)$$

$$V(\theta) = \frac{L}{\beta}\left[1 - cos\frac{2\pi\theta}{\beta}\right] \qquad (4)$$

$$A(\theta) = \frac{2\pi L}{\beta^2} sen\frac{2\pi\theta}{\beta} \qquad (5)$$

$$J(\theta) = \frac{4\pi^2 L}{\beta^3} cos\frac{2\pi\theta}{\beta} \quad (6)$$

Donde L representa la elevación total del seguidor, β el ángulo total del tramo de movimiento y θ el ángulo de giro local.

Aunque el diseño cicloidal asegura una aceleración finita en los extremos del tramo, tiene un problema importante en sistemas de alta precisión: su curva de jerk ***(6)*** tiene discontinuidades, lo que causa vibraciones.

C. Perfil de leva metodo de Lagrange

Para obtener el perfil de leva inicialmente se consideró la construcción de un perfil de desplazamiento global $S(\theta)$ utilizando un único polinomio de Lagrange basado en las condiciones de frontera de diseño establecidos en la **Tabla 1**, sustituyendo los valores de altura y_j del conjunto $S(\theta)$ en la **Ecuación *(1)***.

Se observa que los términos correspondientes a la subida θ_0, bajada θ_{150} y retención final del ciclo θ_{360} se anulan, dado que $y_0 = 0, y_2 = 0$ y $y_3 = 0$. Se obtiene que la ecuación analítica resultante dada las condiciones de frontera es:

$$S(\theta) = 0 \cdot L_0(\theta) + 13 \cdot L_1(\theta) + 0 \cdot L_2(\theta) + 0 \cdot L_3(\theta) \quad (7)$$

$$S(\theta) = 13 \cdot L_1(\theta) \quad (8)$$

Con el fin de calcular el valor $L_j(\theta)$ necesario para el polinomio de Lagrange, se sustituyen los valores determinados por las condiciones de frontera.

$$L_1(\theta) = \frac{(\theta - 0)(\theta - 150)(\theta - 360)}{(75 - 0)(75 - 150)(75 - 360)} \quad (9)$$

Simplificando el denominador $D_1 = (75 - 0)(75 - 150)(75 - 360)$

$$L_1(\theta) = \frac{(\theta - 0)(\theta - 150)(\theta - 360)}{D_1}$$

$$L_1(\theta) = \frac{\theta(\theta - 150)(\theta - 360)}{D_1}$$

$$L_1(\theta) = \frac{(\theta^2 - 150\theta)(\theta - 360)}{D_1}$$

$$L_1(\theta) = \frac{(\theta^3 - 360\theta^2 - 150\theta^2 + 54000\theta)}{D_1}$$

$$L_1(\theta) = \frac{(\theta^3 - 510\theta^2 + 54000\theta)}{D_1}$$

Tabla 1:Condiciones de Frontera

$\theta(°)$	$y(mm)$
0	0
75	13
150	0
360	0

Al remplazar D_1 se obtiene un denominador con valor de 1603125.

$$L_1(\theta) = \frac{(\theta^3 - 510\theta^2 + 54000\theta)}{1603125}$$

$$L_1(\theta) = 6{,}237x10^{-7}\theta^3 - 3{,}181x10^{-4}\theta^2 + 0{,}03368\theta$$

Quedando un polinomio global de la forma $S(\theta)$

$$S(\theta) = 13 \cdot (6{,}237x10^{-7}\theta^3 - 3{,}181x10^{-4}\theta^2 + 0{,}03368\theta)$$

Sin embargo, el análisis preliminar reveló que una función global no puede garantizar la estabilidad dimensional requerida en las fases de reposo debido a las oscilaciones inherentes que genera el polinomio de Lagrange ***Figura 1***.

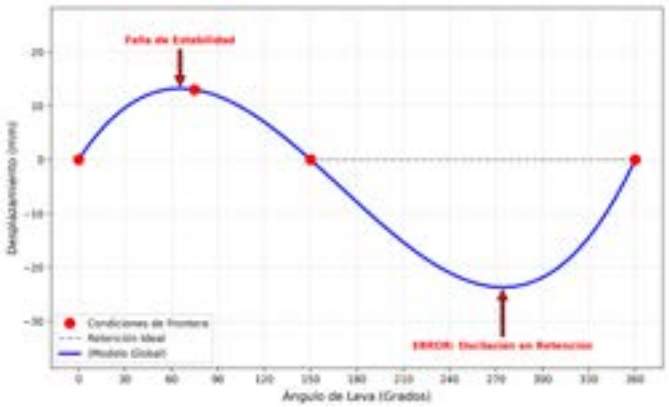


Figura 1:Oscilaciones polinomio de Lagrange

Para superar esta limitación, la presente investigación adopta una estrategia de interpolación por tramos ***Figura 2***. El perfil total de la leva se definió como una función a trozos, lo que permite asignar modelos matemáticos específicos según la naturaleza física de cada fase.

- **Fases de Retención:** Se impone una función constante, eliminando cualquier error de posición.
- **Fases de Movimiento:** Se emplean polinomios de Lagrange locales de alto orden.

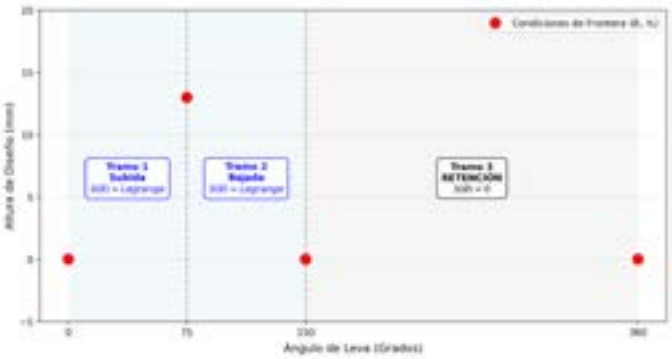


Figura 2:Separación por tramos condiciones de frontera

Dentro de los tramos de movimiento, el desafío reside en la transición suave entre la fase de reposo y la de desplazamiento,

para ello, se implementó una técnica de nodos en las fronteras $\theta\ inicio$, $\theta\ fin$ ***Figura 3***.

A diferencia de una interpolación simple de dos puntos, el algoritmo (Interpolación de Lagrange Mediante Nodos) genera un conjunto de n nodos separados infinitesimalmente.

Esta elevación del grado del polinomio local permite satisfacer de forma implícita las condiciones de frontera suavizando la transición del desplazamiento.

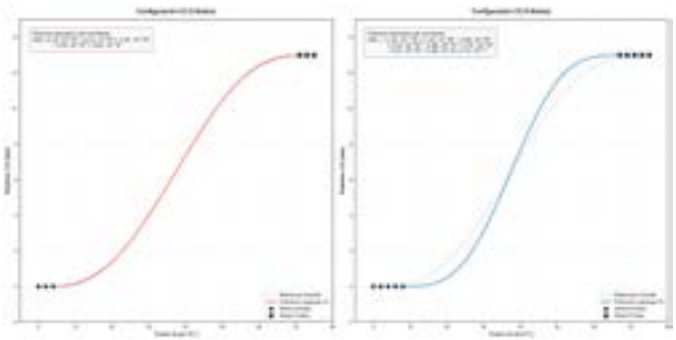


Figura 3:Interpolación de Lagrange mediante nodos

Esta metodología permite que el polinomio de Lagrange distribuya la transición de las condiciones cinemáticas SVAJ en un intervalo angular controlado.

D. Algoritmo Interpolación de Lagrange mediante Nodos.

La estrategia de interpolación por tramos y la gestión de nodos de frontera, tal como se ha descrito, se implementa mediante un algoritmo ***Figura 4*** ,que ejecuta los siguientes pasos:

1. **Ingreso y Parametrización:** Se definen los puntos críticos de diseño (ángulos y alturas) y se configuran los parámetros de control: el número de nodos y el espaciado angular infinitesimal $\Delta\ Nodos$.

2. **Clasificación de Segmentos:** El algoritmo identifica y separa el ciclo en dos tipos de regiones:
   - **Fases de Retención:** Se asignan valores de altura constante.
   - **Fases de Movimiento:** Se aplica el método de interpolación local.

3. **Construcción de Nodos de Frontera:** Para cada tramo de movimiento, el algoritmo genera automáticamente los conjuntos de nodos en $S(\theta)_{inicio}$ y $S(\theta)_{final}$. Estos nodos se posicionan con una separación de $\Delta\ Nodos$ para imponer de forma implícita derivadas nulas en los extremos del desplazamiento.

4. **Interpolación Baricéntrica Local:** Se aplica la fórmula baricéntrica de Lagrange sobre los nodos generados. Este paso genera una función continua, garantizando que el polinomio local sea numéricamente estable y suave.

5. **Síntesis del Perfil Global:** Se concatenan todos los tramos (retenciones y movimiento) en un único vector de posición $S(\theta)$.

6. **Cálculo Cinemático SVAJ:** El algoritmo obtiene las funciones de Velocidad, Aceleración y Jerk mediante diferencias finitas centradas con precisión de segundo orden.

7. **Evaluación de Desempeño y Salida:** El algoritmo verifica los límites de diseño, incluyendo el Ángulo de Presión y el Jerk máximo. Si el diseño cumple con estos criterios, se exporta la geometría final en coordenadas cartesianas, lista para integrarse en sistemas CAD.

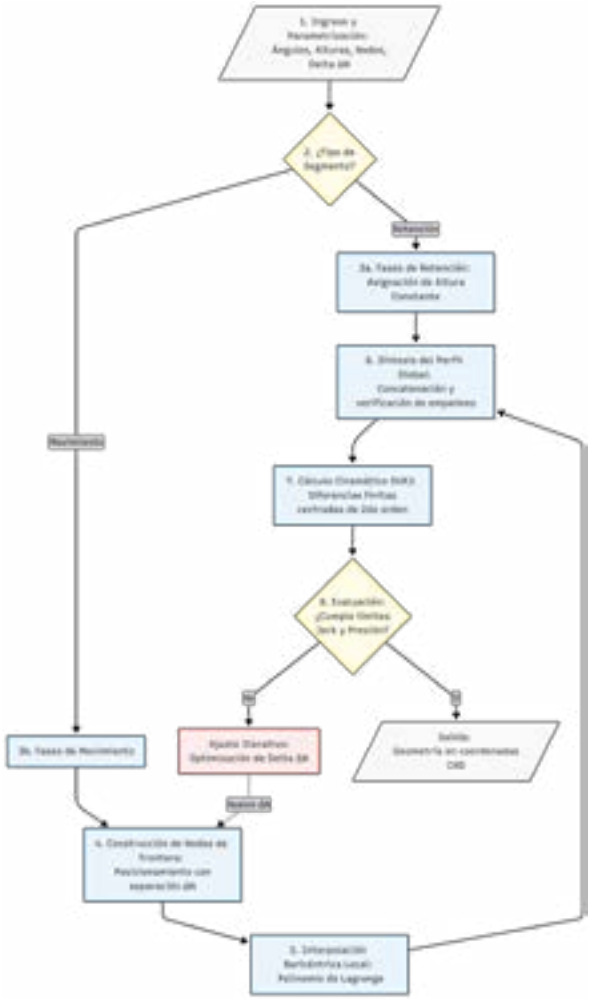


Figura 4:Diagrama de Flujo Algoritmo Interpolación de Lagrange Mediante Nodos

III. Validacion Experimental

La fase de validación experimental tuvo como objetivo principal evaluar la efectividad del modelo matemático utilizado para mejorar y suavizar los perfiles de leva. Mediante el banco de pruebas y el aplicativo desarrollado, se buscó comprobar que el modelo propuesto garantiza una transición

fluida en el movimiento, validando físicamente la reducción de vibraciones y la precisión del diseño. Este proceso experimental permitió comparar el comportamiento del perfil fabricado bajo condiciones reales de operación, confirmando que la estrategia constructiva es una herramienta efectiva para optimizar la dinámica de los sistemas leva-seguidor.

A. Condiciones de validación/simulación

Para garantizar la precisión de la estrategia constructiva propuesta, se establecieron condiciones de frontera y parámetros operativos estrictos, la simulación se realizó a partir de variables preestablecidas obtenidas del entorno físico, las cuales se detallan en la **Tabla 2**.

Estos parámetros permitieron modelar una aproximación del comportamiento dinámico del sistema a diferentes RPM de operación. Se consideraron constantes de fuerzas, incluyendo una carga total resultante (W_R) de 54.02 N. Esta carga integra el peso del seguidor y sus componentes (9.81 N), la fuerza de rozamiento (1.18 N) y una fuerza de precarga del resorte de 43.03 N. El objetivo principal era entender el comportamiento dinámico de la leva antes de las pruebas experimentales.

B. Condiciones de frontera

Para el desarrollo del perfil de la leva, se establecieron condiciones de frontera cinemáticas divididas en tres etapas fundamentales: un ascenso de 0° a 75° para alcanzar una elevación máxima de 13 mm, un descenso de 75° a 150° retornando a la altura de 0 mm, y una retención de 150° a 360° donde el seguidor permanece en reposo a 0 mm para completar el ciclo de rotación.

C. Interfaz de usuario

El aplicativo desarrollado permite la integración entre el diseño matemático y la validación empírica. Despliega un entorno interactivo que permite transitar bidireccionalmente entre el Gemelo Digital (predicción teórica) y la Instrumentación en Tiempo Real (validación física) ***Figura 5***.

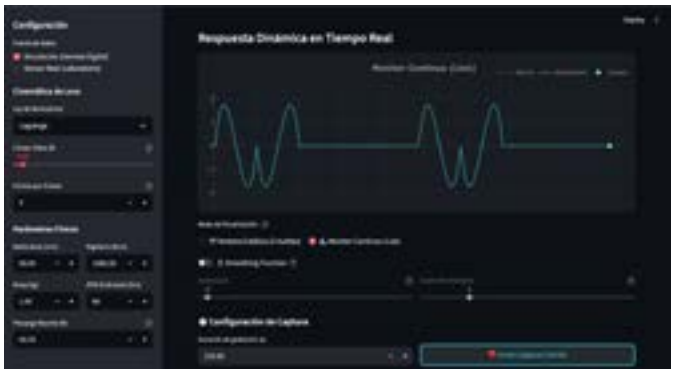


Figura 5:Interfaz de usuario WD

Tabla 2:Parámetros físicos y cargas para la validación dinámica.

Variable	Descripción	Fuerza (N)
w_1	Peso del rodamiento y el acople	3.92
w_2	Peso de la barra del seguidor	5.89
F_r	Fuerza de rozamiento ($\mu_k \cdot w_2$)	1.18
F_R	Fuerza de precarga del resorte	43.03
W_R	**Carga Total Resultante**	**54.02**

La arquitectura del sistema se divide en dos módulos operativos fundamentales:

El Módulo de Simulación Dinámica (Gemelo Digital) ofrece una vista previa del comportamiento de las fuerzas y las vibraciones del sistema masa-resorte antes de la adquisición de datos en el banco de pruebas. Este módulo muestra los resultados de la EDO del sistema, lo que permite comprender mejor el comportamiento del sistema antes de la adquisición de datos.

Dentro de este entorno, el usuario puede configurar los parámetros físicos reales del ensamblaje, tales como:

- Dinámica de Cargas: Ajuste de la masa del seguidor m, la rigidez del resorte k y la fuerza de precarga inicial $F_{precarga}$
- Simulación de Régimen Crítico: El software permite variar las RPM de operación para detectar el fenómeno de despegue teórico.

Módulo de Validación y Adquisición IoT (Sensor Real):
Este módulo de validación física se encarga de la captura, procesamiento y visualización de datos provenientes de la instrumentación instalada en el banco de pruebas, el aplicativo utiliza un módulo de lectura del puerto serial, permitiendo capturar miles de muestras por segundo del acelerómetro (MPU-6050).

D. Banco de pruebas y análisis de datos

La validación experimental se fundamenta en un banco de pruebas desarrollado a partir del diseño propuesto por [31], al cual se le integraron mejoras técnicas.

Operativamente, el banco permite al usuario realizar ajustes manuales en la precarga para observar el efecto en el contacto del seguidor con la leva, así como la sustitución rápida del resorte para ensayar con diferentes niveles de rigidez mecánica.

La versatilidad del banco permite el intercambio de diferentes tipos de levas que tengan como máximo 70 mm de radio base

Figura 6.



Figura 6:Banco de pruebas para mecanismos tipo Leva.

Durante el ensayo, un acelerómetro integrado en la estructura del banco captura las vibraciones y variaciones del movimiento en tiempo real, enviando esta señal mediante el protocolo UART para ser visualizada en la interfaz de usuario WD.

E. Estado de aceleraciones

Para la evaluación cuantitativa de los perfiles de leva (Cicloidal vs. Lagrange), se han definido métricas que permiten traducir las señales sin procesamiento previo del acelerómetro en indicadores de calidad mecánica y eficiencia dinámica.

Valor Cuadrático Medio (RMS - Root Mean Square)

El RMS de la señal de aceleración sirve como indicador de la energía vibratoria total del sistema. Según el estudio de Islam, Joarder y Hossain, el RMS permite relacionar la energía cinética del sistema en movimiento durante un ciclo completo [32]. Matemáticamente se define como ***(10)***:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} a_i^2} \qquad \textbf{(10)}$$

Donde a es la aceleración instantánea y N el número de muestras por revolución.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta la validación de la metodología propuesta, contrastando el desempeño del perfil de la leva generado con el método de interpolación de Lagrange versus el perfil generado con el método cicloidal. La evaluación se ha estructurado en dos fases: primero, un análisis cinemático teórico enfocado en la optimización del número de nodos y segundo, una validación experimental en un entorno físico controlado para cuantificar el impacto real de estas geometrías en la dinámica del sistema.

Para ello, se analizan no solo las magnitudes cinemáticas ideales (velocidad, aceleración y jerk), sino también su manifestación física en forma de energía vibratoria (RMS) y cargas de impacto (picos de aceleración). A través de esta comparativa, se busca identificar el punto de equilibrio donde la continuidad del movimiento y la reducción de las fuerzas de inercia permitan maximizar la eficiencia de estos mecanismos.

A. Análisis número de nodos en la Interpolación de Lagrange

El número de nodos establecidos en la interpolación de Lagrange influye directamente en la suavidad de la curva, permitiendo eliminar las discontinuidades o puntos de corte típicos del método cicloidal ***Figura 7***. Sin embargo, los resultados indican que esta mejora en la continuidad geométrica no se traduce necesariamente en un mejor rendimiento cinemático; por el contrario, existe una "Compensación Cinemática" donde la búsqueda de una mayor suavidad aumenta las magnitudes presentes en el mecanismo.

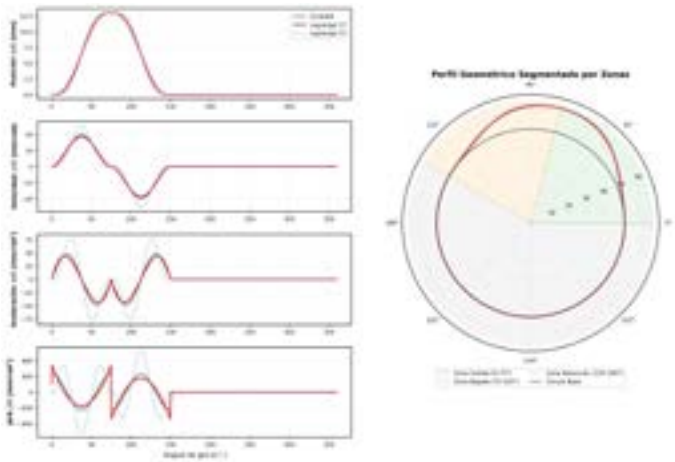


Figura 7: Comparación método Cicloidal vs método de Lagrange

Como se observa en los datos teóricos **Tabla 3**, el uso de un mayor número de nodos (Perfil C5) aumenta significativamente las magnitudes máximas de velocidad (+30.75%), aceleración (+66.46%) y jerk (+130.79%). Este comportamiento se atribuye a que, al imponer más restricciones de frontera en un intervalo de tiempo fijo, el polinomio se ve obligado a realizar cambios de curvatura más agresivos para cumplir con la trayectoria. Para corregir este aumento que haría inviable el método en aplicaciones reales, se priorizó la optimización de las magnitudes cinemáticas mediante una configuración de 3 nodos.

La configuración de tres nodos (C3) representa el punto de equilibrio óptimo, logrando una reducción del 6.7% en la aceleración máxima y del 5.75% en la velocidad en comparación con el perfil cicloidal. Si bien C3 introduce un salto en el jerk, suaviza la aceleración, permitiendo un desplazamiento más eficiente sin los picos extremos asociados con C5 ***Figura 8***.

Resultando en una reducción directa en las fuerzas de inercia que el mecanismo debe soportar.

Tabla 3:Valores pico cinemática método Cicloidal vs Lagrange

Magnitudes	Cicloidal	Lagrange C5	Diferencia % vs Cicloidal	Lagrange C3	Diferencia %vs Cicloidal
Velocidad (mm/rad)	20	26.15	+30.75%	18.85	-5.75%
Aceleración (mm/rad^2)	48.36	80.50	+66.46%	45.12	-6.70%
Jerk (mm/rad^3)	225.40	520.20	+130.79%	345.10	+53.11%

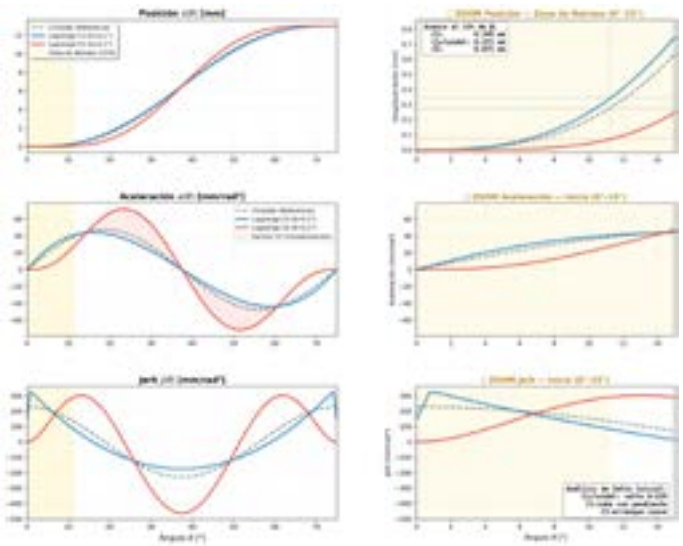


Figura 8: Resultados cinemáticos con modificación de nodos

Para la validación experimental se generaron tres tipos de perfil de leva ***Figura 9***, esto con el fin de comprobar las condiciones descritas en la cinemática.

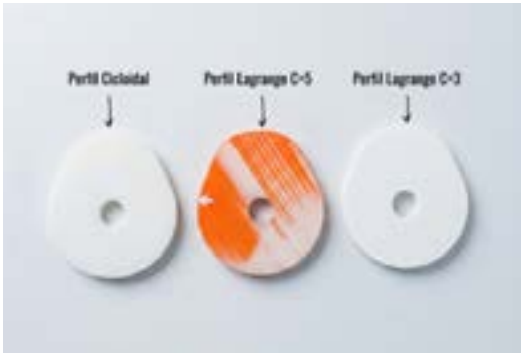


Figura 9:Perfiles de leva para análisis experimental

B. Pruebas experimentales: vibraciones generadas por método cicloidal vs. Lagrange Nodos (3 y 5)

Para el análisis comparativo se emplearon dos métricas fundamentales en el dominio del tiempo: la aceleración Root Mean Square (RMS), que representa la energía vibratoria global transmitida al mecanismo, y la Aceleración Pico Máxima Absoluta, que permite conocer las fuerzas inerciales (impactos) que soporta el mecanismo y en la práctica son las que causan fatiga en los componentes. La ***Figura 10*** presenta el comportamiento de un ciclo promedio para los tres perfiles.

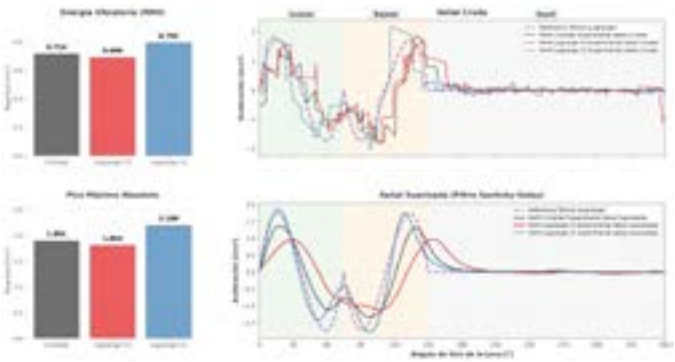


Figura 10:Recopilación de datos pruebas experimentales

Los resultados experimentales validan la superioridad del perfil **Lagrange C3**, mostrando una correlación directa con la teoría. La aceleración RMS se redujo en un **3.4%** respecto al perfil cicloidal, lo que indica que la estrategia de nodos mejora las condiciones dinámicas en el sistema. Físicamente, esto se traduce en una operación más silenciosa y una mayor estabilidad del seguidor. Paralelamente, la reducción del **4.7%** en el pico absoluto de aceleración confirma que las transiciones de movimiento son menos violentas, disminuyendo el esfuerzo de contacto de la leva.

Por otro lado, las pruebas del perfil **C5** evidenciaron los límites prácticos de la suavidad matemática. Experimentalmente, el C5 exhibió el desempeño más desfavorable, con un incremento del **10.9%** en la energía vibratoria (RMS) y un aumento drástico en el pico de aceleración. Este comportamiento demuestra que los altos picos de aceleración teóricos del C5 se manifiestan en la realidad como un régimen de vibración forzada que anula cualquier beneficio de su continuidad en el jerk.

La ligera diferencia entre la mejora teórica (6.7%) y la experimental (4.7%) en el perfil C3 se atribuye a variables físicas y experimentales no contempladas en el modelo cinemático ideal. Entre estos factores destacan las tolerancias dimensionales inherentes a la manufactura de las levas, la fricción en el seguidor y las incertidumbres propias del sensor. A pesar de la presencia de este ruido experimental, la tendencia en la reducción de ambas métricas confirma que el perfil Lagrange C3 ofrece ventajas competitivas en la operación real del mecanismo. En términos prácticos, la disminución del RMS se traduce en una menor fatiga estructural y una mayor estabilidad del seguidor, minimizando el ruido dinámico

del sistema. Simultáneamente, la reducción del pico máximo de aceleración permite mitigar el riesgo de desprendimiento del seguidor lo que se traduce en que no exista la necesidad de incrementar la constante del resorte, al tiempo que disminuye los esfuerzos de contacto, previniendo fallos prematuros como el pitting o desgaste por contacto en la superficie de la leva.

Los resultados muestran que la interpolación de Lagrange mejora el comportamiento dinámico de métodos tradicionales como el perfil cicloidal. Además, al compararla con métodos alternativos, como curvas NURBS [20],[21], la metodología de Lagrange ofrece ventajas mecánicas y operativas clave para la precisión geométrica del mecanismo.

En los estudios de síntesis con splines suavizados, se observa que estas metodologías usan funciones de penalización o algoritmos de optimización para reducir las derivadas superiores (jerk) ajustando la posición de los puntos de control o sus parámetros de peso. Este enfoque matemático "relaja" la trayectoria, aproximando los puntos de diseño en lugar de interpolarlos con exactitud, priorizando la suavidad global a costa de posibles desviaciones dimensionales en los límites del movimiento.

Por otro lado, el método de Lagrange garantiza un cumplimiento estricto de las condiciones de frontera. La estrategia de inyectar nodos auxiliares fuerza analíticamente a que la velocidad y la aceleración del seguidor sean exactamente cero en las transiciones. Esto asegura un control absoluto de las fases de reposo, garantizando el cumplimiento de la alzada real de la leva sin necesidad de complejos procesos iterativos de optimización geométrica.

V. CONCLUSIONES

El análisis de la interpolación de Lagrange para el diseño de perfiles de leva demuestra que, si bien el perfil Lagrange C3 presenta un valor pico de jerk teóricamente superior al del perfil cicloidal, este fenómeno no compromete la estabilidad del sistema. Esta conclusión se basa en que, aunque la discontinuidad en los puntos de corte persiste, el jerk en el perfil C3 inicia con un valor teórico inferior en el instante en que se inicia el movimiento, coincidiendo con el salto instantáneo característico del perfil cicloidal. Los resultados experimentales validan que la configuración C3 logra una reducción efectiva de las vibraciones globales (RMS) y de los picos de aceleración. Este hallazgo es de suma importancia, ya que evidencia que la optimización de las magnitudes de aceleración ejerce un impacto más significativo en la reducción de la energía vibratoria. La reducción de las fuerzas inerciales y la estabilidad observada en el perfil C3 ofrecen ventajas para sistemas que operan a altas velocidades de rotación (RPM). En particular, este perfil permite:

1. Prevención del desprendimiento del seguidor: Al mitigar los picos de aceleración, se reduce el riesgo de "pateo" del seguidor, lo que elimina la necesidad de incrementar excesivamente la constante de rigidez del resorte, optimizando así la respuesta dinámica del sistema.

2. Reducción de cargas estructurales: El sistema soporta fuerzas de contacto menores, lo que disminuye el esfuerzo mecánico, contribuyendo a una mayor eficiencia y a una reducción de los costos de mantenimiento.

3. Extensión de la vida útil: La operación más silenciosa y con menores impactos previene fallos prematuros por fatiga superficial (pitting) y desgaste excesivo, garantizando una mayor longevidad de los componentes del mecanismo y, en consecuencia, una mayor productividad y rentabilidad. Este método logra un equilibrio óptimo entre eficiencia cinemática y viabilidad dinámica, satisfaciendo así los exigentes requisitos de los sistemas de alta velocidad.

VI. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad ECCI por el respaldo institucional y la asignación de los recursos económicos destinados a la fabricación del banco de pruebas, el cual permite la validación experimental de la metodología propuesta en esta investigación.

REFERENCIAS

[1] R. L. Norton, «Diseño de levas,» de *Diseño de Maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*, México, D.F., McGraw-Hill, 2009, p. 383–486.

[2] S. Sarıdemir,Saruhan, «Experimental analysis of maximum valve lift effects in cam-follower system for internal combustion engines,» *Journal of Mechanical Science and Technology,* vol. 28, nº 9, pp. 3443-3448, 2014.

[3] W. Q,Chen, «Study on optimal kinematic synthesis of cam profiles for engine valve trains,» *Applied Mathematical Modelling,* vol. 38, pp. 4345-4353, 2014.

[4] C. Zhou,Hu,Chen,Ma, «Design and analysis of high-speed cam mechanism using Fourier series,» *Mechanism and Machine Theory,* vol. 104, pp. 118-129, 2016.

[5] W. Z. X. Z. Jie Guo, «Modeling and analysis of the transient vibration of camshaft in multi-cylinder diesel engine,» *Advances in Mechanical Engineering,* vol. 7, nº 11, pp. 1-14, 2015.

[6] U. Chavan y S. Joshi, «Synthesis of cam profile using classical splines and the effect of knot locations on the acceleration, jump, and interface force of cam follower system,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,* vol. 225, nº 12, pp. 3019-3030, 2011.

[7] M. L. Rodríguez, *Diseño de perfil de leva radial para mecanismo apilador de pañales usando curvas B-Spline,* Saltillo, Coahuila: Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), 2014.

[8] D. Tsay y H. M. Wei, «A General Approach to the Determination of Planar and Spatial Cam Profiles,» *Journal of Mechanical Design,* vol. 118, nº 2, pp. 259-265, 1996.

[9] T. T. N. Nguyen, S. Kurtenbach, M. Hüsing y B. Corves, «A general framework for motion design of the follower in cam mechanisms by using non-uniform rational B-spline,» *Mechanism and Machine Theory,* vol. 137, pp. 374-385, 2019.

[10] P. Flores, «A Computational Approach for Cam Size Optimization of Disc Cam-Follower Mechanisms With Translating Roller Followers,» *Journal of Mechanisms and Robotics,* vol. 5, nº 4, 2013.

[11] J.-F. Hsieh, «esign and analysis of cams with three circular-arc profiles,» *Mechanism and Machine Theory,* vol. 45, nº 6, pp. 955-965, 2010.

[12] P. H. Hoang y L. Q. Ngoc, «Program for Designing Planar Cam Mechanisms,» de *2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 2018.

[13] Z. Ji y Y. A. Manna, «Size minimization of disc cams with roller-followers under pressure angle constraint,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,* vol. 222, nº 12, pp. 2475-2484, 2008.

[14] H. Luo, J. Yu, L. Li, K. Huang, Y. Zhang y K. Liao, «A novel framework for high-speed cam curve synthesis: piecewise high-order interpolation, pointwise scaling and piecewise modulation,» *Mechanism and Machine Theory,* vol. 167, p. 104477, 2022.

[15] R. K. Jana y P. Bhattacharjee, «A multi-objective genetic algorithm for design optimisation of simple and double harmonic motion cams,» *International Journal of Design Engineering,* vol. 7, nº 2, p. 77, 2017.

[16] H. Qiu, C.-J. Lin, Z.-Y. Li, H. Ozaki, J. Wang y Y. Yue, «A universal optimal approach to cam curve design and its applications,» *Mechanism and Machine Theory,* vol. 40, nº 6, pp. 669-692, 2005.

[17] V.-T. Nguyen y D.-J. Kim, «Flexible cam profile synthesis method using smoothing spline curves,» *Mechanism and Machine Theory,* vol. 42, nº 7, pp. 825-838, 2007.

[18] D. M. Tsay y C. O. H. Jr., «Cam Motion Synthesis Using Spline Functions,» *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design,* vol. 110, nº 2, pp. 161-168, 1988.

[19] L. N. Srinivasan y Q. J. Ge, «Designing Dynamically Compensated and Robust Cam Profiles With Bernstein-Bézier Harmonic Curves,» *Journal of Mechanical Design,* vol. 120, nº 1, pp. 40-45, 1998.

[20] M. Neamtu, H. Pottmann y L. L. Schumaker, «Designing NURBS Cam Profiles Using Trigonometric Splines,» *Journal of Mechanical Design,* vol. 120, nº 2, pp. 175-180, 1998.

[21] R. Y. Ge y P. Q. Guo, «Flexible Cam Profile Synthesis Method Using NURBS and its Optimization Based on Genetic Algorithm,» *Advanced Materials Research,* vol. 426, pp. 69-72, 2012.

[22] J. K. Jiang y Y. R. Iwai, «Improving the B-Spline Method of Dynamically-Compensated Cam Design by Minimizing or Restricting Vibrations in High-Speed Cam-Follower Systems,» *Journal of Mechanical Design,* vol. 131, nº 4, 2009.

[23] M. Chew y C. H. Chuang, «Minimizing Residual Vibrations in High-Speed Cam-Follower Systems Over a Range of Speeds,» *Journal of Mechanical Design,* vol. 117, nº 1, pp. 166-172, 1995.

[24] O. Navarro, C.-J. Wu y J. Angeles, «The size-minimization of planar cam mechanisms,» *Mechanism and Machine Theory,* vol. 36, nº 3, pp. 371-386, 2001.

[25] K. S. T. K. N. Rao y R. R. Srikar, «Optimization of Radial Cams with Translating Roller Follower through Genetic Algorithms,» *Applied Mechanics and Materials,* vol. 783, pp. 83-88, 2015.

[26] H. Kaplan, «Mathematical modeling and simulation of high-speed cam mechanisms to minimize residual vibrations,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,* vol. 228, nº 13, pp. 2402-2415, 2014.

[27] Z. Wei, G. Jin, B. Chang y D. Liang, «Dynamic Design of High-Speed Planar Cam with Oscillating Follower,» *Advanced Materials Research,* vol. 308–310, p. 1845–1849, 2011.

[28] M. Liu, F. Zhai, G. Chen, Y. Li y Z. Guo, «Theoretical and experimental research on dynamics of the inner displaced indexing cam mechanism,» *Mechanism and Machine Theory,* vol. 105, pp. 620-632, 2016.

[29] J.-P. N. Berrut,Trefethen, «Barycentric Lagrange Interpolation,» *SIAM Review,* vol. 46, nº 3, pp. 501-517, 2004.

[30] S. C. P. Chapra,Canale, Métodos numéricos para ingenieros: Con aplicaciones en computadoras personales, México, D.F.: McGraw-Hill, 1987.

[31] T. Sailema, «Diseño y construcción de un banco de pruebas para el análisis de fallas en mecanismos de levas,» Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2015.

[32] M. T. K. Islam,Joarder,Hossain, «A Comprehensive Study on Gearbox Condition Monitoring Using Vibration Analysis,» *North American Academic Research,* vol. 7, nº 12, pp. 1-11, 2024.

Análisis de Nucleación de Grietas de Fatiga por Fretting Considerando Valores de Coeficiente de Fricción Variable

Nicolás Díez Molina
Facultad de Mecánica Aplicada
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
nicolas.diez@utp.edu.co

Libardo Vicente Vanegas Useche
Facultad de Mecánica Aplicada
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
lvanegas@utp.edu.co

Carlos Andrés Mesa-Montoya
Facultad de Mecánica Aplicada
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
caanmesa@utp.edu.co

Abstract*—La fatiga por fretting es un fenómeno que se presenta cuando dos superficies en contacto están sometidas a cargas normales y tangenciales cíclicas, acompañadas de desplazamientos relativos de baja amplitud. Este mecanismo puede reducir significativamente la vida útil de componentes mecánicos críticos, tales como uniones pernadas, álabes de turbinas y cables metálicos. La complejidad en su caracterización radica en la fuerte dependencia de múltiples variables, entre las cuales el coeficiente de fricción desempeña un papel fundamental debido a su evolución durante el proceso de fatiga. En particular, aunque el efecto de coeficientes de fricción elevados ha sido estudiado, existe una limitada comprensión del impacto de valores bajos, típicos de las etapas iniciales del contacto. En este trabajo se analiza la influencia del coeficiente de fricción sobre la nucleación de grietas mediante un modelo numérico por elementos finitos de tipo cilindro-plano. Para la evaluación del daño se emplean dos criterios de plano crítico: el parámetro de Fatemi-Socie y el criterio de Findley. El coeficiente de fricción se hace variar en el rango 0.36-0.84, representando estados intermedios entre condiciones iniciales y estabilizadas. Los esfuerzos obtenidos del modelo son procesados mediante un algoritmo de postproceso que permite calcular los parámetros de daño y estimar la vida de nucleación de grieta. Los resultados evidencian una disminución sistemática de la vida de nucleación con el incremento del coeficiente de fricción, así como una predicción conservadora de ambos criterios. No obstante, la sensibilidad de la vida de nucleación disminuye a medida que el coeficiente de fricción aumenta. Por otra parte, la localización y orientación de la grieta no presentan variaciones significativas dentro del rango analizado. Los resultados obtenidos aportan elementos relevantes para la modelación y el diseño de sistemas mecánicos, particularmente en la selección de parámetros de contacto y en la predicción de vida de fatiga en condiciones variables de fricción.

Keywords—coeficiente de fricción, fretting, fatiga

I. Introducción

La fatiga por fretting es un fenómeno que ocurre cuando dos superficies en contacto experimentan esfuerzos y desplazamientos oscilatorios de baja amplitud [1]. Este tipo de falla puede presentarse en componentes tales como juntas pernadas [2], colas de milano [3] o ejes ajustados a presión [4]. La importancia de estudiar este fenómeno radica en su capacidad de reducir hasta en un 50% la vida útil de las piezas mecánicas que lo experimenten [5].

La predicción de la vida de nucleación para este proceso ha sido analizada previamente mediante elementos finitos, considerando la variación de parámetros, tales como cargas aplicadas [6], geometría [7] y coeficientes de fricción μ. Respecto a este último, Szolwinski et al. [8] analizaron la vida de nucleación para un aluminio 2024-T4, usando el parámetro de daño SWT (Smith-Watson-Topper) para valores de μ de 0.5 y 0.75. Sin embargo, estos resultados no fueron obtenidos por medio de elementos finitos. Por otro lado, Swalla et al. [9] comprobaron, por medio de elementos finitos, la nucleación de grietas para un acero inoxidable PH 13-8 Mo, usando los parámetros de daño SWT y FS (Fatemi-Socie), y valores de μ de 0.75, 1.0 y 1.5. Se encontró que cuanto mayor es μ, la vida útil predicha se verá reducida considerablemente.

En diferentes oportunidades, se ha detectado un aumento en el coeficiente de fricción durante el proceso de fretting, iniciando en un valor cercano a 0.2 hasta alcanzar un estado estable alrededor de 0.7 [10]. Sin embargo, los estudios citados previamente no analizaron el efecto de los valores reales que se pueden experimentar en un ensayo de fatiga por fretting. En vista de esto, este trabajo se enfoca en analizar el efecto de diferentes valores de coeficiente de fricción en la vida, posición y ángulo de nucleación de grietas en aluminio 2024-T3 en un experimento de fatiga por fretting. Para este propósito, se desarrolla un modelo 2D de elementos finitos para una configuración de fretting tipo cilindro-plano; la vida de nucleación se obtendrá mediante los parámetros FS y FP (Findley). Estos resultados serán contrastados con los resultados experimentales obtenidos por Hojjati-Talemi et al. [6].

II. Planteamiento del Problema de Fretting

La prueba experimental de fatiga por fretting para una configuración tipo cilindro-plano se realiza al generar un contacto de dos indentadores cilíndricos contra una probeta plana por medio de una fuerza compresiva, para posteriormente aplicar una fuerza tangencial cíclica sobre los indentadores y un esfuerzo axial cíclico sobre la probeta, como se ilustra en la Fig. 1. Hojjati-Talemi et al. [6] realizaron este experimento para indentadores de 50 mm de radio y 4 mm de espesor, y una probeta de 40 mm de longitud, 10 mm de ancho y 4 mm de espesor (Fig. 1). Todos los elementos fueron hechos de aleación de aluminio 2024-T3, cuyo módulo de Young es de 72.1 GPa y módulo de Poisson de 0.33.

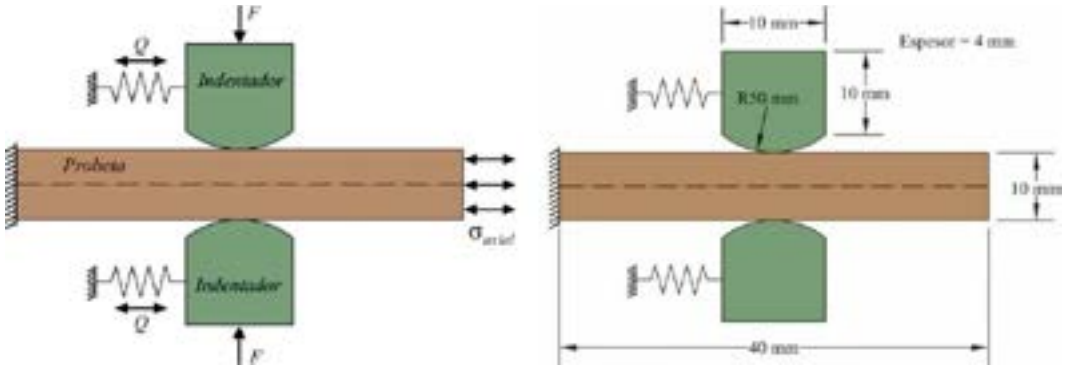


Fig. 1. Cargas y dimensiones de la configuración cilindro-plano del experimento de fretting.

Para el presente estudio, se usaron cuatro de los experimentos realizados por Hojjati-Talemi et al. [6], cuyas cargas aplicadas y vida de nucleación de grieta ($N_{nucleación}$) pueden apreciarse en la tabla I.

III. Fundamentos Teóricos

A. Teoría de la Mecánica de Contacto

La mecánica de contacto es la base analítica para obtener los esfuerzos causados por el fretting. Aunque los modelos computacionales son capaces de obtener estos valores, es importante aplicar esta teoría para garantizar la verdadera precisión de las configuraciones de simulación. El valor máximo de cada uno de los esfuerzos más importantes se utilizará para seleccionar un tamaño de elemento de malla adecuado para las simulaciones computacionales.

En los problemas de fatiga por fretting, existen tres distribuciones principales de esfuerzos, que pueden obtenerse analíticamente mediante variaciones de la solución de contacto hertziano. La mecánica de contacto Hertziana se basa en cuerpos cilíndricos lisos y continuos idealizados que están en un contacto sin fricción no conforme bajo una fuerza de compresión F. La presión en el área de contacto exhibe una distribución semi-elíptica dada por [12]:

$$p(x) = -p_o\sqrt{1-\left(\frac{x}{a}\right)^2}\ ;\ p_o = \sqrt{\frac{FE'}{t\pi R'}} \tag{1}$$

donde p_o es la presión máxima, x es la distancia a lo largo de la línea de contacto desde el punto medio de este y t es el ancho de los cilindros. a, E' y R' representan el semi ancho de contacto, el módulo de Young combinado y la curvatura combinada, respectivamente, las cuales se definen según las siguientes expresiones:

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{2}$$

TABLA I. Datos Experimentales de la Prueba a Analizar [6,11]

No. de prueba	σ_{axial} (MPa)	F (N)	Q_{max} (N)	$N_{nucleación}$ (ciclos)
1	100	543	155.165	816209
2	115	543	186.25	589096
3	135	543	195.55	241453
4	160	543	193.7	141272

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \tag{3}$$

$$a = 2[FR'/(t\pi E')]^{0.5} \tag{4}$$

donde R_1 y R_2 son los radios de los dos cilindros, ν_1 y ν_2 son los módulos de Poisson y E_1 y E_2 los módulos de Young de los materiales. Para el caso de una configuración tipo cilindro-plano, uno de los radios es considerado como infinito, resultando en una curvatura combinada igual al radio del indentador cilíndrico.

Para modelar el esfuerzo cortante, se aplica la ley de fricción de Coulomb sobre la distribución de presión [13]. Para condiciones de deslizamiento parcial, el área de contacto se divide en una zona de adherencia y otra de deslizamiento, presentándose una superposición de dos distribuciones cortantes en la primera; esta superposición se conoce como la solución Mindlin-Cattaneo [14]:

$$q(x) = \begin{cases} -\mu p_o\sqrt{1-\left(\frac{x}{a}\right)^2} & ;\quad c \le |x| \le a \\ -\mu p_o\left[\sqrt{1-\left(\frac{x}{a}\right)^2} - \frac{c}{a}\sqrt{1-\left(\frac{x}{c}\right)^2}\right] & ;\quad |x| < c \end{cases} \tag{5}$$

$$c = a\sqrt{1-\frac{Q}{\mu F}} \tag{6}$$

donde μ es el coeficiente de fricción, Q la carga tangencial y c el semi ancho de la zona de adherencia. Cuando se presenta un esfuerzo axial cíclico σ_{axial} sobre la probeta plana, la zona de adherencia presenta una excentricidad e, dividiendo la zona de deslizamiento en los *leading* y *trailing edges*. Al implementar este esfuerzo, la distribución de esfuerzos cortantes está dada por [5]:

$$q(x) = \begin{cases} -\mu p_o\sqrt{1-\left(\frac{x}{a}\right)^2}\ ;\ |x| \le a;\ |x+e| \ge c \\ -\mu p_o\left[\sqrt{1-\left(\frac{x}{a}\right)^2} - \frac{c}{a}\sqrt{1-\left(\frac{x+e}{c}\right)^2}\right]; |x+e| < c \end{cases} \tag{7}$$

$$e = a\frac{\sigma_{axial}}{4\mu p_o} \tag{8}$$

Por último, el esfuerzo de tracción en la dirección y a lo largo de la línea de contacto alcanza su valor máximo cerca al *trailing edge*, el cual contribuye a la nucleación de la grieta en esta zona del contacto [13]. Se han desarrollado diferentes soluciones analíticas para la distribución de este esfuerzo, considerando o no el efecto del esfuerzo axial [8], proponiendo la siguiente ecuación para calcular el máximo esfuerzo de tracción cerca al *trailing edge*:

$$\sigma_{x,max} = 2p_o\sqrt{\frac{\mu Q}{F}} + \sigma_{axial} \tag{9}$$

B. *Parámetros de Daño de Plano Crítico*

Uno de los métodos más utilizados para la predicción de la vida de nucleación de grietas en la fatiga por fretting es por medio del análisis de parámetros de plano crítico, los cuales permiten predecir con gran exactitud la vida de nucleación, así como el ángulo en el que nuclea la grieta. Previamente, se han evaluado los parámetros de Fatemi-Socie (FS) y Findley (FP) para esta configuración, exhibiendo predicciones precisas [15], por lo que estas serán evaluadas en el presente estudio.

El parámetro FS es un parámetro de daño basado en la deformación cortante en la zona de contacto, la cual revela la nucleación de grietas debido a cargas cortantes no proporcionales [16]. La expresión matemática que describe este parámetro es:

$$FS = \frac{\Delta\gamma_{max}}{2}\left(1 + \frac{\sigma_{max}}{\sigma'_f}\right) \tag{100}$$

donde $\Delta\gamma_{max}$ es el máximo rango de deformación cortante, σ_{max} el esfuerzo normal máximo experimentado en el plano del máximo rango de deformación cortante y σ'_f el coeficiente de resistencia a la fatiga. El valor obtenido es computado junto a (11) para predecir la vida de nucleación de grieta [17].

$$FS = \frac{\tau'_f}{G}(2N_i)^{b'} + \gamma'_f(2N_i)^{c'} \tag{11}$$

donde G es el módulo de rigidez del material, τ'_f y γ'_f son los coeficientes de resistencia y ductilidad a la fatiga por cortante, respectivamente, y b' y c' son los exponentes de resistencia y ductilidad a la fatiga por cortante, respectivamente.

Por otro lado, el parámetro de Findley es un parámetro basado en el esfuerzo cortante, y está dado por [18]:

$$FP = \frac{\Delta\tau_{max}}{2} + k_1\sigma^n{}_{max} \tag{112}$$

donde $\Delta\tau_{max}$ es el máximo rango de esfuerzo cortante y k_1 es una constante que se puede obtener según los límites de fatiga a tracción y torsión σ_{f-1} y τ_{f-1}, tal que:

$$\frac{\sigma_{f-1}}{\tau_{f-1}} = \frac{2}{1 + \frac{k_1}{\left(1 + {k_1}^2\right)^{0.5}}} \tag{123}$$

Para este parámetro, la vida de nucleación de grieta se puede obtener con [19]:

$$FP = \tau'_f(2N_i)^{b'} \tag{134}$$

Los valores de estas propiedades para la aleación de aluminio 2024-T3 están listadas en la tabla II.

IV. Descripción del Modelo de Elementos Finitos

Dada la geometría de los elementos utilizados en el experimento de fretting, comúnmente se simplifica el modelo de elementos finitos a una geometría 2D. Asimismo, por simetría respecto al eje axial de la probeta, solo la mitad del modelo es dibujado [6]. Según lo mencionado en la sección II, el modelo cuenta con un indentador de radio 50 mm y una probeta de 40 mm × 5 mm, ambos con espesor de 4 mm. Como condiciones de frontera, se restringió el desplazamiento horizontal de las aristas verticales del indentador. De igual modo, se aplicó una restricción remota sobre la arista superior del mismo para prevenir su rotación. Además, se definió una región de simetría en la superficie inferior de la probeta. Respecto a las cargas aplicadas, se ubicó una fuerza remota compresiva sobre la superficie superior del indentador y el esfuerzo axial fue aplicado sobre la superficie derecha de la probeta. Para simular el efecto de la fuerza tangencial Q sobre el sistema, esta fue aplicada sobre un esfuerzo de reacción en la superficie izquierda de la probeta, la cual se calcula con [13]:

$$\sigma_R = \sigma_{axial} - \frac{Q}{A_T} \tag{15}$$

donde A_T es el área transversal de la probeta. Estas fuerzas son aplicadas según una secuencia que cuenta con tres pasos (*steps*). En el paso uno, la fuerza compresiva es aplicada gradualmente, permaneciendo constante por el resto de la simulación. Para el paso dos, los esfuerzos axial y de reacción son aplicados gradualmente hasta obtener su valor máximo. En el tercer paso, el valor de los esfuerzos disminuye a su valor mínimo, los cuales están dados según una relación entre los valores mínimo y máximo en el esfuerzo axial y tangencial, siendo estos de 0.1 y –1, respectivamente. La aplicación de las condiciones de frontera se puede observar en la Fig. 2. El comportamiento del sistema fue considerado como deformación plana, dado que experimentalmente se presentó una grieta simétrica que se propagó más en profundidad que en grosor, demostrando esta condición [6]. Respecto a la condición de contacto, este presenta un comportamiento friccional, cuyo coeficiente de fricción es de 0.65, el cual fue encontrado experimentalmente en diferentes estudios [6,20]. Además de esto, se aplica una formulación de Lagrange aumentada pues se comporta adecuadamente al considerar la fricción [21].

TABLA II. Propiedades de la Aleación de Aluminio 2024-T3 [6,15]

Módulo de rigidez	$G = 27.1$ GPa
Coeficiente de resistencia a la fatiga	$\sigma'_f = 835$ MPa
Coeficiente de resistencia a fatiga cortante	$\tau'_f = 482.08$ MPa
Coeficiente de ductilidad a fatiga cortante	$\gamma'_f = 0{,}2944$
Exponente de resistencia a fatiga cortante	$b' = -0{,}096$
Exponente de ductilidad a fatiga cortante	$c' = -0{,}644$
Límite de fatiga a tracción	$\sigma_{f-1} = 114.9$ MPa
Límite de fatiga a torsión	$\tau_{f-1} = 66.34$ MPa

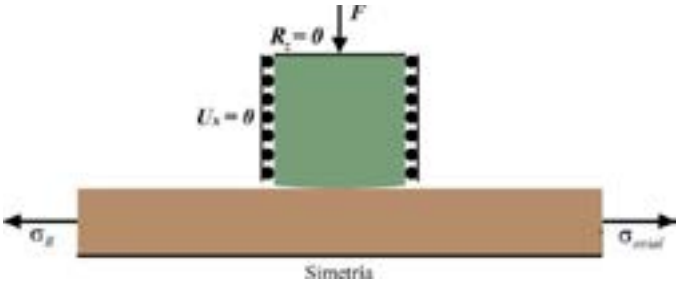


Fig. 2. Representación de las condiciones de frontera del modelo de elementos finitos.

A. Valores de Coeficiente de Fricción Evaluados

Como se estipuló anteriormente, se ha determinado que el coeficiente de fricción para esta configuración es de 0.65. Sin embargo, se sabe que este coeficiente inicia con un valor pequeño, que aumenta a medida que las capas más externas de material se desprenden hasta alcanzar su valor máximo. A partir de los resultados experimentales de Hojjati-Talemi et al. [6], a pesar de no mencionar directamente el valor inicial del coeficiente de fricción, este se puede estimar indirectamente usando una metodología matemática propuesta por Dini et al. [22]. Esta metodología propone una ecuación con la cual, a partir del coeficiente de fricción inicial y el coeficiente de fricción promedio, se puede calcular el coeficiente de fricción máximo en la zona de contacto. En este caso, como se conocen los coeficientes de fricción promedio y máximo en la zona de contacto (0.48 y 0.65, respectivamente), se puede estimar el coeficiente de fricción inicial, obteniendo un valor de 0.36, el cual será tomado como mínimo coeficiente de fricción en este estudio.

Para estudiar otros coeficientes de fricción, se tomaron dos valores intermedios y otros dos superiores a 0.65, para poder analizar la evolución de la vida de nucleación de grieta durante el proceso de degradación de la superficie de contacto, y para casos hipotéticos donde el coeficiente de fricción fuera mayor a aquel encontrado experimentalmente. Estos valores de coeficiente de fricción serán 0.46, 0.55, 0.75 y 0.84.

B. Independencia de Malla

Pereira et al. [13] propusieron una metodología de mallado, en la cual se mantiene un tamaño global de malla de 0.5 mm, excepto en las aristas en las cuales se genera el contacto. En el área de contacto, se establecen dos particiones rectangulares de 2.3 veces el semi ancho de contacto, las cuales cuentan con elementos con el mínimo tamaño de malla; por otro lado, el resto de la arista tiene un tamaño variable de elemento entre el tamaño mínimo y 0.5 mm. Otra metodología de mallado utilizada, se puede observar en la Fig. 15 de [6], donde el tamaño de la malla alcanza su valor mínimo directamente en la zona de contacto, es decir, se realiza una partición directamente en la arista, disminuyendo la densidad de elementos en la zona y obteniendo resultados acordes a la teoría. En este caso se tomaron ambas metodologías como referencia para definir la malla, se realizó una partición en las aristas de contacto con tamaño igual a 3.45 veces el semi ancho de contacto, siguiendo una metodología similar a la de [13] para el tamaño de los elementos para el resto de las aristas, tal como se observa en la Fig. 3. Respecto al tamaño mínimo de la malla, este varía entre investigadores y experimentos. Yue [23] y Cruzado [24] realizaron sus simulaciones por medio de elementos de 10 µm, Hojjati-Talemi [6] e Infante-García [25] hacen uso de elementos de 5 µm, Deng [5] y Wang [15] utilizan elementos de 2 µm. Debido a la variedad de tamaños, para determinar la configuración más adecuada del mallado, se realizó un estudio de esfuerzos durante el fretting tal y como se mencionó en la sección III. Los tamaños de malla usados varían desde 10 µm hasta 2 µm, en la zona de contacto, usando como referencia las fuerzas y esfuerzos aplicados al sistema durante la prueba 1 que se muestra en la tabla I.

La tabla III muestra los esfuerzos máximos obtenidos mediante la teoría de contacto Hertziano, así como el resultado obtenido para cada tamaño de malla y el porcentaje de error de este resultado respecto al valor analítico. Como se puede apreciar, cada una de las pruebas realizadas brinda un valor cercano al teórico, con errores menores al 10%. Sin embargo, a medida que disminuye el tamaño de elemento, aumentan los esfuerzos cortante y de tracción máximo, acercándose más al valor teórico en el primero, pero alejándose de este en el segundo. Considerando esta condición, se seleccionó como tamaño de malla aquel donde los tres esfuerzos máximos se encuentran por debajo de un error del 3%, es decir, un tamaño de malla de 4 µm.

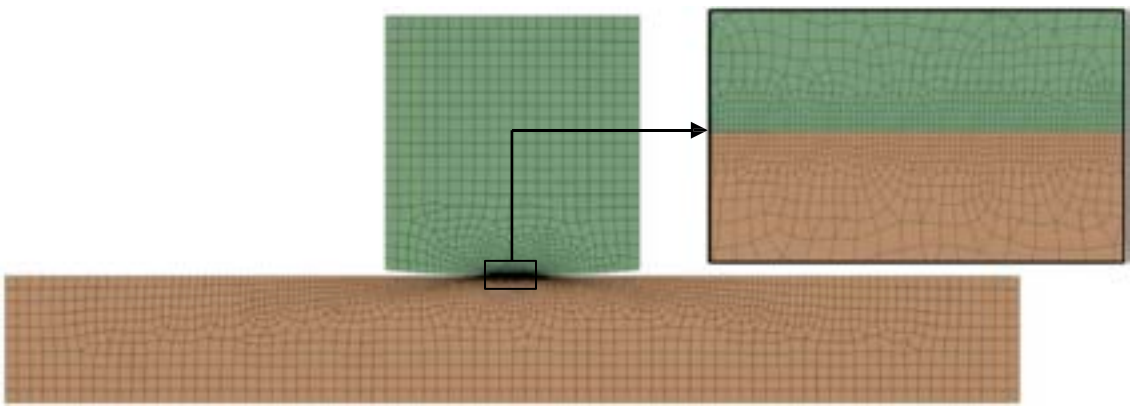


Fig. 3. Representación de la metodología de mallado utilizada.

TABLA III. VALORES DE ESFUERZO Y ERROR RELATIVO DEL ANÁLISIS DE INDEPENDENCIA DE MALLA

Tamaño de malla (µm)	Presión máxima (MPa)		Esfuerzo cortante máximo (MPa)		Esfuerzo de tracción máximo (MPa)	
Teórico	186.98		102.05		261.17	
10	186.91	0.04%	95.364	6.55%	257.51	1.40%
8	186.99	0.01%	96.424	5.51%	264.84	1.41%
6	187.07	0.05%	95.569	6.35%	261.97	0.34%
5	187.12	0.07%	98287	3.69%	266.1	1.89%
4	187.2	0.12%	99.071	2.92%	268.26	2.71%
3	187.31	0.18%	99.772	2.23%	274.45	5.08%
2	187.26	0.15%	100.7	1.32%	275.9	5.64%

V. RESULTADOS Y DISCUSSION

A. *Post-Procesamiento de los Datos de Simulación*

Una vez finalizada la simulación del proceso de fretting, se obtienen los datos de la deformación unitaria y esfuerzo normal en las direcciones *x* y *y*, así como la deformación unitaria y esfuerzo cortante en la zona de contacto de la probeta, específicamente al finalizar los pasos 2 y 3. Estos datos son exportados en formato de texto e importados en Matlab para realizar el análisis de los parámetros de daño FS y FP. Para calcular estos parámetros, se utilizó una metodología similar a Bhatti et al. [26], donde los datos de esfuerzo y deformación son importados en matrices de dos columnas, cada columna representando uno de los pasos clave para el análisis. Posteriormente se analizan, nodo por nodo, los esfuerzos y deformaciones aplicando transformaciones de círculo de Mohr para cada paso, buscando el máximo esfuerzo normal, y máximo y mínimo esfuerzo (para FP) o deformación (para FS) cortante en el plano de análisis. A partir de estos valores, se calcula el valor del parámetro de daño en el nodo, seleccionando aquel con mayor valor y el ángulo o plano en que se encontró este valor. Seguidamente, a partir de los valores máximos nodales, se selecciona el nodo cuyo parámetro de daño sea el mayor, siendo esta la posición donde se presume nucleará la grieta. Por último, con el máximo valor del parámetro de daño, se calcula la vida de nucleación de grieta haciendo uso de (11) o (14) según el parámetro de daño que se haya calculado. La Fig. 4 muestra el procedimiento descrito anteriormente como un diagrama de flujo.

B. *Vida de Nucleación de Grieta para Diferentes Coeficientes de Fricción*

Al aplicar el algoritmo desarrollado anteriormente, se puede obtener la posición, ángulo y vida de nucleación de grieta. Así mismo, se puede generar una gráfica en la que se puede observar el comportamiento de los parámetros de daño respecto a la posición. En la Fig. 5 se muestra este comportamiento, pudiéndose distinguir que se presume la nucleación de la grieta cerca al *trailing edge* del contacto entre el indentador y la probeta. Así mismo, en la gráfica se puede distinguir la zona de adherencia de la zona de deslizamiento, al presentarse un cambio abrupto en el comportamiento del parámetro de daño.

Al comparar el comportamiento del parámetro de daño FS cuando se varía el coeficiente de fricción, tal y como se muestra en la Fig. 6, se pueden apreciar cambios tanto en la zona de adherencia como en la zona de deslizamiento. A pesar de que la forma de las gráficas es similar, a medida que se aumenta el coeficiente de fricción, también aumenta la zona de adherencia, pues la zona de contacto tiene menor capacidad de contrarrestar la tracción generada entre las superficies. Adicionalmente, el daño ocasionado en esta disminuye con respecto a otros valores de coeficiente de fricción, pues en sitios aledaños al centro del contacto, se tiene un valor de parámetro de daño mayor para un coeficiente de fricción de 0.36 que al aplicar un coeficiente de fricción de 0.65 o 0.84.

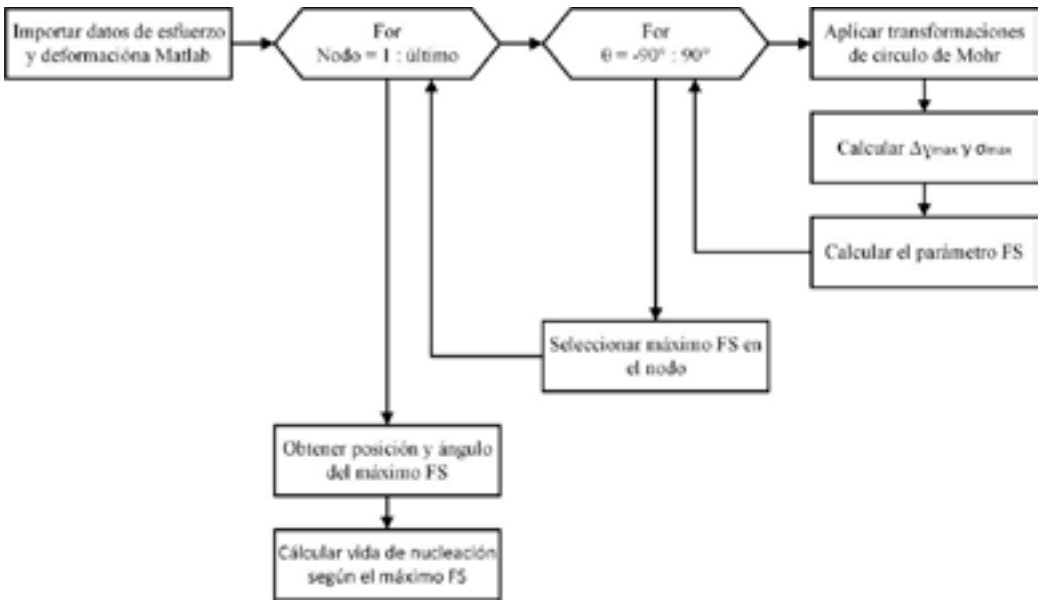


Fig. 4. Diagrama de flujo para el cálculo de la vida de nucleación usando el parámetro FS.

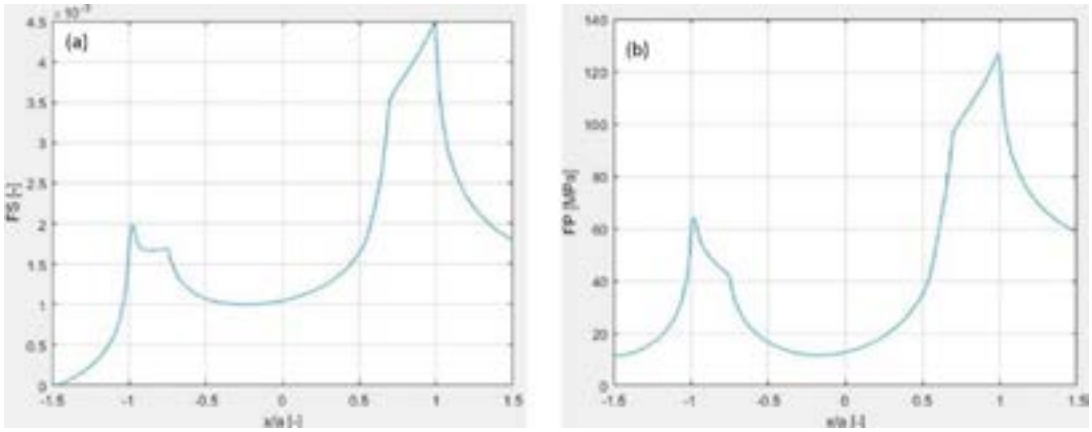


Fig. 5. Comportamiento de los parámetros de daño: (a) FS y (b) FP, respecto a la posición.

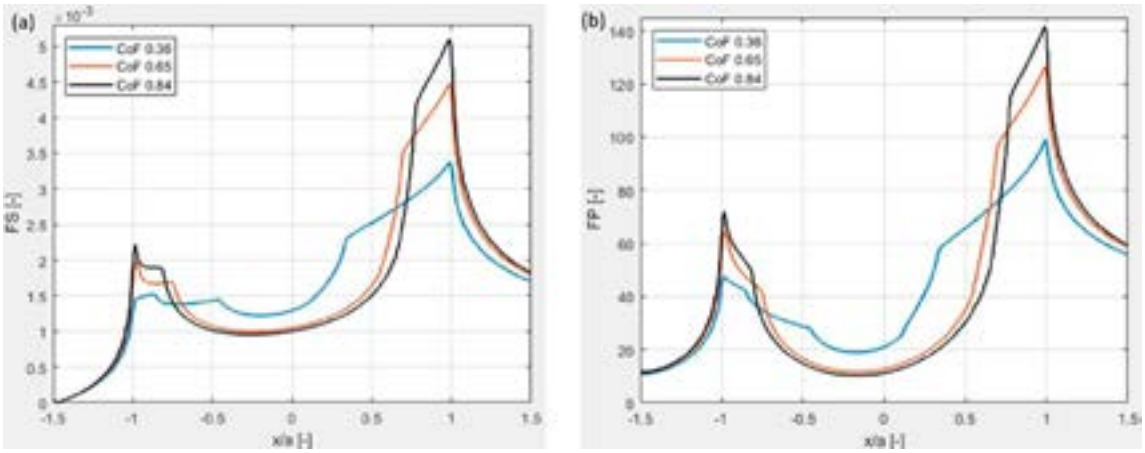


Fig. 6. Evolución del parámetro de daño: (a) FS y (b) FP, para coeficientes de fricción de 0.36, 0.65 y 0.84.

Por otro lado, el máximo valor del parámetro de daño va a permanecer cerca al *trailing edge*, aumentando su valor a medida que aumenta el coeficiente de fricción. Este incremento puede deberse al aumento en los esfuerzos cortantes y a tracción en la zona de contacto, pues, según la mecánica de contacto, estas dependen directamente del coeficiente de fricción, y los parámetros de daño dependen del comportamiento de estos esfuerzos.

La tabla IV muestra la posición, ángulo y vida de nucleación de grieta para cada uno de los parámetros y pruebas realizadas. Tal y como se describe en la literatura, la grieta nuclea cerca del *trailing edge* pues el valor obtenido para la posición relativa al semi-ancho de contacto es cercano a 1. Sin embargo, el ángulo de nucleación se encuentra en dirección opuesta a aquella encontrada experimentalmente, la cual variaba entre –35° y –45°. Respecto a los diferentes valores de coeficiente de fricción, la posición en la que nuclea la grieta no varía significativamente, pues esta normalmente se encontró en el mismo nodo para todas las condiciones analizadas, excepto la 3. Así mismo, a medida que el coeficiente de fricción aumenta, el ángulo de nucleación disminuye, de modo que la grieta nuclea con menor oblicuidad para condiciones más adversas en el contacto entre las superficies.

Una mejor manera para comparar los resultados de la vida de nucleación para las diferentes condiciones de fricción es mediante el desarrollo de una gráfica semilogarítmica donde el eje horizontal representa el coeficiente de fricción aplicado entre las piezas, y el eje vertical la vida predicha. Adicionalmente, la vida experimentalmente obtenida será graficada como una recta horizontal en la misma gráfica. Estas gráficas se pueden observar en la Fig. 7 para las cuatro pruebas analizadas. Todas las gráficas presentan un comportamiento de vida similar respecto al coeficiente de fricción, es decir, todas presentan un comportamiento similar a una recta con una ligera curvatura, la cual se acerca a la recta experimental cuando el coeficiente de fricción es igual a 0.65, valor utilizado en la literatura para esta configuración.

Se puede observar que, generalmente, los resultados obtenidos usando los parámetros de daño son conservadores respecto a los resultados experimentales, puesto que la vida obtenida para un coeficiente de fricción de 0.65 se encuentra por debajo del resultado experimental. Esta particularidad en los parámetros de daño también se puede analizar según el valor de coeficiente de fricción donde la curva intercepta la recta de vida experimental, es decir, sería necesario analizar el modelo de fatiga con un coeficiente de fricción entre 0.57 y 0.6 al usar el parámetro FS y un coeficiente de fricción entre 0.52 y 0.55 para el parámetro FP, tal que la vida predicha sea similar a la vida experimental.

TABLA IV. RESULTADOS DE POSICIÓN, ÁNGULO Y VIDA DE NUCLEACIÓN DE GRIETA PARA DIFERENTES VALORES DE COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Número de prueba	Coeficiente de fricción	FS			FP		
		x/a (mm/mm)	θ (°)	$N_{nucleación}$ (10^6 ciclos)	*x/a* (mm/mm)	θ (°)	$N_{nucleación}$ (10^6 ciclos)
1	0.36	0.99	38	16.9	0.9987	37	7.36
	0.46	0.99	37	5.34	0.99	35	2.72
	0.55	0.99	36	2.08	0.99	34	1.16
	0.65	0.99	36	0.936	0.99	34	0.568
	0.75	0.99	35	0.468	0.99	33	0.304
	0.84	0.99	34	0.256	0.99	33	0.175
2	0.36	0.99	38	5.66	0.9987	37	2.77
	0.46	0.99	37	1.78	0.99	35	1.00
	0.55	0.99	36	0.699	0.99	35	0.432
	0.65	0.99	36	0.317	0.99	34	0.212
	0.75	0.99	35	0.162	0.99	34	0.114
	0.84	0.99	35	0.0900	0.99	34	0.0659
3	0.36	0.99	38	2.62	0.99	35	1.37
	0.46	0.99	37	0.838	0.99	35	0.497
	0.55	0.99	36	0.336	0.99	35	0.219
	0.65	0.99	36	0.156	0.99	34	0.109
	0.75	0.99	35	0.0817	0.99	34	0.0594
	0.84	0.99	35	0.0466	0.99	34	0.0346
4	0.36	0.99	38	1.28	0.9987	37	0.701
	0.46	0.99	37	0.427	0.99	35	0.265
	0.55	0.99	36	0.177	0.99	35	0.120
	0.65	0.99	36	0.0854	0.99	34	0.0610
	0.75	0.99	35	0.0461	0.99	34	0.0338
	0.84	0.99	35	0.0271	0.99	34	0.0200

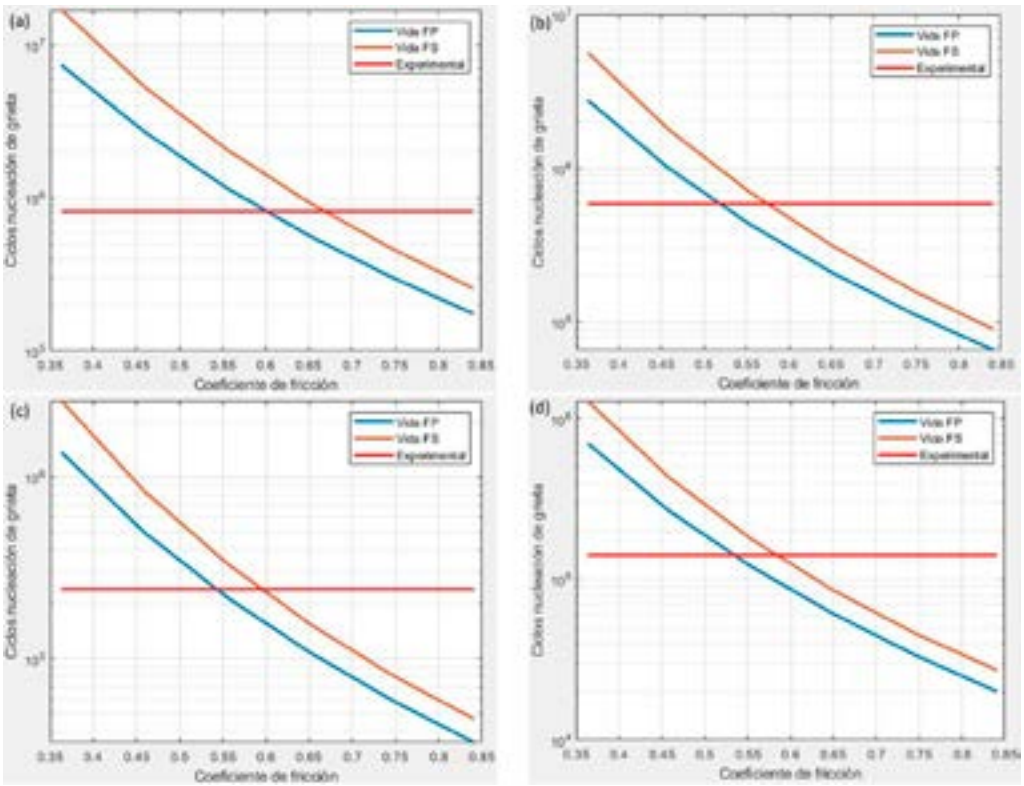


Fig. 7. Vida de nucleación de grieta versus coeficiente de fricción para: (a) prueba 1, (b) prueba 2, (c) prueba 3 y (d) prueba 4.

Las curvas de la vida predicha mediante los parámetros de daño muestran que a medida que se incrementa el coeficiente de fricción, la vida de nucleación de grieta disminuye menos drásticamente. Por ejemplo, para la prueba 1, respecto al parámetro FS, cuando el coeficiente de fricción aumenta desde 0.36 a 0.46, la vida de nucleación disminuye a un tercio de su valor; sin embargo, al aumentar el coeficiente de fricción de 0.75 a 0.84, la vida disminuye a un poco más de la mitad de su valor inicial. De este modo, se puede observar que un incremento en el coeficiente de fricción tiene efectos más adversos en la vida de nucleación de grieta cuando este es bajo.

VI. Conclusiones

En la presente investigación, se desarrolló un modelo 2D de fatiga por fretting, por medio del método de elementos finitos. Este modelo fue utilizado para evaluar el efecto de diferentes valores de coeficiente de fricción en la posición, ángulo y vida de nucleación de grieta implementando un código en Matlab. El modelo construido consta de una configuración tipo cilindro-plano, donde tanto la probeta como el indentador están hechos en aleación de aluminio 2024-T3. A partir de los resultados obtenidos, se obtuvieron las siguientes conclusiones, las cuales pueden ser útiles para otros casos de fatiga por fretting.

1. Los valores predichos por ambos parámetros de daño aumentan con el coeficiente de fricción. Por consiguiente, para los primeros ciclos de la fatiga por fretting, donde el coeficiente de fricción comienza con un valor pequeño, el daño generado es menor a aquel cuando se alcanza un valor de fricción estable.
2. La posición de nucleación de grieta permanece prácticamente constante sin importar la carga aplicada o el coeficiente de fricción entre los elementos. Por otro lado, el ángulo de nucleación de grieta se vuelve menos oblicuo a medida que se incrementa el coeficiente de fricción.
3. Al evaluar la vida de nucleación de grieta, esta se comporta inversamente proporcional al coeficiente de fricción en una escala logarítmica.
4. Para un coeficiente de fricción de 0.65, valor máximo para esta configuración, ambos parámetros de daño presentan un comportamiento conservador respecto a los resultados reales, dado que la vida predicha es menor a la experimental.
5. En el caso de que se pueda controlar el coeficiente de fricción entre las partes en contacto, se recomendaría mantener la zona de contacto correctamente lubricada, tal que se disminuya el coeficiente de fricción, y por lo tanto se incremente la vida útil de las partes.
6. Para una configuración de fatiga por fretting, si el coeficiente de fricción aumenta súbitamente, su efecto tendrá menor repercusión si originalmente las partes en contacto presentan alta fricción entre ellas, puesto que la vida útil de las piezas disminuye un porcentaje menor para contactos con mayores valores de coeficiente de fricción.

Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo con el apoyo financiero de la Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia), a través de la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión, en el marco de un proyecto de investigación titulado “Predicción de la iniciación de grietas de fatiga por fretting mediante redes neuronales profundas”, con código "8-25-1".

Referencias

[1] J. Ding, “The effect of slip regime on fretting wear-induced stress evolution,” Int. J. Fatigue, vol. 26, pp. 521–531, 2004, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2003.09.001.

[2] T. N. Chakherlou, M. Shakouri, A. Akbari y A. B. Aghdam, “Effect of cold expansion y bolt clamping on fretting fatigue behavior of Al 2024-T3 in double shear lap joints,” Eng. Fail. Anal., vol. 25, pp. 29–41, 2012, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.04.008.

[3] R. Rajasekaran y D. Nowell, “Fretting fatigue in dovetail blade roots: Experiment y analysis,” Tribol. Int., vol. 39, pp. 1277–1285, 2006, DOI:10.1016/j.triboint.2006.02.044.

[4] Y. B. Zhang, L. T. Lu, L. Zou, D. F. Zeng y J. W. Zhang, “Finite element simulation of the influence of fretting wear on fretting crack initiation in press-fitted shaft under rotating bending,” Wear, vol. 400–401, pp. 177–183, 2018, DOI:10.1016/j.wear.2018.01.008.

[5] Q. Deng, N. Bhatti, X. Yin y M. Abdel Wahab, “Numerical modeling of the effect of randomly distributed inclusions on fretting fatigue-induced stress in metals,” Metals (Basel), vol. 8, 836, 2018, DOI: 10.3390/met8100836.

[6] R. Hojjati-Talemi, M. Abdel Wahab, J. De Pauw y P. De Baets, “Prediction of fretting fatigue crack initiation y propagation lifetime for cylindrical contact configuration,” Tribol. Int., vol. 76, pp. 73–91, 2014, DOI:10.1016/j.triboint.2014.02.017.

[7] N. A. Bhatti, K. Pereira y M. Abdel Wahab, “Effect of stress gradient y quadrant averaging on fretting fatigue crack initiation angle y life,” Tribol. Int., vol. 131, pp. 212–221, 2019, DOI: 10.1016/j.triboint.2018.10.036.

[8] M. P. Szolwinski y T. N. Farris, “Mechanics of fretting fatigue crack formation,” Wear, vol. 198, pp. 93–107, 1996, DOI: 10.1016/0043-1648(96)06937-2.

[9] D. R. Swalla y R. W. Neu, “Influence of coefficient of friction on fretting fatigue crack nucleation prediction,” Tribol. Int., vol. 34, pp. 493-503, 2001, DOI: 10.1016/S0301-679X(01)00048-2.

[10] N. K. Ramakrishna Naidu y S. Ganesh Sundara Raman, “Effect of contact pressure on fretting fatigue behaviour of Al-Mg-Si alloy AA6061,” Int. J. Fatigue, vol. 27, pp. 283–291, 2005, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2004.07.001.

[11] K. Pereira y M. Abdel Wahab, “Fretting fatigue crack propagation lifetime prediction in cylindrical contact using an extended MTS criterion for non-proportional loading,” Tribol. Int., vol. 115, pp. 525–534, 2017, DOI: 10.1016/j.triboint.2017.06.026.

[12] K. L. Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University Press, 1985, DOI: 10.1017/CBO9781139171731.

[13] K. Pereira, S. Bordas, S. Tomar, R. Trobec, M. Depolli, G. Kosec et al., “On the convergence of stresses in fretting fatigue,” Materials, vol. 9, 639, 2016, DOI:10.3390/ma9080639.

[14] D. A. Hills, D. Nowell y A. Sackfield, “Surface fatigue considerations in fretting,” Tribology Series, vol. 12, pp. 35–40, 1987, DOI: 10.1016/S0167-8922(08)71046-0.

[15] C. Wang, C. Li, Y. Ling y M. Abdel Wahab, “Investigation on fretting fatigue crack initiation in heterogenous materials using a hybrid of multiscale homogenization y direct numerical simulation,” Tribol. Int., vol. 169, 2022, DOI:10.1016/j.triboint.2022.107470.

[16] A. Fatemi y D. F. Socie, “A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading,” Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., vol. 11, pp. 149–165, 1988, DOI:10.1111/j.1460-2695.1988.tb01169.x.

[17] D. Socie, “Critical plane approaches for multiaxial fatigue damage assessment. advances in multiaxial fatigue,” in Advances in Multiaxial Fatigue, D. L. McDowell y J. R. Ellis, Eds. ASTM Int., 1993, DOI: 10.1520/STP24793S.

[18] W. N. Findley, "A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion y axial load or bending," J. Eng. Ind., vol. 81, pp. 301–305, 1959, DOI:10.1115/1.4008327.

[19] J. Park y D. Nelson, "Evaluation of an energy-based approach y a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life," Int. J. Fatigue, vol. 22, pp. 23-39, 2000, DOI: 10.1016/S0142-1123(99)00111-5.

[20] M. P. Szolwinski y T. N. Farris, "Observation, analysis y prediction of fretting fatigue in 2024-T351 aluminum alloy," Wear, vol. 221, pp. 24–36, 1998, DOI:10.1016/S0043-1648(98)00264-6.

[21] D. Erena, V. Martín, J. Vázquez y C. Navarro, "Influence of the rolling of contact pads on crack initiation in fretting fatigue tests," Int. J. Fatigue, vol. 163, 107087, 2022, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2022.107087.

[22] D. Dini y D. Nowell, "Prediction of the slip zone friction coefficient in flat y rounded contact," Wear, vol. 254, pp. 364–369, 2003, DOI:10.1016/S0043-1648(03)00010-3.

[23] T. Yue y M. Abdel Wahab, "Finite element analysis of fretting wear under variable coefficient of friction y different contact regimes," Tribol. Int., vol. 107, pp. 274–282, 2017, DOI:10.1016/j.triboint.2016.11.044.

[24] A. Cruzado, S. B. Leen, M. A. Urchegui y X. Gómez, "Finite element simulation of fretting wear y fatigue in thin steel wires," Int. J. Fatigue, vol. 55, pp. 7–21, 2013, DOI:10.1016/j.ijfatigue.2013.04.025.

[25] D. Infante-García, E. Giner, H. Miguélez y M. Abdel Wahab, "Numerical analysis of the influence of microvoids on fretting fatigue crack initiation lifetime," Tribol. Int., vol. 135, pp. 121–129, 2019, DOI:10.1016/j.triboint.2019.02.032.

[26] N. A. Bhatti y M. Abdel Wahab, "A numerical investigation on critical plane orientation y initiation lifetimes in fretting fatigue under out of phase loading conditions," Tribol. Int., vol. 115, pp. 307–318, 2017, DOI:10.1016/j.triboint.2017.05.036.

Evaluación sistémica de la seguridad en infraestructura educativa: evolución y aplicación del modelo ISIU Colombia 2.0

Carlos Arturo García Ocampo
Programa de Ingeniería Civil / Maestría en Gestión del Riesgo de Desastres
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
cacivil_uq@uniquindio.edu.co
ORCID: 0000-0003-2544-7186

***Resumen*— Las Instituciones de Educación Superior (IES) albergan comunidades vulnerables y activos críticos que requieren entornos seguros y resilientes. Bajo el Marco de Sendai 2015-2030 y la Ley 1523 de 2012 en Colombia, la reducción del riesgo de desastres en infraestructuras universitarias es una prioridad. A pesar de los avances, persiste la necesidad de contar con herramientas técnicas estandarizadas que permitan caracterizar escenarios de riesgo de forma integral, considerando las particularidades del contexto nacional y las nuevas dinámicas del cambio climático.**

Se presenta la evolución del Índice de Seguridad en Instalaciones Universitarias hacia la versión "ISIU Colombia 2.0". La metodología se basa en una herramienta técnica-pedagógica de evaluación diagnóstica que analiza tres dimensiones fundamentales: (1) seguridad estructural, (2) seguridad no estructural y (3) gestión de emergencias y desastres. El modelo emplea un enfoque sistémico para la captura de datos en campo, permitiendo a estudiantes y profesionales de ingeniería caracterizar niveles de riesgo mediante una matriz indicativa de probabilidad e impacto.

La aplicación del modelo en estudios de caso (ej. Universidad del Quindío) ha permitido identificar vulnerabilidades críticas en infraestructuras existentes. El uso de la herramienta ISIU facilitó la priorización de intervenciones basadas en evidencia técnica, logrando categorizar las instalaciones según su nivel de seguridad. La actualización 2.0 integra lecciones aprendidas de evaluaciones previas, optimizando la precisión de los indicadores y fortaleciendo la capacidad de las IES para formular planes de mitigación y adaptación efectivos.

El ISIU Colombia 2.0 se consolida como una herramienta esencial para la gobernanza del riesgo en el sector educativo. Su implementación no solo mejora la seguridad física de la infraestructura, sino que fomenta una cultura de prevención en la formación de ingenieros, alineando la gestión técnica con los objetivos globales de desarrollo sostenible y resiliencia urbana.

Palabras clave*— *Gestión del riesgo de desastres; infraestructura universitaria; ISIU Colombia; resiliencia institucional; seguridad estructural; grado de exposición.

I. Introducción

Las Instituciones de Educación Superior (IES) desempeñan un rol estratégico en la sociedad, no solo como centros de formación académica, sino como actores clave en la reducción del riesgo de desastres. El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 [1] establece como prioridad cuatro el fortalecimiento de la preparación ante desastres a todos los niveles, incluyendo el sector educativo. En Colombia, la Ley 1523 de 2012 [2] instituye el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), imponiendo a las entidades públicas la obligación de formular planes institucionales de gestión del riesgo.

La Universidad del Quindío se ubica en Armenia (Colombia), departamento clasificado como zona de amenaza sísmica alta según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 [3]. La región fue devastada por el sismo del 25 de enero de 1999 (Mw 6.2), que causó más de 1.900 muertes y destruyó gran parte de la infraestructura regional. Este contexto impone a la institución una responsabilidad ineludible frente a la seguridad de sus más de 18.000 usuarios activos distribuidos en un campus de aproximadamente 52 edificaciones.

El Índice de Seguridad en Instalaciones Universitarias (ISIU) fue desarrollado en 2017 por REDULAC/RRD, CSUCA y USAID-OFDA [4] como instrumento de evaluación diagnóstica del nivel de seguridad ante desastres en campus universitarios. En 2019, García-Ocampo y Martínez-Medina [5] elaboraron la Guía del Evaluador adaptada a Colombia en el marco del Convenio Interadministrativo No. 9677-PPAL001-129-2019 entre la UNGRD y la Universidad del Quindío, dando origen al ISIU Colombia 1.0.

Las evaluaciones realizadas en 2019 cubrieron dos zonas del campus (Zonas 1 y 2) utilizando la fórmula original de tres componentes [6], [7]. Sin embargo, esa metodología no consideraba el entorno territorial de cada edificación ni la diferencia en el nivel de impacto potencial según la ocupación y la relevancia funcional de cada instalación. El presente artículo documenta la evolución metodológica hacia el ISIU Colombia 2.0, aplicado en tres trabajos de grado simultáneos durante 2024-2025 que cubrieron la totalidad del campus universitario, y analiza los resultados obtenidos desde una perspectiva pedagógica e investigativa.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A. Origen y fundamentos del ISIU

El ISIU se deriva conceptualmente del Índice de Seguridad Hospitalaria (ISH) de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) [8], adaptado para el contexto universitario latinoamericano. Su estructura original evalúa tres dimensiones: seguridad estructural (*SE*), seguridad no estructural (*SNE*) y seguridad funcional (*SF*), sintetizadas en la siguiente expresión:

$$ISIU = 0{,}50 \cdot SE + 0{,}30 \cdot SNE + 0{,}20 \cdot SF \quad (1)$$

El resultado se clasifica en tres niveles: Alto (≥ 66%), Medio (36–65%) y Bajo (< 36%). Esta escala fue adoptada para la versión Colombia e incorpora la normativa nacional: NSR-10, RETIE, RETILAP, NTC 4140, 4143, 4145, 4201 y 4595.

B. Adaptación Colombia 2019

La Guía del Evaluador ISIU Colombia [5] representa la primera adaptación sistemática del instrumento al marco normativo colombiano. Se compone de cuatro formularios estructurados: (F1) Información General, (F2) Evaluación de Emplazamiento de Sitio, (F3.1) Seguridad Estructural, (F3.2) Seguridad No Estructural y (F3.3) Seguridad Funcional. Cada formulario incluye listas de verificación con indicadores ponderados que permiten obtener una calificación normalizada en escala de 0 a 100.

La evaluación del emplazamiento (F2) contempla nueve componentes: hidrometeorológico, geológico-geotécnico, socio-natural, antrópico, bioclimático, ecosistema, medio construido, institucional-social, y movilidad y parqueaderos. Esta dimensión, aunque presente en el formulario original, no era considerada en el cálculo del ISIU 1.0, constituyendo una limitación metodológica relevante.

C. Aplicaciones previas en la Universidad del Quindío

Los primeros trabajos de grado que aplicaron el ISIU Colombia evaluaron las Zonas 1 y 2 del campus [6], [7], cubriendo aproximadamente el 40% de las edificaciones. Sus resultados mostraron que la mayoría de las edificaciones clasificaba en nivel Medio de seguridad, con deficiencias predominantes en el componente funcional (planes de emergencia, señalización y rutas de evacuación). Estos antecedentes evidenciaron la necesidad de actualizar la metodología e incrementar la cobertura al campus completo.

En la figura 1, a continuación, se observa una línea de tiempo que describe la evolución del índice de Seguridad de las Instalaciones Universitarias – ISIU.

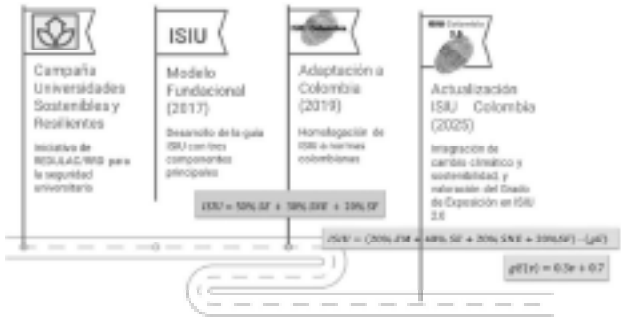


Fig. 1. Línea de tiempo de la evolución del ISIU

III. EVOLUCIÓN METODOLÓGICA: ISIU COLOMBIA 2.0

A. Actualización de formularios y digitalización en Survey123

Una de las innovaciones centrales del ISIU Colombia 2.0 es la digitalización completa de los formularios de campo en la plataforma Survey123 Connect (Esri). Este proceso implicó la revisión y actualización de cada formulario para alinearlo con la normativa colombiana vigente, la incorporación de registros fotográficos georreferenciados y la automatización de reportes de campo en PDF. La digitalización redujo los errores de captura, permitió la sincronización en tiempo real con ArcGIS Online y facilitó la creación posterior de cartografía temática.

Los formularios digitales incorporan lógica condicional que activa preguntas específicas según el tipo de edificación evaluada, el sistema constructivo identificado y el nivel de complejidad de las instalaciones. El Formulario 1 (Información General) capturas coordenadas GPS del centroide de la edificación, área total construida, año de construcción, normativa de diseño aplicada y capacidad máxima de usuarios.

B. Nueva fórmula de ponderación con componente de emplazamient

La principal actualización metodológica consiste en la incorporación de la Evaluación de Emplazamiento (*EM*) como componente activo del índice. Con base en análisis de sensibilidad realizados por García-Ocampo (comunicación personal, 2025), se propuso la siguiente redistribución de ponderaciones:

$$ISIU_{2.0} =. 0{,}20 \cdot EM + 0{,}40 \cdot SE + 0{,}20 \cdot SNE + 0{,}20 \cdot SF \quad (2)$$

Esta redistribución reduce el peso de la seguridad estructural del 50% al 40% e introduce la evaluación del entorno territorial con un 20%, reflejando la comprensión sistémica del riesgo

como función de la amenaza del sitio, la vulnerabilidad física y la exposición. La reducción del componente estructural responde al hecho de que las edificaciones más recientes del campus ya cumplen con los requerimientos de la NSR-10, mientras que persisten deficiencias significativas en el entorno territorial y en la gestión funcional.

C. Incorporación del Grado de Exposición (gE)

El grado de exposición (*gE*) es un factor multiplicador que modula el $ISIU_{2.0}$ según la importancia relativa de cada edificación dentro del campus. Se calcula a partir de tres variables: capacidad máxima de usuarios (v_1), área total construida (v_2) y pertinencia institucional de la edificación (v_3). Su valor oscila entre 0,7 y 1,0, conforme a la siguiente expresión lineal:

$$gE(v) = 0{,}3v + 0{,}7 \quad (3)$$

Donde $v \in [0,1]$ es un índice normalizado que pondera las tres variables. Un $gE = 0{,}7$ indica la máxima exposición (edificaciones con alta ocupación, gran área y alta pertinencia institucional, como la Facultad de Ingeniería), lo que implica que el $ISIU_{2.0}$ resultante se reduce en hasta un 30% respecto al valor calculado sin corrección. Un $gE = 1{,}0$ corresponde a instalaciones de mínima exposición (casetas de vigilancia, invernaderos). La fórmula final con grado de exposición es:

$$ISIU_{2.0} \cdot gE = (0{,}20 \cdot EM + 0{,}40 \cdot SE + 0{,}20 \cdot SNE + 0{,}20 \cdot SF) \times gE \quad (4)$$

Este factor permite jerarquizar las inversiones de reforzamiento y actualización hacia aquellas instalaciones donde una falla generaría el mayor impacto sobre la comunidad universitaria.

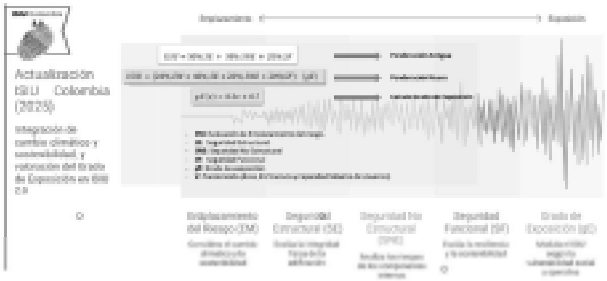


Fig. 2. Nuevos Estándares y Métodos de Cálculo - ISIU 2.0.

D. Clasificación del índice actualizado

La escala de clasificación del ISIU Colombia 2.0 mantiene los tres niveles originales, pero ajusta los umbrales para la versión afectada por el *gE*:

TABLA I. CLASIFICACIÓN DEL ISIU COLOMBIA 2.0 CON Y SIN FACTOR GE.

Clasificación	**$ISIU_{2.0}$ sin gE (%)**	**$ISIU_{2.0}$ × gE (%)**
Alto	≥ 66	≥ 56
Medio	36 – 65	28 – 55
Bajo	< 36	< 28

IV. APLICACIÓN EN LA UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO

A. Contexto institucional y territorial de riesgo

La Universidad del Quindío (Uniquindío) es una institución pública de educación superior acreditada, con más de 18.000 estudiantes y aproximadamente 2.000 docentes y administrativos. Su campus principal en Armenia ocupa una extensión de aproximadamente 24 hectáreas y alberga más de 52 edificaciones. El campus está clasificado en el Grupo de Uso III de la NSR-10 (instalaciones de especial importancia), lo que eleva los estándares de diseño exigidos.

El departamento del Quindío presenta múltiples amenazas convergentes: sismicidad alta (zona Aa de la NSR-10), amenaza volcánica por el Volcán Cerro Machín (SGC), riesgo de inundación por el río Quindío y sus afluentes, amenaza de movimientos en masa en taludes del campus, actividad ceráunica con densidades de descarga superiores a 30 descargas/km²/año (IDEAM), y riesgos antrópicos derivados del almacenamiento de materiales peligrosos en laboratorios académicos.

B. Cobertura del campus: cinco zonas evaluadas

El campus principal se estructura en cinco zonas funcionales. En el ciclo académico 2024-2025, tres trabajos de grado aplicaron simultáneamente el ISIU Colombia 2.0 con cobertura total del campus:

TABLA II. DISTRIBUCIÓN DE LAS EVALUACIONES ISIU COLOMBIA 2.0 POR ZONA DEL CAMPUS.

Zona	**Nombre**	**N° Edif.**	**Investigadores**	**Año**
A, C, E	Guayacán, Cámbulos, Platanillas	26	Vargas-Uriza P., Bravo-Rosero J.D.	2025
B	Guaduales	14	Rojas-Hernández J.F., Rincón-Herrera S.	2025
D, F	Guamos, Gualanday	12	Bedoya-Gallego J., Moya-Benavides K.	2025

En la figura 3, a continuación, se ve en detalle la ubicación de las zonas en el campus de la universidad el Quindío.

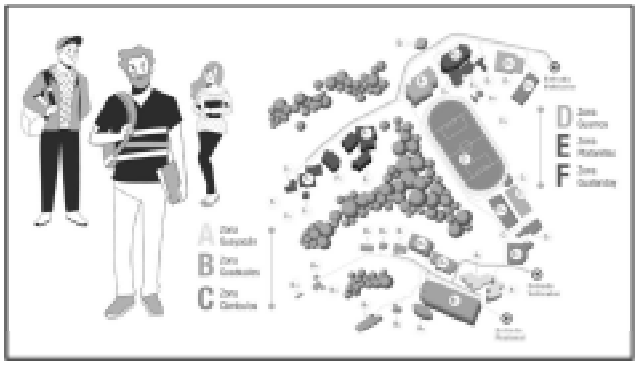


Fig. 3. Zonificación de las instalaciones de la Universidad del Quindío.

C. Herramienta pedagógica complementaria: Matriz de Riesgo Multi-Amenaza

Como complemento al ISIU Colombia 2.0, se desarrolló una herramienta pedagógica interactiva en HTML5 denominada "Herramienta de Análisis Indicativo de Riesgo – Matriz de Riesgo Multi-Amenaza", implementada en el marco de la Maestría en Gestión del Riesgo de Desastres. Esta aplicación implementa la ecuación de riesgo $R = f(A \cap E \cap V)$, donde A es amenaza, E es exposición y V es vulnerabilidad, utilizando una matriz de 5×5 (probabilidad × impacto) configurable para 17 tipos de amenazas según la taxonomía del Marco de Sendai.

La herramienta permite a los estudiantes ingresar los resultados del ISIU como indicador de vulnerabilidad física, cruzarlos con niveles de amenaza calibrados para el Quindío y obtener una estimación cualitativa del riesgo por edificación. Incluye módulos de: (i) teoría de conjuntos aplicada al riesgo, (ii) análisis de emplazamiento por componentes, (iii) mapa de calor de riesgo por amenaza, y (iv) exportación de reportes en PDF. Este instrumento fortalece el aprendizaje activo y la capacidad de análisis crítico de los estudiantes de ingeniería.

V. RESULTADOS

A. Emplazamiento de sitio (F2)

Los resultados de la evaluación de emplazamiento revelan que la totalidad de las edificaciones del campus presenta un nivel de exposición territorial entre Bajo y Medio, con valores ponderable entre 63,5% y 74,5%. Ninguna edificación alcanzó nivel Alto de emplazamiento de riesgo, lo cual refleja condiciones territoriales relativamente favorables para el campus. Las instalaciones con menor puntuación en emplazamiento corresponden a CEPAS (63,5%) y el área de Lombricultivo y Compostaje (66,5%), por su mayor proximidad a fuentes de agua superficial y por deficiencias en infraestructura de movilidad peatonal. Los componentes: bioclimático y de movilidad/parqueaderos presentan las calificaciones más bajas dentro del formulario F2 en todas las zonas evaluadas.

B. Seguridad estructural (F-3.1)

El componente de seguridad estructural muestra el mejor desempeño general en todas las zonas evaluadas. En la Zona B, el 64,3% de las edificaciones alcanzó nivel Alto (SE ≥ 66%), con valores que oscilan entre 40,6% (Instituto Interdisciplinario de las Ciencias) y 92,9% (Zona de Parqueo). En las Zonas A, C y E, el 73,1% de las 26 edificaciones evaluadas clasificó en nivel Alto, con un promedio de 73,2%. El buen desempeño estructural generalizado se atribuye principalmente a dos factores: la reconstrucción y reforzamiento masivo del campus entre 2000 y 2006 bajo los parámetros de la NSR-98, y las nuevas construcciones adelantadas desde 2010 bajo NSR-10.

Las edificaciones con menor desempeño estructural corresponden a instalaciones de carácter auxiliar construidas antes del sismo de 1999, que no fueron incluidas en los programas de reforzamiento institucional: Instituto Interdisciplinario de las Ciencias (*SE* = 40,6%), Laboratorio de Bioterio (*SE* = 50,0%) y Facultad de Ciencias Básicas y Tecnológicas (*SE* = 55,6%).

C. Seguridad no estructural y funcional (F-3.2 y F-3.3)

La seguridad no estructural muestra un desempeño mayoritariamente Alto, con promedios superiores al 70% en todas las zonas, aunque con dispersión considerable. Las calificaciones más bajas se presentan en el Lombricultivo y Compostaje (*SNE* = 37,0%) y el Laboratorio de Bioterio (*SNE* = 41,5%), donde la condición de los elementos arquitectónicos no estructurales y las instalaciones técnicas (eléctricas, gas, redes contra incendio) presentan deterioro significativo.

En contraste, la seguridad funcional representa el componente más crítico en todas las zonas evaluadas. En la Zona B, el 100% de las edificaciones evaluadas clasificó en nivel Medio (*SF* entre 37,1% y 62,8%), con un promedio de 51,9%. En las Zonas A, C y E, la totalidad de las 26 edificaciones también clasificó en nivel Medio (promedio *SF* = 54,6%). Las deficiencias más frecuentes corresponden a: ausencia o desactualización de planes de emergencia y contingencia, señalización insuficiente de rutas de evacuación, carencia de comités de emergencia activos y operativos, e incumplimiento de estándares de accesibilidad universal para personas con movilidad reducida.

D. ISIU Colombia 2.0: síntesis comparativa de metodologías

La Tabla IV-I presenta los resultados consolidados para las 14 edificaciones de la Zona B (Guaduales), comparando las tres metodologías: ISIU 1.0 (ponderación original sin emplazamiento), ISIU 2.0 sin gE (nueva ponderación con emplazamiento) e ISIU 2.0 × gE (con factor de exposición).

TABLA III. EVALUACIONES COMPARADIVAS DEL ISIU POR ZONA DEL CAMPUS.

Edificación	**ISIU 1.0 (%)**	**ISIU 2.0 (%)**	**gE**	**ISIU 2.0×gE (%)**
Aud. Bernardo Ramírez	73,9	72,4	0,80	57,9
Aud. Jardín Botánico	73,8	71,8	0,88	63,3
Centro de Acopio	67,6	67,3	0,82	55,2

Edificación	ISIU 1.0 (%)	ISIU 2.0 (%)	gE	ISIU 2.0×gE (%)
Ctro. Entren. Alturas	79,3	76,9	0,88	67,7
CEPAS	79,4	75,3	0,88	66,3
Edif. Aulas 50 Años	83,4	80,1	0,74	59,6
Fac. Ciencias Básicas	65,7	65,2	0,70	45,7
Inst. Interdisc. Ciencias	52,8	55,3	0,79	43,5
Invernadero	63,6	64,1	1,00	64,1
Lab. Bioterio	47,2	51,8	1,00	51,8
Lab. Suelos	74,8	72,8	0,88	64,2
Lombricultivo	61,0	62,1	1,00	62,1
Portería N1 (Principal)	84,2	80,2	0,82	65,9
Zona de Parqueo	83,9	80,2	0,74	59,2

El análisis comparativo entre el ISIU 1.0 y el ISIU 2.0 (sin *gE*) revela diferencias menores al 5% en la mayoría de las edificaciones, lo que valida la consistencia metodológica de la actualización. Sin embargo, la incorporación del gE introduce diferencias significativas: edificaciones como la Facultad de Ciencias Básicas y Tecnológicas (gE = 0,70) ven su índice reducido de 65,2% a 45,7%, pasando de nivel Medio-Alto a nivel Medio-Bajo. Esta reducción refleja el hecho de que esta edificación concentra la mayor densidad de usuarios del campus (> 5.000 usuarios/día) y alberga laboratorios de alta criticidad.

Para las Zonas A, C y E (26 edificaciones), el ISIU 2.0 sin *gE* arrojó un promedio de 68,8% con 10 edificaciones en nivel Alto y 16 en nivel Medio. Al aplicar el factor *gE*, el promedio desciende a 58,9%, con solo 1 edificación en nivel Alto, 24 en nivel Medio y 1 en nivel Bajo. Este resultado evidencia que la exposición diferencial de las edificaciones transforma radicalmente el panorama de priorización.

E. Cartografía del riesgo mediante SIG

Los datos capturados en Survey123 fueron exportados directamente a ArcGIS Pro, donde se integraron con los polígonos de las edificaciones del campus. Se generaron seis capas temáticas superpuestas: (1) Emplazamiento de Riesgo F2, (2) Seguridad Estructural F3.1, (3) Seguridad No Estructural F3.2, (4) Seguridad Funcional F3.3, (5) ISIU 2.0 Ponderación Nueva, y (6) ISIU 2.0 × *gE*. Cada capa utiliza una simbología semafórica (verde = Alto, amarillo = Medio, rojo = Bajo) coherente con la escala del índice.

El visor web desarrollado en ArcGIS Online (ISIU 2.0 – 2025) permite acceder a los informes individuales de cada edificación, incluyendo las cinco hojas de evaluación en PDF, los valores numéricos por componente y la clasificación final en las tres metodologías. Este recurso constituye el núcleo del Sistema de Información para la Gestión del Riesgo del Campus (SIGRC-Uniquindío) y fue presentado ante la Oficina de Gestión del Riesgo Institucional para su incorporación al Plan de Gestión del Riesgo Institucional.

VI. CONCLUSIONES

El ISIU Colombia 2.0 representa una evolución metodológica sustancial respecto a su versión original. La incorporación de la evaluación de emplazamiento como componente activo del índice (20% de ponderación) permite capturar el riesgo del entorno territorial donde se ubica cada edificación, superando una limitación fundamental de la metodología original que evaluaba el emplazamiento, pero no lo incorporaba al cálculo.

La digitalización de formularios en Survey123 Connect transformó la experiencia pedagógica de los estudiantes. La captura georreferenciada de datos, la integración automática con ArcGIS Pro y la generación de cartografía temática permitieron que los trabajos de grado trascendieran el diagnóstico estático para convertirse en insumos dinámicos para la gestión institucional del riesgo. Esta innovación tiene potencial de replicación en otras IES colombianas.

El factor de grado de exposición (*gE*) introduce una dimensión crítica ausente en los índices de seguridad tradicionales: la jerarquización de la inversión en seguridad según el impacto potencial de una falla. Los resultados demuestran que edificaciones como la Facultad de Ciencias Básicas y Tecnológicas, que parecen alcanzar un nivel aceptable de seguridad con el ISIU 1.0 (65,7%), revelan una prioridad de intervención significativamente mayor cuando se incorpora su alta exposición (ISIU 2.0 × gE = 45,7%).

El componente de seguridad funcional emerge como el déficit transversal más crítico en el campus de la Universidad del Quindío: la totalidad de las edificaciones evaluadas en todas las zonas clasificó en nivel Medio para este componente, con promedios inferiores al 60%. Esto indica que el campus posee una infraestructura físicamente adecuada, pero con capacidades organizacionales y de respuesta institucional insuficientes. Las intervenciones prioritarias deben dirigirse a la actualización de planes de emergencia, la capacitación de brigadas, la señalización de rutas de evacuación y la implementación de protocolos de accesibilidad universal.

Finalmente, el estudio multicaso desarrollado simultáneamente en cinco zonas del campus demuestra la escalabilidad y robustez metodológica del ISIU Colombia 2.0. La cobertura del 100% del campus en un único ciclo evaluativo, con equipos de seis estudiantes de pregrado y un director de investigación, valida la viabilidad de implementar este modelo en otras universidades colombianas como herramienta de formación en ingeniería con impacto real en la reducción del riesgo institucional.

REFERENCIAS

[1] UNDRR, "Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030," Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, Ginebra, Suiza, 2015.

[2] República de Colombia, "Ley 1523 de 2012: Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres," Diario Oficial No. 48.411, 24 abr. 2012.

[3] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), "Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10," Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá, Colombia, 2010.

[4] REDULAC/RRD y USAID/OFDA, "Guía del Evaluador: Índice de Seguridad en Instalaciones Universitarias (ISIU)," Guatemala, sep. 2017.

[5] C. A. García-Ocampo y L. C. Martínez-Medina, Índice de Seguridad en Instalaciones Universitarias (ISIU): Guía del Evaluador – Adaptación Colombia. Armenia, Colombia: Editorial ELIZCOM SAS, 2019.

[6] D. F. Velásquez Villa, F. Aguirre Cuartas y L. F. García Acevedo, "Evaluación del índice de seguridad, vulnerabilidad y riesgo sísmico en las edificaciones de la Universidad del Quindío Zona 1," Trabajo de grado, Universidad del Quindío, Armenia, 2019.

[7] L. F. Barrera Marín, L. F. Torres Forero y V. Tenorio Martínez, "Evaluación del índice de seguridad, vulnerabilidad y riesgo sísmico en las edificaciones de la Universidad del Quindío Zona 2," Trabajo de grado, Universidad del Quindío, Armenia, 2019.

[8] Organización Panamericana de la Salud (OPS), Índice de seguridad hospitalaria: Guía para la evaluación de establecimientos de salud de mediana y baja complejidad. Washington, D.C.: OPS, 2010.

[9] P. A. Vargas Uriza, J. D. Bravo Rosero y C. A. García-Ocampo, "Evaluación y actualización del Índice de Seguridad en Instalaciones Universitarias (ISIU) en la Universidad del Quindío: Estudio de caso Zonas A, C y E," Trabajo de grado, Universidad del Quindío, Armenia, 2025.

[10] J. F. Rojas Hernández, S. Rincón Herrera y C. A. García-Ocampo, "Evaluación y actualización del Índice de Seguridad en Instalaciones Universitarias (ISIU) en la Universidad del Quindío: Estudio de caso Zona B (Guaduales)," Trabajo de grado, Universidad del Quindío, Armenia, 2025.

[11] J. A. Bedoya Gallego, K. A. Moya Benavides y C. A. García-Ocampo, "Evaluación y actualización del Índice de Seguridad en Infraestructura Universitaria (ISIU) en la Universidad del Quindío: Estudio de caso Zonas F y D (Gualanday y Guamos)," Trabajo de grado, Universidad del Quindío, Armenia, 2025.

[12] Servicio Geológico Colombiano (SGC), "Sismo del 25 de enero de 1999," Sismicidad Histórica Colombiana. [En línea]. Disponible: https://sish.sgc.gov.co. [Accedido: 10 may. 2026].

[13] Comisión Permanente de Contingencias (COPECO) y PNUD, Manual para la Evaluación de Riesgo del Emplazamiento y del Medio Construido. Tegucigalpa, Honduras: COPECO, 2013.

[14] UNGRD, Atlas de Riesgo de Colombia: Revelando los Desastres Latentes. Bogotá: UNGRD, 2019.

[15] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), "Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia," AIS, Bogotá, 2009.

Sistema modular de admisión tipo ITB con control electrónico basado en ESP32 para conversión de motores carburados a inyección electrónica (*Modular ITB-type intake system with electronic control based on ESP32 for converting carbureted engines to electronic injection*)

Santiago Manrique
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas (SIV-2R)
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
santiago.manrique762@pascualbravo.edu.co

David Castillo
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas (SIV-2R)
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
david.castillo741@pascualbravo.edu.co

Victor Mejia
Grupo de Investigación e Innovación Ambiental (GIIAM)
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
victor.mejia866@pascualbravo.edu.co

Fredy Jaramillo
Grupo de Investigación e Innovación Ambiental (GIIAM)
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
fredy.jaramillo@pascualbravo.edu.co

***Abstract*— This paper presents the design and development of a modular individual throttle body (ITB) intake system integrated with a low-cost electronic control unit based on ESP32, aimed at converting carbureted internal combustion engines to electronic fuel injection systems. The proposed solution addresses the limitations of conventional carburetors in terms of fuel efficiency, emissions, and adaptability, particularly in older vehicles that remain in circulation. The system is based on a modular architecture consisting of four throttle bodies with variable diameters, allowing adaptation to engines ranging from 1.0L to 2.6L. The intake system is manufactured using additive manufacturing techniques, enabling rapid prototyping and customizable production. The mechanical actuation is achieved through a shared shaft driven by a high-torque servo motor, ensuring synchronized throttle operation. Additionally, a programmable electronic control unit based on ESP32 is developed to manage key engine parameters, including intake pressure, crankshaft position, and throttle position, allowing control of fuel injection and ignition systems. The electronic design is validated through simulation prior to physical implementation. Preliminary results demonstrate the feasibility of the proposed system in terms of mechanical integration, manufacturability, and electronic control. Although full engine testing is still in progress, the system establishes a solid foundation for future validation under real operating conditions. The proposed approach offers a cost-effective and scalable alternative for modernizing carbureted engines, contributing to reduced emissions and improved efficiency, while also enabling new opportunities for innovation in automotive engineering through the integration of additive manufacturing and open-source electronic control systems.**

***Keywords*— ITB, intake system, additive manufacturing, ESP32, electronic fuel injection, modular design, engine conversion.**

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas de admisión y control en motores de combustión interna ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, impulsado por la necesidad de mejorar la eficiencia energética, optimizar la combustión y reducir las emisiones contaminantes. En este proceso, la transición de sistemas de carburación a inyección electrónica ha representado uno de los avances más relevantes, permitiendo una dosificación más precisa del combustible, mejor respuesta del motor y una mayor capacidad de adaptación a distintas condiciones de operación. A pesar de estos avances, una proporción considerable del parque automotor, especialmente en países en desarrollo como Colombia, aún está conformada por vehículos fabricados antes de la implementación obligatoria de sistemas de inyección electrónica. Se estima que cerca del 30% de los vehículos en circulación corresponden a este segmento, lo que implica la presencia de motores carburados que presentan limitaciones en términos de eficiencia volumétrica, control de mezcla aire–combustible y desempeño general. Estas limitaciones no solo afectan el rendimiento del motor, sino que también inciden directamente en el aumento de emisiones contaminantes y en la dificultad para cumplir con los estándares exigidos en las revisiones técnico-mecánicas vigentes. En este contexto, la modernización de motores carburados hacia sistemas de inyección electrónica se presenta como una alternativa viable para extender la vida útil de estos vehículos y mejorar su comportamiento ambiental y funcional. Sin embargo,

las soluciones actualmente disponibles en el mercado suelen implicar altos costos de implementación, baja flexibilidad de adaptación a diferentes configuraciones de motor y, en muchos casos, dependencia de sistemas propietarios con limitada capacidad de modificación. Estas barreras restringen el acceso a este tipo de tecnologías, especialmente en contextos donde se requiere una solución económica y adaptable. Por otra parte, los sistemas de admisión tipo cuerpos de aceleración individuales (ITB) han demostrado ventajas importantes en aplicaciones de alto desempeño, al permitir una alimentación de aire más directa y equilibrada hacia cada cilindro, reduciendo restricciones y mejorando la respuesta del acelerador. No obstante, su adopción en aplicaciones de conversión y uso cotidiano ha sido limitada, principalmente debido a su complejidad de integración y costos asociados. En paralelo, la manufactura aditiva ha emergido como una herramienta clave en el desarrollo de componentes personalizados, permitiendo la fabricación de geometrías complejas, reducción de tiempos de desarrollo y disminución de costos en procesos de prototipado y producción a pequeña escala. El uso de materiales avanzados, como polímeros reforzados con fibra de carbono, amplía además su aplicabilidad en entornos donde se requieren propiedades mecánicas y térmicas adecuadas para aplicaciones automotrices. De igual forma, el avance en plataformas electrónicas de bajo costo y alto desempeño, como el microcontrolador ESP32, ha permitido el desarrollo de sistemas de control programables capaces de gestionar múltiples variables en tiempo real. Estas plataformas facilitan la implementación de unidades de control electrónico (ECU) personalizadas, ofreciendo flexibilidad, escalabilidad y accesibilidad frente a soluciones comerciales tradicionales. A pesar de la disponibilidad de estas tecnologías de forma individual, actualmente no existe una solución integrada que combine un sistema de admisión modular tipo ITB, manufactura aditiva y una arquitectura de control electrónico programable dentro de una misma plataforma orientada a la conversión de motores de combustión interna. En este contexto, el presente trabajo propone el desarrollo de una plataforma modular de admisión tipo ITB integrada con una ECU basada en ESP32, fabricada mediante manufactura aditiva, orientada a la conversión de motores de cuatro cilindros a sistemas de inyección electrónica. La propuesta busca ofrecer una solución adaptable, de bajo costo y escalable, que permita modernizar motores existentes, mejorar su desempeño y facilitar su transición hacia sistemas de control más eficientes y acordes con las exigencias actuales. La Tabla I presenta una taxonomía sobre trabajos de investigación relevantes.

TABLA II. TAXONOMÍA ARTÍCULOS ITB - ECU

Año	Autor	Nombre del artículo / referencia	Técnica / Enfoque	Aporte relevante
1970 – 1980	[4]	Sistemas de admisión independientes en motores NA	Múltiples carburadores / admisión individual	Base conceptual de sistemas ITB para maximizar flujo en motores sin sobrealimentación
2000	[1]	Internal Combustion Engine Fundamentals	Modelado de motores	Fundamentación de eficiencia volumétrica y dinámica de admisión
2010	[2]	Introduction to Internal Combustion Engines	Análisis de admisión	Relación entre geometría del múltiple y desempeño del motor
2015	[9]	Sistemas ITB comerciales	Diseño de cuerpos individuales	Implementación de ITBs en aplicaciones de alto desempeño (alto costo, baja accesibilidad)
2018	[5]	Aplicación de impresión 3D en componentes	Prototipado rápido	Reducción de costos y tiempos en desarrollo de piezas complejas
2020	[8]	ECUs programables	Control electrónico abierto	Alternativa de bajo costo a ECUs comerciales
2021	[5], [6]	Uso de Nylon CF en piezas funcionales	Materiales compuestos	Alta resistencia térmica y mecánica para aplicaciones automotrices
2023	[3]	Optimización de flujo de aire	CFD y diseño geométrico	Mejora de eficiencia volumétrica mediante diseño de conductos
2024	[6]	Fabricación personalizada	Impresión 3D avanzada	Producción adaptable a múltiples configuraciones
2025	[7]	Microcontroladores de alto rendimiento (ESP32)	Control en tiempo real	Base para desarrollo de ECUs programables modernas

II. METODOLOGÍA

La metodología adoptada en este trabajo se basa en un enfoque de desarrollo aplicado, orientado al diseño, fabricación e integración de un sistema modular de admisión tipo ITB junto con una unidad de control electrónico programable. El proceso abarca desde la definición conceptual hasta la validación funcional del sistema, integrando herramientas de diseño, manufactura aditiva y desarrollo electrónico. La Fig. *1* presenta el flujo general del sistema propuesto, ilustrando de manera simplificada la interacción entre el sistema de admisión, el accionamiento mecánico y la unidad de control electrónico, así como su relación con el funcionamiento del motor.



Fig. 1. Arquitectura general del sistema propuesto.

Esta representación permite comprender de manera global la lógica de funcionamiento del sistema antes de abordar niveles más detallados de diseño e integración.

A. Diseño conceptual del sistema

A partir del enfoque general, se definió una arquitectura modular en la cual el sistema se divide en dos elementos principales: un conjunto de cuerpos de aceleración universales y un múltiple de admisión específico para cada motor.

Se establecieron como variables principales de diseño el diámetro de los cuerpos de aceleración (30 mm, 35 mm, 40 mm y 44 mm), en función de la cilindrada del motor, así como la configuración geométrica necesaria para garantizar un flujo de aire adecuado hacia cada cilindro.

B. Arquitectura del Sistema

Con base en el diseño conceptual, se desarrolló la arquitectura detallada del sistema, la cual se presenta en la Fig. 2. En esta se describen los subsistemas principales y sus interconexiones, incluyendo el sistema de admisión, el sistema de accionamiento mecánico y la unidad de control electrónico basada en ESP32.



Fig. 2. Sistema modular de admisión tipo ITB con control electrónico programable.

El sistema está conformado por:

- *Sistema de admisión modular tipo ITB*, encargado del suministro de aire a cada cilindro.
- *Sistema de accionamiento mecánico*, basado en un eje común accionado por un servomotor de alto torque.
- *Sistema de control electrónico (ECU)*, responsable de la adquisición de señales y control de actuadores.

Esta representación permite entender con mayor profundidad la integración entre componentes mecánicos y electrónicos.

C. Diseño CAD y modelado paramétrico

El sistema fue desarrollado mediante herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), permitiendo la creación de modelos paramétricos ajustables. Esta estrategia facilita la adaptación del sistema a diferentes configuraciones de motor mediante la modificación de dimensiones clave.

D. Desarrollo del sistema mecánico

El sistema mecánico se basa en un eje longitudinal compartido que sincroniza el movimiento de las cuatro mariposas, accionado mediante un servomotor de alto torque. Este enfoque permite simplificar el control del sistema y garantizar una respuesta uniforme.

E. Desarrollo del sistema electrónico (ECU)

El sistema de control se implementó mediante una ECU basada en el microcontrolador ESP32, encargada de gestionar variables críticas del motor mediante sensores como MAP, CKP y TPS, así como el control de inyección y encendido.

El diseño fue previamente validado mediante simulación electrónica, asegurando la integridad del sistema antes de su implementación física.

F. Manufactura aditiva y prototipado

La fabricación del sistema se realizó mediante manufactura aditiva, permitiendo la creación de prototipos funcionales para validación geométrica y de ensamblaje. Inicialmente se utilizaron materiales como PLA y PETG, con proyección de fabricación final en Nylon 12 reforzado con fibra de carbono.

G. Integración y secuencia metodológica

La integración del sistema se llevó a cabo siguiendo una secuencia estructurada de desarrollo, la cual se presenta en la Fig. 3. Esta figura describe de manera detallada las etapas del proceso, integrando diseño, fabricación, programación e implementación.



Fig. 3. Secuencia de implementación metodológica.

La secuencia incluye:

- Definición de requerimientos.
- Diseño conceptual.
- Modelado CAD.
- Fabricación mediante impresión 3D.
- Ensamble mecánico.
- Desarrollo electrónico.
- Programación del microcontrolador.
- Integración del sistema.
- Validación funcional.

Esta organización permite estructurar el desarrollo del proyecto de manera progresiva y controlada.

H. Validación del sistema

La validación se centró en la verificación funcional de los prototipos desarrollados, evaluando el ensamblaje, el comportamiento mecánico y la respuesta del sistema electrónico.

Dado que el proyecto se encuentra en fase de desarrollo, no se han realizado pruebas en banco o vehículo, pero se ha validado la viabilidad del sistema desde el punto de vista de integración.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fabricación mediante impresión 3D permitió iterar rápidamente sobre el diseño, realizando ajustes en función de los resultados obtenidos en cada versión.

A. Desarrollo y fabricación de prototipos

Como resultado del proceso de diseño CAD y manufactura aditiva, se obtuvieron prototipos funcionales de los cuerpos de aceleración individuales (ITB), fabricados inicialmente en materiales como PLA y PETG, como se muestra en la Fig. 4. Estos prototipos permitieron validar aspectos clave como la geometría del sistema, el ajuste entre componentes y la viabilidad del ensamblaje.

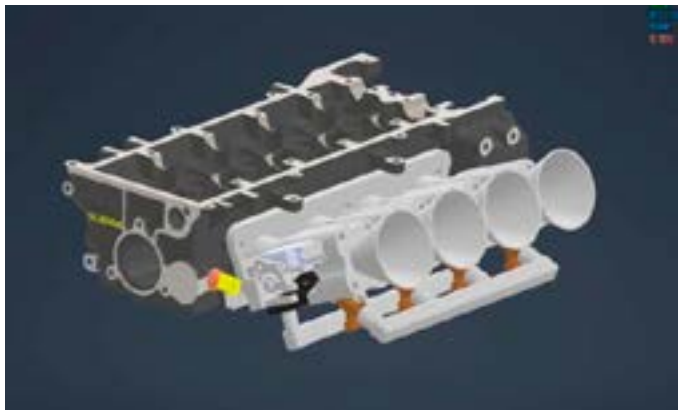


Fig. 4. Diseño CAD de prototipos funcionales de los cuerpos de aceleración individuales (ITB).

B. Validación del sistema mecánico

El sistema de accionamiento mecánico fue evaluado mediante la implementación de un eje común acoplado a un servomotor de alto torque como se muestra en la Fig. 5, permitiendo el control sincronizado de las mariposas.

Las pruebas realizadas permitieron verificar:

- Movimiento coordinado de los cuerpos de aceleración.
- Respuesta uniforme del sistema.
- Integración adecuada del mecanismo.

Estos resultados confirman la viabilidad del uso de un único actuador para el control del sistema.

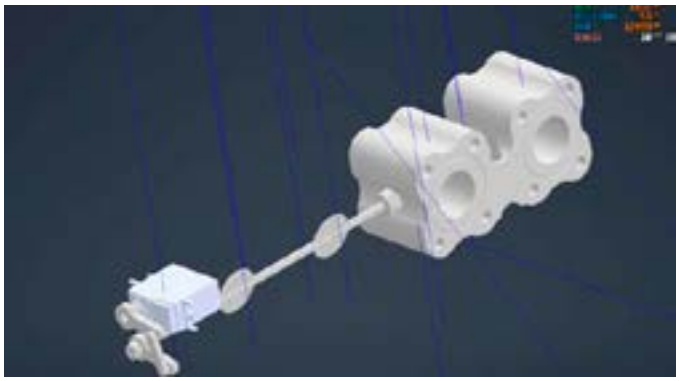


Fig. 5. Sistema de accionamiento mecánico.

C. *Desarrollo y validación del sistema electrónico*

En el ámbito electrónico, se desarrolló y validó el diseño de la ECU basada en ESP32 mediante simulación en entorno virtual, verificando la correcta lectura de sensores y la lógica de control del sistema (ver Fig. 6). La validación en esta etapa permitió reducir errores antes de la implementación física.

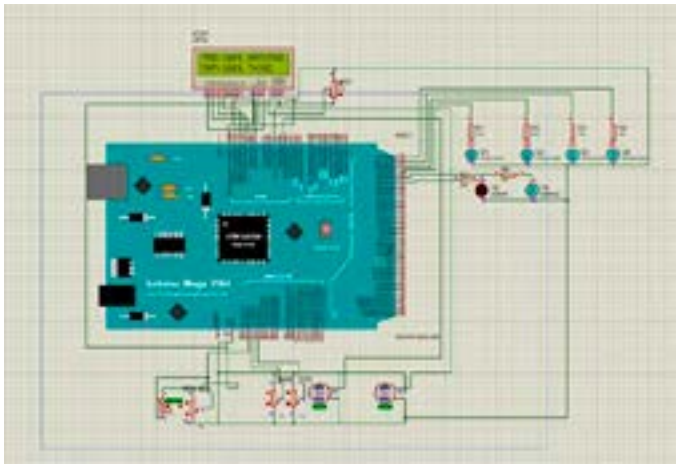


Fig. 6. Diseño de la ECU basada en ESP32.

D. *Integración del sistema*

La integración de los subsistemas mecánico y electrónico permitió establecer una arquitectura funcional coherente, logrando compatibilidad entre los diferentes componentes del sistema.

Aunque la implementación completa en un motor real se encuentra en desarrollo, los resultados evidencian la viabilidad del sistema como una solución unificada.

E. *Limitaciones actuales*

A pesar de los avances logrados, el sistema presenta limitaciones propias de su etapa de desarrollo:

- Ausencia de pruebas en banco o vehículo real.
- Falta de validación experimental de desempeño.
- Evaluación térmica pendiente en condiciones reales.

Estas limitaciones representan oportunidades para el desarrollo futuro del proyecto.

Los resultados obtenidos permiten analizar el sistema desde diferentes perspectivas. En primer lugar, la implementación de un sistema ITB modular demuestra ser una alternativa viable para la mejora del flujo de aire en motores de combustión interna. Por otro lado, el uso de manufactura aditiva se consolida como una herramienta clave en el desarrollo del sistema, permitiendo la fabricación rápida y personalizada de componentes. En cuanto al sistema de control, la ECU basada en ESP32 representa una solución flexible y de bajo costo, capaz de gestionar múltiples variables del motor bajo una arquitectura programable. La integración de estos elementos constituye el principal aporte del trabajo, al proponer una plataforma unificada orientada a la conversión de motores a inyección electrónica.

IV. CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió el desarrollo de una plataforma modular de admisión tipo cuerpos de aceleración individuales (ITB), integrada con un sistema de control electrónico basado en ESP32 y fabricada mediante manufactura aditiva, orientada a la conversión de motores de combustión interna a sistemas de inyección electrónica. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del enfoque propuesto desde el punto de vista de diseño, manufactura e integración de subsistemas.

Uno de los principales aportes del proyecto radica en la concepción de una arquitectura modular y adaptable, en la cual los cuerpos de aceleración se mantienen como un sistema universal, mientras que la adaptación a diferentes motores se realiza mediante múltiples de admisión específicos. Este enfoque permite una alta flexibilidad de implementación en motores de cuatro cilindros dentro del rango de 1.0L a 2.6L, facilitando su aplicación en una amplia variedad de configuraciones.

Asimismo, el uso de manufactura aditiva se consolida como una herramienta fundamental en el desarrollo del sistema, permitiendo la fabricación rápida de prototipos, la iteración del diseño y la posibilidad de producción personalizada de componentes finales. Este aspecto representa una ventaja significativa frente a métodos tradicionales, especialmente en contextos donde se requiere reducir costos y tiempos de desarrollo.

En el ámbito electrónico, la implementación de una ECU basada en ESP32 establece una alternativa viable frente a sistemas comerciales tradicionales, al ofrecer una solución programable, escalable y de bajo costo. La capacidad de integrar sensores y controlar actuadores del motor bajo una arquitectura abierta permite sentar las bases para el desarrollo de sistemas de control personalizados y adaptables a diferentes aplicaciones.

Desde el punto de vista ambiental, el proyecto adquiere una relevancia significativa al proponer una solución orientada a la modernización de motores carburados, los cuales presentan mayores niveles de emisiones contaminantes y menor eficiencia

en la combustión. La conversión a sistemas de inyección electrónica permite mejorar el control de la mezcla aire–combustible, reduciendo emisiones y contribuyendo al cumplimiento de normativas ambientales vigentes. En este sentido, la propuesta no solo aborda una problemática técnica, sino que también se alinea con la necesidad de implementar soluciones sostenibles en el sector automotriz.

Adicionalmente, el proyecto presenta un alto potencial de impacto en contextos como el colombiano, donde una proporción significativa del parque automotor corresponde a vehículos anteriores a la implementación obligatoria de sistemas de inyección electrónica. La posibilidad de ofrecer una solución accesible y adaptable abre oportunidades tanto en el ámbito académico como en el desarrollo de productos con potencial comercial.

Finalmente, aunque el sistema se encuentra en fase de desarrollo, los resultados obtenidos permiten establecer una base sólida para futuras investigaciones, en las cuales se podrán realizar pruebas experimentales en banco y vehículo real, evaluar el desempeño del sistema en términos de potencia, consumo y emisiones, y optimizar tanto el diseño mecánico como la estrategia de control electrónico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la financiación por parte de la Institución Universitaria Pascual Bravo al proyecto código PCT200 "Diseño, fabricación y validación de un sistema ITB modular en polímeros de alta resistencia con ECU programable libre y electrónica de control integrada para motores de 1.0 a 2.6 litros".

REFERENCIAS

[1] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2018.

[2] R. Stone, Introduction to Internal Combustion Engines, 4th ed. London: Palgrave Macmillan, 2012.

[3] M. Ceviz and F. Akın, “Effects of intake manifold geometry on engine performance,” Applied Thermal Engineering, vol. 30, no. 4, pp. 365–371, 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.013

[4] H. Zhao, “Intake air motion and its effect on combustion in SI engines,” SAE Technical Paper, 2007.

[5] A. Domingo-Espin et al., “Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polyamide parts,” Materials & Design, vol. 83, pp. 670–677, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074

[6] M. Tymrak, M. Kreiger, and J. M. Pearce, “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers under realistic environmental conditions,” Materials & Design, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.038

[7] Espressif Systems, “ESP32 Technical Reference Manual,” 2022. [Online]. Available: https://www.espressif.com

[8] Speeduino, “Open source engine management system,” [Online]. Available: https://speeduino.com

[9] Jenvey Dynamics, “Throttle body systems and performance advantages,” [Online]. Available: https://www.jenvey.co.uk

Ecozone : zona de descanso autosostenible

Laura Sofía Gónzalez Guauta
Cundinamarca
Universidad Piloto de Colombia
SAM
Giradot ,Colombia
laura-gonzalez18@upc.edu.co

Natalia Sofia Hinestroza Guzman
Cundinamarca
Universidad Piloto de Colombia
SAM
Giradot ,Colombia
natalia-hinestroza1@upc.edu.co

Mauricio Andrés Rivear Soto
Cundinamarca
Universidad Piloto de Colombia
SAM
Giradot,Colombia
mauricio-rivera@unipiloto.edu.co

***Resumen*— La seguridad vial constituye actualmente una de las principales problemáticas asociadas a la movilidad terrestre, debido al elevado número de accidentes de tránsito registrados tanto a nivel nacional como internacional. En Colombia, esta situación continúa generando impactos significativos sobre la salud pública, especialmente en corredores viales donde confluyen factores humanos, ambientales y deficiencias relacionadas con la infraestructura.**

En regiones cálidas como el Alto Magdalena, las condiciones climáticas influyen directamente en el estado físico y mental de los conductores. Las altas temperaturas, la exposición prolongada al sol y los recorridos extensos favorecen la aparición de fatiga, deshidratación y pérdida de concentración, incrementando la probabilidad de accidentes asociados al cansancio durante la conducción.

El corredor vial Girardot–Tocaima presenta un flujo vehicular constante debido al tránsito turístico y al transporte intermunicipal que circula diariamente por este sector. Sin embargo, actualmente se evidencia una limitada disponibilidad de espacios destinados al descanso seguro de los usuarios, situación que obliga a muchos conductores a continuar sus trayectos sin realizar pausas adecuadas o a detenerse en lugares que no cuentan con condiciones apropiadas de seguridad y funcionalidad.

Como respuesta a esta problemática, el presente proyecto propone el diseño de una zona de descanso autosostenible orientada a contribuir al mejoramiento de la seguridad vial mediante la reducción de riesgos asociados a la fatiga del conductor. La propuesta contempla la implementación de espacios funcionales para el descanso, acceso a agua potable, conectividad, estaciones de carga y mecanismos básicos de atención ante emergencias.

Asimismo, el proyecto incorpora criterios de sostenibilidad mediante el aprovechamiento de energías renovables y sistemas de captación de aguas lluvias, buscando disminuir el impacto ambiental y garantizar el funcionamiento eficiente de la infraestructura. De esta manera, la propuesta se plantea como una alternativa innovadora y adaptable que pueda ser replicada en otros corredores viales del país.

Palabras clave— Seguridad vial, infraestructura sostenible, prevención de accidentes, fatiga vía, áreas de descanso.

I. Introducción

La accidentalidad vial representa una problemática de gran impacto a nivel mundial debido a las consecuencias sociales, económicas y humanas que genera. De acuerdo con organismos internacionales, millones de personas resultan afectadas cada año por siniestros de tránsito, convirtiéndose esta situación en una de las principales causas de mortalidad y lesiones en diferentes grupos poblacionales (Organización Mundial de la Salud, 2023).

En Colombia, los accidentes de tránsito continúan posicionándose como una de las principales problemáticas relacionadas con la movilidad y la seguridad vial. A pesar de la implementación de campañas preventivas y medidas de control, las cifras de accidentalidad siguen siendo elevadas, especialmente en corredores donde intervienen factores como el cansancio del conductor, las condiciones ambientales y las limitaciones de infraestructura (Agencia Nacional de Seguridad Vial , 2025).

Uno de los elementos que más influye en la ocurrencia de estos eventos es la fatiga durante la conducción. Permanecer largos periodos al volante disminuye la capacidad de reacción, afecta la concentración y aumenta la probabilidad de presentar episodios de microsueño. Estas condiciones se intensifican en regiones de clima cálido, donde las altas temperaturas favorecen el agotamiento físico y mental de los usuarios (DANE, 2026)..

La vía Girardot–Tocaima constituye un corredor de alta importancia regional debido al constante tránsito de turistas, vehículos particulares y transporte intermunicipal. Sin embargo, a pesar de su dinámica vehicular, actualmente existe una limitada presencia de espacios diseñados para el descanso y recuperación de los conductores.

Frente a esta situación, el presente proyecto plantea el diseño de una zona de descanso autosostenible que permita brindar condiciones adecuadas para los usuarios de la vía, contribuyendo al fortalecimiento de la seguridad vial y al bienestar de los conductores. La propuesta integra criterios de sostenibilidad mediante el uso de tecnologías limpias y sistemas de aprovechamiento de recursos naturales, promoviendo así un modelo de infraestructura funcional, innovador y ambientalmente responsable.

II. OBJETIVOS

II.I OBJETIVO GENRAL

Diseñar una zona de descanso autosostenible en la vía Girardot–Tocaima orientada a disminuir los riesgos asociados a la fatiga del conductor y contribuir al fortalecimiento de la seguridad vial en este corredor intermunicipal.

II.II OBJETIVOS ESPECIFÍCOS

- Identificar las condiciones viales, ambientales y de movilidad presentes en el corredor Girardot–Tocaima que influyen en la fatiga del conductor y en la ocurrencia de accidentes de tránsito.
- Definir los criterios técnicos, funcionales y sostenibles requeridos para el diseño de una zona de descanso orientada al bienestar y seguridad de los usuarios de la vía.
- Diseñar una propuesta de infraestructura vial autosostenible que integre espacios de descanso, servicios básicos y soluciones energéticas sostenibles.
- Evaluar la viabilidad funcional y el impacto potencial de la propuesta como estrategia para contribuir al mejoramiento de la seguridad vial.

III. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La vía Girardot–Tocaima es uno de los corredores intermunicipales con mayor flujo vehicular en la región del Alto Magdalena, debido al tránsito constante de turistas, vehículos particulares y transporte público que circulan diariamente por este sector. No obstante, las condiciones presentes en este tramo vial han generado escenarios que incrementan el riesgo de accidentalidad, especialmente aquellos relacionados con el agotamiento físico y mental de los conductores (Lopéz Castañeda, 2025).

Dentro de los factores asociados a esta problemática, el cansancio durante la conducción constituye uno de los riesgos más relevantes, particularmente en recorridos prolongados donde los usuarios permanecen largos periodos al volante sin realizar pausas adecuadas. Esta situación reduce la capacidad de reacción, afecta la concentración y aumenta considerablemente la probabilidad de incidentes viales (Organización Mundial de la Salud, 2023).

A ello se suman las condiciones climáticas características de la región, especialmente las altas temperaturas y la exposición constante a la radiación solar, las cuales favorecen la deshidratación y el agotamiento físico. Como consecuencia, muchos conductores presentan disminución en sus capacidades de atención y respuesta durante el recorrido (IDEAM, 2024).

Pese a la importancia de este corredor vial, actualmente existe una limitada disponibilidad de infraestructura destinada al descanso seguro de los usuarios. La ausencia de espacios adecuados obliga a muchos conductores a detenerse en zonas no acondicionadas o continuar sus trayectos en condiciones de fatiga, incrementando el riesgo tanto para ellos como para los demás actores viales (DANE, 2019)..

Asimismo, se identifican deficiencias relacionadas con el acceso a servicios básicos durante el recorrido, tales como zonas de hidratación, conectividad, espacios de recuperación física y mecanismos de atención ante emergencias. Esta situación evidencia la necesidad de implementar alternativas de infraestructura complementaria que contribuyan al bienestar de los usuarios y al fortalecimiento de la seguridad vial.

En consecuencia, surge la necesidad de desarrollar una propuesta de zona de descanso autosostenible que permita ofrecer condiciones adecuadas para la recuperación física y mental de los conductores, incorporando además criterios de sostenibilidad y funcionalidad orientados a mejorar las condiciones de movilidad en la vía Girardot–Tocaima.

IV. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo del presente proyecto surge a partir de la necesidad de fortalecer las condiciones de seguridad vial en el corredor Girardot–Tocaima, donde diversos factores relacionados con el comportamiento humano, las condiciones ambientales y las limitaciones de infraestructura incrementan el riesgo de accidentes de tránsito (Velásquez O, Cabrera A, & Valladares G , 2009).

En Colombia, la accidentalidad vial continúa representando una problemática de alto impacto social y de salud pública, debido al elevado número de víctimas fatales y lesionados registrados anualmente. Diferentes investigaciones han demostrado que la seguridad vial no depende únicamente del comportamiento de los conductores, sino también de las

condiciones del entorno y de la infraestructura disponible en las vías (Muñoz Torres, Lozano Pérez, & Espinel de Segura, 2020).

Entre los factores que más influyen en la ocurrencia de accidentes se encuentra la fatiga durante la conducción. Permanecer largos periodos al volante sin realizar pausas adecuadas disminuye la capacidad de atención, afecta el tiempo de reacción y aumenta la probabilidad de presentar episodios de microsueño. Esta situación se intensifica en regiones cálidas como el Alto Magdalena, donde las altas temperaturas generan agotamiento físico y deshidratación (Torregroza Vargas , 2012).

A pesar de ello, en muchos corredores viales del país aún existe una limitada disponibilidad de espacios diseñados específicamente para el descanso seguro de los usuarios. La ausencia de este tipo de infraestructura evidencia la necesidad de implementar alternativas que permitan disminuir los riesgos asociados al cansancio durante la conducción y mejorar las condiciones de viaje (Salamanca Galvis , 2023)

En respuesta a esta problemática, el proyecto propone el diseño de una zona de descanso autosostenible que integre espacios funcionales para la recuperación física de los conductores, así como servicios básicos de apoyo y soluciones sostenibles mediante el aprovechamiento de energías renovables y sistemas de captación de agua lluvia.

Finalmente, la propuesta guarda relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas, especialmente con el ODS 3 “Salud y Bienestar”, mediante la meta 3.6 orientada a reducir las lesiones y muertes ocasionadas por accidentes de tránsito; el ODS 9 “Industria, Innovación e Infraestructura”, a través de la meta 9.1 enfocada en promover infraestructuras sostenibles y resilientes; y el ODS 11 “Ciudades y Comunidades Sostenibles”, por medio de la meta 11.2 relacionada con el fortalecimiento de sistemas de transporte más seguros y sostenibles.

V. FUNDAMENTOS TEORICOS

A nivel internacional, la creación de áreas de descanso para conductores a lo largo de las vías se ha consolidado como una estrategia clave para mitigar los riesgos derivados de la fatiga y mejorar la seguridad vial. Diversos estudios confirman que contar con infraestructura complementaria en las vías puede llegar a reducir drásticamente los accidentes causados por el agotamiento físico y mental (Transeop, 2025).
En Colombia, el transporte terrestre es el principal eje de conectividad regional, lo que implica un alto flujo de desplazamientos intermunicipales y trayectos de larga duración. Sin embargo, la carencia de espacios adecuados para el descanso, la hidratación o la atención de emergencias en estas rutas incrementa significativamente el riesgo de accidentes derivados de la fatiga y la deshidratación (Nrios, 2025)..

La gravedad de esta situación se refleja en las cifras de la Agencia Nacional de Seguridad Vial, que reportó más de 8.200 muertes por siniestros viales durante el año 2024. La mayoría de estos eventos ocurrieron en vías intermunicipales y corredores rurales, donde el agotamiento del conductor constituye uno de los factores determinantes en los índices de accidentalidad (Nrios, 2025).

En primera instancia, para todo lo mencionado anteriormente se necesita conocer algunos conceptos importantes como lo son la seguridad vial se define como el conjunto de estrategias y medidas orientadas a mitigar los riesgos de siniestralidad en las vías. Según la OMS (2023), los accidentes de tránsito constituyen una de las principales causas de mortalidad global, lo que subraya la urgencia de intervenciones efectivas.

otro de los factores críticos en este ámbito es la fatiga del conductor, un estado fisiológico derivado de trayectos prolongados y condiciones térmicas adversas. Esta condición reduce las capacidades físicas y cognitivas, alterando los niveles de atención y el tiempo de respuesta. La fatiga está directamente vinculada a los microsueños: episodios involuntarios de sueño de apenas fracciones de segundo que, al ocurrir durante la conducción, suelen tener consecuencias fatales (OMS, 2023).

En este contexto, cobra relevancia la infraestructura vial segura. Esta no se limita únicamente al estado de la calzada o la señalización, sino que abarca elementos complementarios como las zonas de descanso. Estos espacios están técnicamente diseñados para que los conductores realicen pausas activas o pasivas, facilitando su recuperación física y mental durante viajes de larga distancia (Acevedo & Mendieta, 2025).

Asimismo, el presente proyecto se alinea con los principios de movilidad sostenible, promoviendo sistemas de transporte seguros y ambientalmente responsables. En este sentido, las zonas de descanso autosostenibles integran soluciones como energía fotovoltaica y sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales. El uso de tecnologías de bajo impacto ambiental no solo reduce la huella de carbono, sino que optimiza los costos operativos y de mantenimiento (Ministerio de Transporte, 2026).

Finalmente, las condiciones ambientales actúan como un factor determinante en la seguridad vial. De acuerdo con Cadena3Rosario (2026), las temperaturas extremas y la radiación solar intensas —propias de los climas cálidos— exacerban el agotamiento y la deshidratación del usuario, incrementando exponencialmente la probabilidad de siniestros viales.

VI. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto se plantea mediante un enfoque descriptivo y aplicado, orientado al análisis de las condiciones actuales del corredor vial Girardot–Tocaima y al diseño de una propuesta de infraestructura autosostenible enfocada en la seguridad vial.

Inicialmente, se realizará una revisión documental relacionada con accidentalidad vial, fatiga del conductor, infraestructura de descanso y criterios de sostenibilidad aplicados al diseño vial. Asimismo, se recopilará información sobre antecedentes nacionales e internacionales asociados a la implementación de zonas de descanso.

Posteriormente, se efectuará el análisis de las condiciones del corredor vial, considerando aspectos relacionados con el flujo vehicular, características climáticas, necesidades de los usuarios y condiciones de seguridad presentes en la zona de estudio.

Con base en la información obtenida, se definirán los criterios técnicos y funcionales requeridos para el diseño de la propuesta, incluyendo distribución espacial, accesibilidad, servicios básicos y alternativas sostenibles para el funcionamiento de la infraestructura.

Finalmente, se desarrollará el diseño conceptual de la zona de descanso autosostenible, integrando soluciones enfocadas en el bienestar de los usuarios, el aprovechamiento eficiente de recursos y el fortalecimiento de la seguridad vial dentro del corredor Girardot–Tocaima.

VII. RESULTADOS ESPERADOS

A. ANALIZAR Y OBSERVAR

A partir de una fase de detección de necesidades y la consulta de datos de la Agencia Nacional de Seguridad Vial sobre riesgos por fatiga, se consolidó el modelo: una infraestructura flexible y autosustentable que integra aspectos como lo son agua potable, conectividad y zonas de confort. Este modelo se plantea en la vía Girardot-Tocaima, donde un estudio de campo y encuestas a usuarios permitieron identificar los servicios críticos y las ubicaciones estratégicas para garantizar una accesibilidad óptima. Como resultado, se definió la implementación de una zona de descanso estratégicamente situadas a lo largo de esta ruta, diseñadas bajo criterios de eficiencia energética y adaptabilidad climática.

B. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO

El proyecto al proponer un diseño estandarizado de zonas de descanso adaptables a las vías primarias del Alto Magdalena, las cuales se proyectan con una separación estratégica de 15 km para garantizar la cobertura regional. En el caso específico de la vía Girardot-Tocaima, el análisis de flujo vehicular y la disponibilidad de espacio permitieron determinar la ubicación de un punto medio entre el Terminal de Transportes de Girardot y el casco urbano de Tocaima; este emplazamiento estratégico responde a la necesidad identificada mediante encuestas de establecer un área de alto tráfico que facilite la recuperación de los conductores en un sector crítico del corredor.



Fig. 1. Delimitación de la zona de estudio
Fuente: Los Autores tomado de (Google Earth, s.f.) https://www.google.es/intl/es/earth/index.html

C. DISEÑO

El diseño de la zona de descanso busca responder a las principales necesidades de los usuarios durante trayectos largos en carretera. Para ello, se integran soluciones que garanticen acceso a agua potable, energía eléctrica, conectividad, espacios de sombra y sistemas de comunicación de emergencia.

C.A. Paneles solares

Con base en el método de potencia y las condiciones de radiación solar en la zona de estudio, se determinó la instalación de 2 paneles solares acompañados de 7 baterías de 417 amperios. Los paneles se ubicarán con una inclinación aproximada de 6°, adecuada por la cercanía a la línea del Ecuador, con el fin de optimizar la captación de energía solar.

C.B. Dispensadores de agua

El sistema de dispensadores proveerá agua potable fresca y segura mediante un mecanismo de enfriamiento por compresión. El agua será recolectada de las lluvias a través de canaletas en la cubierta y posteriormente filtrada con un sistema de sedimentos, carbón activado y micro/ultrafiltración. El equipo, fabricado en acero inoxidable, cumple con estándares de accesibilidad y durabilidad, garantizando calidad y seguridad en el suministro (ELKAY, 2020).

C.C. Red WiFi

Para asegurar conectividad en zonas rurales, se implementará tecnología WiMax, que ofrece cobertura de hasta 50 km y alta velocidad. Su instalación es sencilla y rentable, facilitando el acceso digital de los usuarios en las bahías de descanso (Conectividad a Internet para el progreso rural, 2023).

C.D. Puntos de acceso eléctrico

Los puntos de carga estarán alimentados por el sistema solar, con energía almacenada en baterías para garantizar

continuidad. Se dispondrán puertos USB y tomacorrientes en áreas visibles y seguras, permitiendo la recarga de dispositivos electrónicos.

C.E. Mobiliario

El mobiliario estará compuesto por sillas de madera resistentes y cómodas, ubicadas en zonas sombreadas y accesibles, brindando confort a todo tipo de usuarios.

C.F. Cabinas telefónicas

Las cabinas de emergencia funcionarán de manera autónoma gracias al sistema solar y estarán conectadas a los servicios regionales de atención. Este recurso es esencial en áreas con baja cobertura móvil, reforzando la seguridad vial.

C.G. Cristales con control solar

Se instalarán cristales laminados con doble capa y revestimientos de óxido metálico, que reducen el calor interior y aumentan la seguridad al evitar astillamientos. La tecnología empleada incluye MSVD y CVD, garantizando eficiencia térmica y durabilidad (Jeovent, 2024).

C.H. Parqueadero

El diseño del parqueadero se ajustará a las dimensiones establecidas por la Resolución N° 004100 de 2004 para el vehículo tipo "4B3". Se ubicará lateralmente a la zona de descanso, con posibilidad de adaptación según las condiciones de la vía.

C.I. Prototipo

El prototipo fue elaborado en AutoCAD, con medidas precisas y espacios de tránsito libres de 1.50 m dentro de las casetas, garantizando accesibilidad para personas en silla de ruedas. Se recomienda su implementación en ambos costados de la vía para mejorar la experiencia de los usuarios y evitar afectaciones al tráfico.



Fig. 2. Vista frontal del diseño
Fuente: Los Autores



Fig. 2. Vista en planta del diseño
Fuente: Los Autores

VIII. CONCLUSIONES

La definición de criterios técnicos, funcionales y sostenibles se materializó en un conjunto de componentes que garantizan un enfoque integral que combina eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y bienestar de los usuarios.

El diseño del prototipo, elaborado en AutoCAD, asegura la correcta distribución espacial y la accesibilidad universal, con espacios de tránsito libres para personas con movilidad reducida, siendo de este modo una propuesta que consolida una infraestructura autosostenible al integrar servicios básicos y soluciones energéticas limpias, reduciendo la huella ambiental y aportando a la seguridad vial.

La evaluación de la viabilidad funcional tanto de la parte interna del diseño como el parqueadero, al tener en cuenta las medidas necesarias para los camiones 3S3 puede convertirse en una estrategia efectiva para disminuir los riesgos asociados a la fatiga del conductor, mejorar la experiencia de viaje y contribuir al desarrollo seguro y sostenible de la movilidad en la via Girardot–Tocaima. En síntesis, el proyecto no solo atiende las necesidades inmediatas de los usuarios, sino que también establece un modelo replicable de infraestructura vial sostenible y segura para el país.

IX. REFERENCIAS

[1]Acevedo, S., & Mendieta, J. (2025). *Servicios Carreteros.* Retrieved from Super Transporte: https://chamaeleon.supertransporte.gov.co/portalsuper/apps/storymaps/stories/f371b3ff4bd14762bbf892677824db99

[2]Agencia Nacional de Seguridad Vial . (2025, Enero 21). *Por primera vez en 7 años hay una reducción de víctimas fatales de siniestros viales en Colombia*. Retrieved from https://ansv.gov.co/es/prensa-comunicados/12244?

[3]Cadena3Rosario. (2026). *Calor Extremo: Alerta Por Mayor Riesgo Al Volante.* Retrieved from Cadena3Rosario: https://www.instagram.com/p/DTApAX5kY2O/

[4]*Conectividad a Internet para el progreso rural* . (2023, 08 26). Retrieved from https://repository.uniminuto.edu/bitstream/10656/18753/2/Conectividad%20a%20internet%20para%20el%20progreso%20rural.pdf

[5]DANE. (2019). *Departamento Nacional de Estadísticas. Encuesta Nacional Manufacturera. Materias primas, materiales y empaques consumidos y comprados según tipo de artículo. Actualización a diciembre de 2019.* Retrieved from Departamento Nacional de Estadísticas. Encuesta Nacional Manufacturera. Materias primas, materiales y empaques consumidos y comprados según tipo de artículo. Actualización a diciembre de 2019.: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuentas-residuos/Bt-Cuenta-residuos-2016p.pdf DNP (2016).

[6]DANE. (2026, Marzo 31). *Estadísticas por tema Transporte*. Retrieved from https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/transporte

[7]ELKAY. (2020). *Bebederos y estaciones llenadoras de botellas.* Retrieved from

https://latam.elkay.com/content/dam/intllatam/extra/literature/catalogo/intl-4736s_elkay_catalog_for_school.pdf
[81]IDEAM. (2024, Junio 14). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Retrieved from https://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima
[9]Jeovent. (2024). *Cristales con control solar: ¿Qué son y cómo funcionan?* Retrieved from Jeovent: https://jeovent.com/cristales-con-control-solar-que-son-y-como-funcionan/#:~:text=Los%20cristales%20con%20control%20solar%20son%20aquellos%20que%20est%C3%A1n%20fabricados,ambiente%20interno%20de%20la%20vivienda.
[10]Ministerio de Transporte. (2026). *Movilidad Ambientalmente Sostenible.* Retrieved from MINISTERIO DE TRANSPORTE: https://especiales.mintransporte.gov.co/SemanaMovilidadCO/movilidad-ambientalmente-sostenible.php
[11]Muñoz Torres, D. F., Lozano Pérez, G., & Espinel de Segura, B. (2020). Análisis de la seguridad vial en instituciones educativas con múltiples sedes. Cartagena de Indias, Colombia. *Scielo*. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552019000200093
[12]NRIOS. (2025, Enero 24). *Colombia registró reducción histórica de muertes por siniestros viales: disminuyó en un 2%.* Retrieved from Tropicana : https://www.tropicanafm.com/2025/colombia-registro-reduccion-historica-de-muertes-por-siniestros-viales-disminuyo-en-un-2-427656.html?utm_source=chatgpt.com
[13]OMS. (2023). *Informe OMS sobre Seguridad Vial 2023: Hacia un futuro con menos muertes en las carreteras.* Retrieved from OMS: https://www.cea-online.es/politica-de-privacidad/7-blog/1057-informe-oms-sobre-seguridad-vial-2023-hacia-un-futuro-con-menos-muertes-en-las-carreteras#:~:text=De%20hecho%2C%20en%202019%2C%20hace%20tan%20solo,en%20cuenta%20todo%20el%20rango%20de%20edad.
[14]Organización Mundial de la Salud. (2023, Diciembre 13). *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2023.* Retrieved from https://www.who.int/es/publications/i/item/9789240086517
[15]Salamanca Galvis , L. V. (2023). *Un alto en el camino para llegar seguro: consejos para evitar la fatiga al conducir*. Retrieved from Consejo Colombiano de Seguridad: https://ccs.org.co/portfolio/seguridad-prevencion-vial-colombia/?
[16]Torregroza Vargas , N. M. (2012). *Evaluación de los efectos de la fatiga laboral en la seguridad vial: el caso del transporte de carga en Colombia.* Retrieved from Uniandes: https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/1332d746-ff7e-404d-bb11-0e7c3af5bdfb/content
[17]Transeop. (2025). *Áreas de descanso para transportistas: Las Mejores.* Retrieved from transeop: https://www.transeop.com/blog/areas-de-descanso-para-transportistas/320/#google_vignette
[18]Velásquez O, N., Cabrera A, G., & Valladares G , M. (2009). Seguridad vial, un desafío de salud pública en la Colombia del siglo XXI. *Scielo*. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-386X2009000200013

Caso de Estudio: Sistema de Micromovilidad Eléctrica Intermodal bajo el Marco de la Ley 2486 de 2025 en Colombia

Case Study: Intermodal Electric Micromobility System Under the Framework of Law 2486 of 2025 in Colombia

Paola Ortega
Escuela de Contaduría Pública
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Sogamoso, Colombia
paola.ortega01@uptc.edu.co

Lina Pedraza
Escuela de Contaduría Pública
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Sogamoso, Colombia
lina.pedraza@uptc.edu.co

Herman Fernández
Escuela de Ing. Electrónica
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Sogamoso, Colombia
herman.fernandez@uptc.edu.co

Camilo Sanabria
Escuela de Ing. Electrónica
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Sogamoso, Colombia
camilo.sanabria@uptc.edu.co

Oscar Higuera
Escuela de Ing. Electrónica
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Sogamoso, Colombia
oscar.higuera@uptc.edu.co

***Abstract*—This research project proposes a model for an Integrated Electric Micromobility System (IEMs) in response to the challenges of the "last mile," using the high-traffic urban environment of Bogotá, Colombia as a case study. The study is based on Law 2486 of 2025, the new legal framework that regulates the circulation of light electric vehicles for urban personal mobility (LEMPV) and promotes their integration with the national mass transit system. The project is structured around three dimensions: technical, legal and safety, and environmental. The results will provide a roadmap for territorial entities and private operators to ensure efficient deployment that prioritizes pedestrian safety and environmental justice throughout the country.**

***Keywords*—Micromovilidad, Ley 2486 de 2025, Movilidad Sostenible, Intermodalidad, Vehículos Eléctricos Livianos de Movilidad Personal Urbana (VELMPU).**

I. Introducción

La mayoría de los países se han comprometido durante la última década a reducir su huella de carbono, combatir el cambio climático y disminuir la contaminación atmosférica típica de las grandes ciudades. En particular, los entornos urbanos en el mundo enfrentan desafíos relacionados con el transporte, como la congestión del tráfico, las limitaciones de infraestructura, los accidentes de tráfico y la contaminación atmosférica y acústica [1-3]. En [1], los autores evalúan cómo los vehículos de tres y cuatro ruedas, clasificados como Clase L según el reglamento de la unión europea, n.º 168/2013, pueden contribuir a un uso más eficiente del espacio en las zonas urbanas. En [2], el autor investigan los desafíos asociados con la introducción de los patinetes eléctricos en diez grandes ciudades, sugiriendo que muchas ciudades han pasado por etapas de ensayo y error en búsqueda de la legislación adecuada, por lo que es prudente que los planificadores urbanos implementen políticas relativas a la velocidad máxima, el uso obligatorio de infraestructura para bicicletas y estacionamientos exclusivos, así como limitar el número de operadores con licencia. En [3], los autores analizan datos relacionados con factores socioeconómicos (trabajo, ingresos, entre otros) para evaluar la tendencia al uso de patinetas eléctricas en Palermo, Sicilia, mediante algoritmos de aprendizaje automático, mostrando que las personas de ingresos medios y los trabajadores autónomos son más propensos a utilizar la micromovilidad que otros grupos, es decir, que la micromovilidad no es solo un medio de transporte preferido por personas de bajos ingresos o estudiantes.

Los estados han implementado estrategias que vinculan la tecnología y la conciencia ambiental a la hora de movilizarnos en las grandes ciudades. En este contexto, el término micromovilidad se ha convertido en una excelente alternativa de desplazamiento en entornos urbanos, capaz de sortear desafíos actuales como la congestión del tráfico en ciudades muy pobladas, la eficiencia de tiempo, la necesidad de reducir las emisiones de CO_2, espacios urbanos y reducción de costos.

La micromovilidad eléctrica, combina dos tendencias de transporte para hacer trayectos más rápidos y ecológicos. Se

refiere al uso de vehículos eléctricos livianos de movilidad personal urbana (VELMPU), diseñados para distancias cortas (generalmente menos de 10 km) y que funcionan con baterías eléctricas, cuyo objetivo es resolver el problema de la "última milla", es decir, el trayecto desde que se finaliza el transporte masivo hasta que se llega a la puerta de tu destino.

En el mercado existe una gran variedad de vehículos de micromoviliad en ciudades de todo el mundo (Bicicletas, patinetes eléctricos, Scooters eléctricos, segways, monociclos eléctricos, Hoverboards, y carros eléctricos), incrementando su uso, según estudios el mercado mundial de micromovilidad se valoró en 197.50 mil millones de dólares en 2025. Se proyecta que el mercado crecerá de 213.70 mil millones de dólares en 2026 a 368.20 mil millones de dólares en 2034 [4].

Según el informe de la National Association of City Transportation Officials NACTO (2023) sobre micromovilidad compartida en Estados Unidos y Canadá —países referentes en la implementación de estos sistemas en 2023 se registraron aproximadamente 133 millones de viajes en Estados Unidos, lo que representó un incremento del 16 %, mientras que en Canadá se alcanzaron cerca de 24 millones de viajes, con un crecimiento del 40 % respecto al año anterior [5]. Para el año 2025 se registran 150 millones de viajes en vehículos compartidos, bicicletas y patinetes, consolidando la micromovilidad como parte integral del transporte público en las ciudades miembros de la NACTO [6].

Este artículo aborda algunas de las características más relevantes para tener en cuenta en el diseño de un modelo de Sistema de Micromovilidad Eléctrica Integrada (SMEI) como respuesta a los desafíos de la "última milla", tomando algunos estudios llevados a cabo en la ciudad de Bogotá, Colombia. El artículo está organizado de la siguiente manera: En la Sección 2 se realiza una breve descripción de la arquitectura funcional de la micromovilidad y se pone en contexto de como se ha promovido la implementación de SMEI en Colombia, teniendo en cuenta las dimensiones, legal y de seguridad, y ambiental y el estado de la micromovilidad en Bogotá. La Sección 3 presenta una breve descripción de las características más relevantes para el diseño de un modelo de SMEI. Finalmente, las conclusiones derivadas del estudio se resumen en la Sección 4.

II. Contexto de la Micromovilidad en Colombia

A. *Dimensión Técnica*

Técnicamente, la arquitectura funcional de la micromovilidad moderna se basa en: la infraestructura digital, (aplicaciones móviles, GPS, sensores IoT, conectividad inalámbrica, sistemas de pago digital, plataformas cloud), la Infraestructura física (ciclorutas, estaciones de carga, zonas de parqueo inteligente, hubs intermodales) y la analítica y control (monitoreo en tiempo real, análisis de demanda, optimización de rutas, gestión energética, mantenimiento predictivo).

B. *Dimensión Legal y de Seguridad*

La micromovilidad en Colombia se encuentra regulada por un sistema jurídico integrado por diversas leyes, decretos y lineamientos técnicos. Dentro de este marco se destacan el Código Nacional de Tránsito (Ley 769 de 2002), la Ley Pro-Bici (Ley 1811 de 2016), normas sobre planeación urbana sostenible y algunos aspectos sobre la movilidad sostenible (Ley 1083 de 2006), el Documento CONPES 3991 de 2020 sobre política de movilidad urbana, así como los planes de desarrollo en los ámbitos nacional y territorial. A este conjunto normativo se incorpora, de manera reciente, la Ley 2486 de 2025, la cual establece una regulación específica para la micromovilidad, con el propósito de superar los vacíos normativos existentes, promover el uso de estos medios de transporte y fijar reglas claras en materia de seguridad vial.

La Ley 2486 de 2025 surge como respuesta a una necesidad evidente derivada del crecimiento acelerado en el uso de vehículos de micromovilidad en las principales ciudades del país. Este fenómeno, aunque positivo en términos de movilidad alternativa, ha traído consigo problemáticas como el aumento de la accidentalidad, el uso indebido de ciclorrutas y andenes, y conflictos recurrentes con los peatones. En este contexto, la ley estructura su aplicación sobre tres pilares fundamentales. En primer lugar, la formalización de la micromovilidad, mediante el reconocimiento jurídico de estos vehículos y la delimitación de sus condiciones de uso dentro del sistema de tránsito. En segundo lugar, la promoción del transporte sostenible, al incentivar alternativas de movilidad limpia que contribuyen a la reducción de emisiones y a la descongestión urbana. Finalmente, el establecimiento de reglas claras para su uso, orientadas a mejorar la seguridad vial, definir espacios de circulación y garantizar una convivencia equilibrada entre los distintos actores de la vía.

Cabe resaltar que para incentivar su uso y debido a su bajo riesgo relativo, estos vehículos no requieren, matrícula ante organismos de tránsito, seguro obligatorio de accidentes de tránsito (SOAT), ni licencia de conducción. Asimismo, el incumplimiento a la norma trae consigo la imposición de sanciones y multas que van desde los 6 salarios mínimos legales vigentes (SMLDV), hasta la inmovilización del vehículo.

Es importante señalar que, aunque la norma fue expedida en 2025, la reglamentación y los detalles técnicos, según el Ministerio de Transporte, deberán ser definidos en julio de 2026. Aunque, en ciudades como Bogotá, las autoridades ya están exigiendo el cumplimiento de normas básicas de comportamiento (no transitar por los andenes y el uso de luces y casco), basándose en este nuevo marco legal.

C. *Dimensión Ambiental*

El compromiso de Colombia con la disminución de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), se evidencia en las propuestas realizadas ante la comunidad internacional durante los últimos 10 años. Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático bajo el acuerdo de París, Colombia presentó sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC 3.0) el 25 de septiembre de 2025 bajo el título “Transformaciones para la Vida”, que recoge las metas cuantitativas de mitigación al 2030 y 2035, la visión estratégica hacia la carbono neutralidad y la resiliencia al 2050, así como los componentes de adaptación. De igual manera, entregó su informe bienal de transparencia en 2024, junto con el inventario nacional de (GEI) y su Contribución Determinada a Nivel Nacional (CTF NDC). Asimismo, para la implementación de las acciones que permiten cumplir con los compromisos, el país cuenta además con un Plan Nacional de Adaptación (PNA)

desde 2018, y con una estrategia climática de largo plazo desde 2021 que plantea una visión de desarrollo con menos emisiones y resiliente al clima al 2050 [7].

La Estrategia de Carbono Neutralidad a 2050 define un conjunto de acciones orientadas a convertir el país en una sociedad y economía resiliente frente al cambio climático, carbono neutral y con alta capacidad adaptativa. La meta de reducir las emisiones de GEI y lograr la neutralidad de carbono en 2050 se basa en la descarbonización de la economía y la transición energética, impulsando especialmente las energías renovables, la eficiencia energética y la electrificación de sectores estratégicos [8].

El plan Nacional de Desarrollo 2022 – 2026 "Colombia Potencia mundial de la Vida", se describen los objetivos y las acciones encaminadas a cumplir los retos climáticos para una transformación productiva limpia, entre los que se destacan la meta de reducir en 51% las emisiones de GEI en 2030 y alcanzar la carbono neutralidad en 2050. En los indicadores de primer nivel se encuentran las toneladas de CO2 mitigadas por el sector transporte, tomando como línea base 149.600 toneladas en 2021 y como meta del cuatrienio llegar a 2.149.230 toneladas. En este sentido, el plan de desarrollo plantea avanzar de manera progresiva hacia formas de movilidad de cero y bajas emisiones en todos los segmentos, medios y modos, con el fin de promover la eficiencia energética y la descarbonización del sector transporte [9].

D. Micromovilidad en Bogota

En Bogotá existen diversos estudios e informes sobre el uso de sistemas de micromovilidad; sin embargo, a diferencia de países como Estados Unidos y Canadá, esta información se encuentra dispersa entre documentos académicos, reportes institucionales y análisis técnicos. Estudios recientes evidencian que la micromovilidad en la ciudad está compuesta principalmente por viajes de corta distancia realizados en bicicleta, patinetas y vehículos eléctricos, siendo la bicicleta el modo predominante, seguido por las patinetas eléctricas en crecimiento. Asimismo, entidades distritales han avanzado en la implementación de infraestructura, como la ampliación de espacios de estacionamiento para estos vehículos y la integración progresiva dentro de las políticas de movilidad sostenible. No obstante, persisten desafíos importantes relacionados con vacíos regulatorios, seguridad vial, disponibilidad de datos y articulación institucional, lo que refleja que Bogotá se encuentra en una etapa de consolidación en el desarrollo de la micromovilidad.

III. Modelo de Sistema de Micromovilidad Eléctrica Integrada

La implementación de un modelo de sistema de micromovilidad eléctrica genera algunos beneficios técnicos y urbanos, tales como, la reducción de emisiones disminuyendo la dependencia de vehículos de combustión, la optimización del espacio urbano lo que reduce la ocupación vial y la demanda de estacionamiento, la integración multimodal facilitando la conexión con metro, buses y trenes, la movilidad sostenible que favorece la transición energética urbana y la analítica urbana generando datos para llevar a cabo una planificación inteligente.

En cuanto al despliegue de la micromovilidad existen algunos desafíos y limitaciones técnicas, tales como, la gestión de infraestructura, seguridad vial, regulación urbana, interoperabilidad tecnológica, gestión energética, congestión peatonal, y la planificación de estacionamientos inteligentes.

Dentro de los componentes tecnológicos asociados la micromovilidad moderna integra tecnologías como: IoT, inteligencia artificial, edge computing, redes 5G, sistemas de posicionamiento, sensores ambientales, plataformas de datos urbanos.

En la Tabla I se resumen algunas de las características para tener en cuenta en la implementación de un SMEI.

TABLA I. Caracteristicas de un SMEI

Item	Modelo de SMEI	
	Técnico y urbana	***Beneficio***
1	Reducción de emisiones.	Disminuye los vehiculos de combustion.
2	Optimización del espacio urbano.	Reduce la ocupación vial y la demanda de estacionamiento.
3	Integración multimodal	Facilita la conexión con metro, buses y trenes.
4	Movilidad sostenible	Favorece la transición energética urbana.
5	Analítica urbana	Genera datos para una planificación inteligente.
		Desafíos y limitaciones técnicas
6	***Despliegue de la micromovilidad***	Gestión de infraestructura, seguridad vial, regulación urbana, interoperabilidad tecnológica, gestión energética, congestión peatonal y planificación de estacionamientos inteligentes.
		Integración de tecnologías
7	***Micromovilidad moderna***	IoT, IA, edge computing, 5G, sistemas de posicionamiento, sensores ambientales, plataformas de datos urbanos

Conclusiones

El crecimiento del comercio electrónico y de las entregas urbanas incrementará significativamente la presión sobre los sistemas de transporte urbano, por lo que la micromovilidad surge como una solución de descarbonización y optimización logística. Sin intervenciones efectivas, se proyecta un aumento superior al 30% en congestión y emisiones asociadas al transporte de última milla.

La micromovilidad se ha consolidado como un sistema de transporte público en expansión y cada vez más popular en Norteamérica. En comparación, Estados Unidos y Canadá presentan un modelo más maduro, caracterizado por altos niveles de adopción, una fuerte participación del sector privado y desafíos asociados a los costos y a la fragmentación regulatoria.

Bogotá se encuentra en una etapa de transición, con avances significativos en infraestructura ciclista y en el desarrollo normativo, aunque aún enfrenta retos en términos de consolidación institucional, integración tecnológica y escalabilidad del sistema.

Referencias

[1] A. Ewert, M. Brost, C. Eisenmann, and S. Stieler, "Small and light electric vehicles: An analysis of feasible transport impacts and opportunities for improved urban land use," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 19, Oct. 2020, doi: 10.3390/su12198098.

[2] S. Gössling, "Integrating e-scooters in urban transportation: Problems, policies, and the prospect of system change," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 79, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102230.

[3] T. Campisi, E. Kuşkapan, M. Y. Çodur, and D. Dissanayake, "Exploring the influence of socio-economic aspects on the use of electric scooters using machine learning applications: A case study in the city of Palermo," *Research in Transportation Business and Management*, vol. 56, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.rtbm.2024.101172.

[4] "Sample - Micro Mobility Market Size, Share | Industry Report [2026-2034]." Accessed: May 09, 2026. [Online]. Available: https://www.fortunebusinessinsights.com/enquiry/sample/micro-mobility-market-115031

[5] NACTO, "Shared Micromobility in the U.S. and Canada:2023."

[6] NACTO, "Shared Micromobility in NACTO Member Agencies: 2025 Trends - NACTO." Accessed: May 09, 2026. [Online]. Available: https://nacto.org/publication/shared-micromobility-in-nacto-member-agencies-2025-trends/

[7] Gobierno de Colombia, "Contribución Determinada a Nivel Nacional-NDC 3.0 Colombia," Bogotá, Sep. 2025.

[8] Gobierno de Colombia, "Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el acuerdo de París," Bogotá, 2021.

[9] Gobierno de Colombia, *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, Colombia, potencia mundial de la vida*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, 2023. [Online]. Available: www.dnp.gov.co

WEEF 2026
(IFEES & GEDC)

Engineering Education That Transforms

September 22 – 25, 2026
Cartagena de Indias, Colombia



RESEARCH ADVANCES

DIGITAL TECHNOLOGY AND INNOVATION

Powered by

Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI

Improving Exoplanet Detection with Stacking Meta-Classifiers on CNN Ensembles

Andersson David Sánchez Méndez
Systems Engineering
Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá D.C., Colombia
andersson.sanchez-m@mail.escuelaing.edu.co
ORCID: 0009-0000-0341-1524

Daniel Felipe Martínez Hernández
Statistical Engineering
Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá D.C., Colombia
daniel.mhernandez@mail.escuelaing.edu.co
ORCID: 0009-0000-4899-9851

Jesús Alfonso Pinzón Vega
Systems Engineering
Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá D.C., Colombia
jesus.pinzon-v@mail.escuelaing.edu.co
ORCID: 0009-0006-3188-0081

Wilmer Edicson Garzón Alfonso
Master's in Data Science
Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá D.C., Colombia
wilmer.garzon@escuelaing.edu.co
ORCID: 0000-0002-5920-2278

***Abstract*—NASA's Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) generates an unprecedented volume of full-frame image (FFI) photometric data, producing over one million new light curves per month that cannot be vetted manually at scale. Traditional machine learning classifiers struggle with the temporal complexity and severe class imbalance inherent to stellar light curve analysis. Single convolutional neural networks (CNNs), while demonstrating promising results, remain sensitive to weight initialization and hyperparameter selection. This paper presents a stacking-based CNN ensemble architecture that systematically extends the Astronet-Triage-v2 framework to improve exoplanet triage in TESS FFI observations. Ten CNN base models, trained via k-fold cross-validation on labeled data from TESS Sectors 1–39, generate five-dimensional probability score vectors that are aggregated by five meta-classifiers: Logistic Regression (LR), Extreme Gradient Boosting (XGB), Multilayer Perceptron (MLP), Random Forest (RF), and Support Vector Machine (SVM), forming a two-level stacking ensemble. Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) dimensionality reduction is applied to the 30-dimensional ensemble output space to enable interpretable cluster visualization. The RF meta-classifier achieves the highest F1-score of 0.892 at threshold $\tau = 0.5$, with precision of 0.876, a 6.7% improvement over the voting baseline. The MLP meta-classifier achieves the highest recall of 0.980 at $\tau = 0.215$, reducing false negatives by 44.4% relative to the original Astronet-Triage-v2 scheme. The XGB meta-classifier attains the highest AUC-ROC of 0.9957 [95% CI: 0.9939–0.9973]. UMAP projections reveal geometrically coherent and separable clusters for each signal class, providing interpretable evidence of the ensemble's discriminative representations. These results demonstrate that stacking meta-classifiers on a CNN ensemble yields statistically robust improvements in classification performance, reduces missed exoplanet detections, and constitutes a scalable, mission-agnostic solution applicable to current and future photometric surveys including PLATO and Ariel.**

***Keywords*—Convolutional Neural Networks, CNN Ensemble, Exoplanet Detection, Transit Photometry, Meta-Classifier, Light Curve Classification, Machine Learning**

I. INTRODUCTION

The search for exoplanets is one of the most scientifically compelling endeavors in contemporary astrophysics. The photometric transit method, which detects the characteristic decrease in stellar flux when a planet passes in front of its host star, has become the most productive detection technique in history. Space missions dedicated to transit photometry, particularly NASA's Kepler telescope and its successor, the Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), have collectively confirmed or identified thousands of planetary systems, fundamentally transforming our understanding of planetary demographics [12,13].

TESS, launched in April 2018, conducts an all-sky photometric survey using four wide-field cameras covering a 24° × 96° instantaneous field of view. During its prime mission (2018–2020), TESS obtained full-frame images (FFIs) every 30 minutes across 26 sectors, each observed for approximately 27 days. The first extended mission updated the cadence to 10 minutes. The Quick-Look Pipeline (QLP) [4], developed at MIT, processes these FFIs to produce aperture-photometry light curves for approximately 10 million stars per hemisphere, searches them with the Box Least Squares (BLS) algorithm, and reports threshold-crossing events (TCEs) as exoplanet candidates. Cumulatively, TESS has generated approximately two petabytes of photometric data, producing more than one million new light curves per month, a throughput that completely overwhelms manual vetting capacity [4].

The automated classification of TCEs as periodic eclipsing signals (disp_e), contact eclipsing binaries (disp_b), junk from stellar or instrumental artifacts (disp_j), single transits or aliases (disp_s), or inconclusive (disp_n) is therefore a prerequisite for scientific exploitation of TESS data. Classical machine learning approaches, including random forests and support vector machines applied to engineered transit features, have demonstrated limited generalization due to the challenge of capturing complex temporal morphologies without explicit feature design [11]. Deep CNNs learn hierarchical temporal representations directly from raw or minimally processed light curves and have achieved state-of-the-art results: Astronet [1] achieved AUC of 0.988 on Kepler data; Astronet-Triage [2] achieved 97.0% average precision on TESS Sector 6 candidates; Astronet-Triage-v2 [3] extended coverage to 27,514 TCEs across Sectors 1–39 and employs an ensemble of ten CNNs with a threshold-voting classification strategy.

Despite this progress, the Astronet-Triage-v2 voting strategy assigns equal weight to all base models and ignores inter-model statistical correlations, limiting its capacity to optimally combine the diverse information captured by each CNN. Ensemble stacking [10] training a second-level meta-learner on the out-of-fold outputs of base learners, has been

consistently shown to outperform voting-based combinations in general machine learning benchmarks. Applied to a CNN ensemble for TESS exoplanet triage, stacking can exploit the joint distribution of ten models' predictions to make more informed classification decisions, particularly for borderline signals near classification thresholds. Furthermore, visualizing the high-dimensional probability output space of such ensembles using dimensionality reduction provides qualitative insight into model representations that traditional per-metric evaluation cannot offer.

This research was motivated by participation in the NASA International Space Apps Challenge 2025 under the track 'A World Away: Hunting for Exoplanets with AI,' where the team developed a publicly accessible exoplanet detection web application and achieved recognition among the top 45 projects worldwide from over 11,500 submissions [17]. This paper presents four principal contributions: (1) a systematic stacking framework applied to the Astronet-Triage-v2 ensemble outputs; (2) comparative evaluation of five diverse meta-classifiers; (3) UMAP-based visualization of the 30-dimensional probability space; and (4) comprehensive statistical evaluation with bootstrap confidence intervals.

II. OBJECTIVES

General Objective: To develop and evaluate a two-level stacking CNN ensemble architecture with multiple meta-classifiers that improves the precision, recall, and overall discriminative performance of automated exoplanet triage on TESS full-frame image light curves, relative to the threshold-voting baseline of Astronet-Triage-v2.

Specific Objectives:

1. Apply k-fold cross-validation training of ten CNN base models following the Astronet-Triage-v2 architecture on TESS sectors 1–39, producing calibrated probability vectors for ensemble aggregation.
2. Design and comparatively evaluate five stacking meta-classifiers (LR, XGB, MLP, RF, SVM) using the 10-dimensional disp_e probability vectors of the base models as learned feature inputs.
3. Apply UMAP dimensionality reduction to the full 30-dimensional ensemble output space (disp_e, disp_b, disp_j per base CNN) to characterize label cluster geometry and inter-class separability.
4. Evaluate all models with comprehensive primary and secondary classification metrics, including 95% bootstrap confidence intervals for AUC-ROC and average precision, with primary emphasis on recall maximization to minimize missed exoplanet detections.

III. THEORETICAL FRAMEWORK

A. Photometric Transit Method and the QLP Pipeline

The photometric transit method measures the fractional decrease in stellar flux caused by a planet transiting its host star. The transit depth $\delta = (R_p / R_\star)^2$, where R_p and $R_\star$ are the planetary and stellar radii; for an Earth-sized planet around a Sun-like star, $\delta \approx 84$ ppm, near TESS's photometric precision limit for Tmag ≈ 9 [12]. Flat-bottomed profiles indicate limb-darkened planetary transits; V-shaped profiles indicate grazing transits or eclipsing binary contamination.

The MIT Quick-Look Pipeline [4] applies aperture photometry and co-trending basis vector (CBV) detrending to TESS FFIs, then searches detrended light curves for periodic signals using BLS. For each detection, QLP reports a standardized TCE descriptor, period, epoch, transit depth, transit duration, SNR, and host star parameters from TIC 8.2, alongside the phase-folded light curve data, constituting the full input to the AstroNet-Triage-v2 classifier.

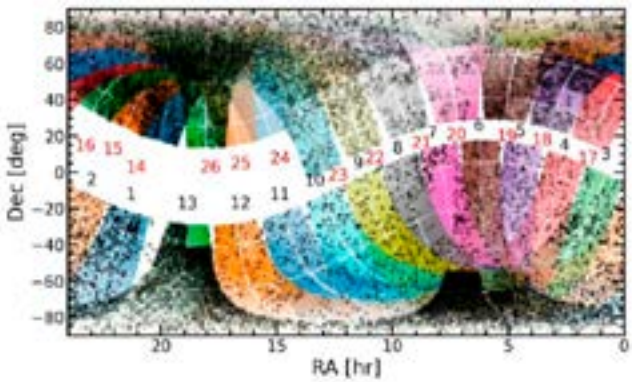


Fig. 1. Sky map of the 24,926 TCEs from TESS prime mission Sectors 1–26 (colored by sector) and 2,588 TCEs from Sectors 27–39 of the first extended mission [3].

The dominant false positives in TESS triage are: (i) eclipsing binaries (EBs), discriminated via secondary eclipse depth and ellipsoidal variations; (ii) background EBs diluted within TESS's ~21 arcsec pixel scale; and (iii) stellar variability and instrumental artifacts, including momentum dumps, scattered light, and post-sector-transition thermal settling.

B. Convolutional Neural Networks for Temporal Classification

CNNs [8,9] exploit parameter sharing and local connectivity to extract temporally coherent features from structured data. For 1D light curve series, convolutional layers detect characteristic temporal patterns, such as the flat-bottomed transit profile, independently of their position in the phase-folded sequence, building hierarchical representations across successive layers [8]. AstroNet-Triage-v2 employs six parallel CNN towers processing distinct phase-folded views of the light curve, whose outputs are concatenated with a scalar feature tower and fed through a final FC softmax network producing a five-dimensional probability vector [p_E, p_B, p_J, p_S, p_N] per TCE (see Section V-B for full architectural detail).



Fig. 2. (Left) Structure of a single CNN tower in Astronet-Triage-v2: 1–4 blocks of 1–4 convolutional layers followed by max-pooling. (Right) Fully connected tower processing scalar stellar and transit features. Both architectures from Tey et al. [3].

C. Ensemble Learning: From Voting to Stacking

Ensemble methods reduce generalization error by combining predictions from partially independent learners [11]. Bagging trains each learner on bootstrap resamples to reduce variance (e.g., Random Forest [16]); boosting trains learners sequentially to correct predecessor errors (e.g., XGBoost [14]); stacking [10] employs a two-level architecture where Level-1 base learners are trained via k-fold cross-validation and their out-of-fold predictions form the feature matrix for a Level-2 meta-classifier, which learns an optimal combination function that exploits both discriminative outputs and systematic biases of each base model.

The key advantage over voting is that voting treats each model output as an independent binary decision, discarding continuous probability information. Stacking uses the full probability distributions as features, resolving ambiguous cases where base models disagree and explicitly leveraging the complementary generalization patterns induced by different k-fold training splits.

D. UMAP Dimensionality Reduction

UMAP [7] is a non-linear manifold learning algorithm grounded in Riemannian geometry and algebraic topology. It constructs a weighted k-nearest-neighbor graph in the original space, models its topology via a fuzzy simplicial set formalism, and optimizes a low-dimensional embedding that minimizes the cross-entropy between the original and projected topological representations. Unlike t-SNE, UMAP preserves both local and global structure with linear computational complexity in the number of samples, producing 2D embeddings suitable for visual assessment of class separability and identification of ambiguous inter-class regions.

IV. STATE OF THE ART

The application of deep learning to exoplanet transit classification has been rapidly evolving since 2018. Shallue and Vanderburg [1] established the foundation with AstroNet, a two-branch CNN trained on 15,000 Kepler TCEs processing global and local phase-folded views, achieving an AUC of 0.988 and leading to the discovery of an eighth planet in the Kepler-90 system. This work validated the feasibility of replacing human vetting with automated CNN-based classification for large-scale transit surveys.

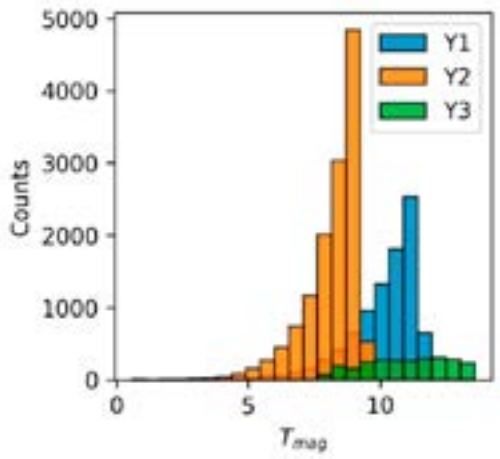


Fig. 3. Distribution of TESS apparent magnitudes (Tmag) for the labeled dataset. The broad magnitude range (4–18) presents a challenge for uniform photometric precision, as noise properties vary significantly across the range [3].

Pearson et al. [5] systematically studied the impact of data augmentation on TESS CNN classifiers, demonstrating that Gaussian noise injection, time-shift augmentation, and amplitude scaling substantially improve performance on imbalanced datasets where positive examples represent fewer than 10% of TCEs. Ansdell et al. [6] incorporated physical domain knowledge, stellar parameters, transit geometry, and limb-darkening coefficients, as auxiliary CNN inputs for K2 classification, demonstrating a 12% improvement in average precision without sacrificing recall.

Yu et al. [2] presented AstroNet-Triage, the first neural network trained and tested on real TESS data, achieving 97.0% average precision and 97.4% accuracy in triage mode, and 69.3% average precision in vetting mode. Their application to Sector 6 identified 288 high-confidence planet candidates, demonstrating operational deployability. Tey et al. [3] substantially advanced the field with AstroNet-Triage-v2: 27,514 labeled TCEs from Sectors 1–39, a five-class soft-label taxonomy, and a ten-CNN ensemble achieving precision 0.89 and recall 0.91 at $\tau = 0.215$ on Sector 33 held-out data, operationally integrated into the QLP candidate reporting pipeline.

Related work includes Valizadegan et al. [18], who applied deep learning to Kepler SPOC pipeline outputs, demonstrating strong generalization across pipeline architectures. Despite the breadth of this literature, no prior work has applied stacking meta-classifiers to CNN ensemble outputs for TESS exoplanet triage, and the UMAP visualization of ensemble probability spaces for light curve classification is novel.

The identified research gap is the absence of a principled second-level learning strategy that exploits the full statistical distribution of CNN ensemble outputs. The threshold-voting strategy employed by AstroNet-Triage-v2 is a heuristic that does not learn inter-model correlations or adapt to systematic biases of individual base models. This work directly addresses this gap by introducing stacking meta-classification and

demonstrating its superiority through rigorous statistical evaluation.

V. METHODOLOGY

A. Dataset: TESS TCEs from Sectors 1–39

This work uses the labeled dataset of Tey et al. [3], which comprises 24,926 TCEs from the TESS prime mission (Sectors 1–26) and 2,588 additional TCEs from the first extended mission Year 3 (Sectors 27–39), totaling 27,514 labeled observations. The dataset is partitioned into year-stratified training, validation, and test splits: Year 1 (Sectors 1–13) constitutes the primary training corpus; Year 2 (Sectors 14–26) provides cross-validation folds; Year 3 (Sectors 27–39) provides the out-of-distribution generalization test [3]. The evaluation set used in this work comprises 2,516 TCEs with consensus labels, of which 250 are true exoplanet candidates (disp_E = 1), yielding a class imbalance ratio of approximately 1:9 (positive:negative), typical of operational transit survey pipelines.

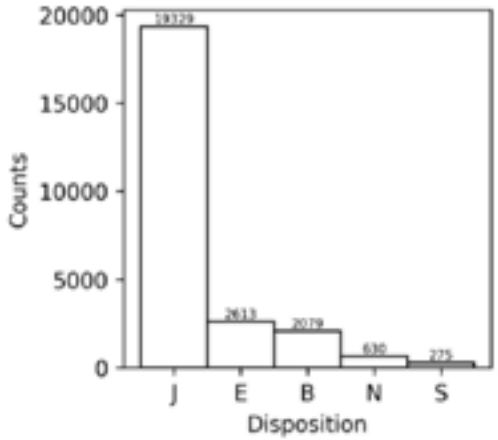


Fig. 4. Distribution of five-class consensus labels (J: junk/variability, E: exoplanet, B: eclipsing binary, N: not sure, S: single transit) across the full 27,514-TCE dataset [3].

All photometric preprocessing was performed by the QLP [4] as described in Tey et al. [3]. This includes: aperture photometry from TESS FFIs; CBV detrending; BLS period search; phase-folding at the best-fit period; binning into global (201 bins) and local (61 bins per fold) segment views; and extraction of scalar transit descriptors (period, depth, duration, SNR, epoch). Scalar stellar parameters from TIC 8.2 (mass, radius, Tmag) are appended to the CNN scalar input tower. No additional preprocessing was applied in the present work; the contribution is entirely at the ensemble meta-classification and visualization levels.

B. Astronet-Triage-v2 Base Architecture

Each of the ten base CNNs follows the AstroNet-Triage-v2 architecture [3], comprising six parallel CNN towers processing distinct phase-folded light curve views: (i) global view (201-bin at BLS period); (ii) global view at twice the orbital period; (iii) local view (61-bin zoom on transit center); (iv) secondary view (61 bins at secondary-eclipse phase); (v) sample-segment global view; and (vi) sample-segment local view. Each tower contains 1–4 convolutional blocks with ReLU activations and max-pooling (Fig. 2). A separate fully connected (FC) tower processes a 24-dimensional scalar feature vector including orbital period, transit depth and duration, Tmag, stellar mass and radius, QLP local- and secondary-scale descriptors, and a fold-count statistic. All tower outputs are concatenated and fed through a two-layer FC network with dropout, producing a five-dimensional softmax output [disp_e, disp_b, disp_j, disp_s, disp_n]. Training uses cross-entropy loss with class-imbalance weighting and the Adam optimizer.

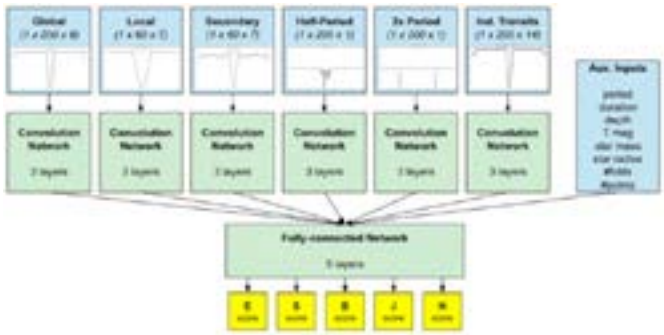


Fig. 5. Complete Astronet-Triage-v2 neural network architecture [3] used as the base model. Parallel CNN towers process multiple light curve views; the FC tower handles scalar features.

C. Stacking Strategy: Two-Level Ensemble

The proposed two-level stacking ensemble proceeds as follows. In Phase 1, ten CNN base models are trained via a stratified protocol combining 5-fold cross-validation with two random seeds per fold ($5 \times 2 = 10$ base CNNs) on the AstroNet-Triage-v2 dataset [3]. Each base CNN trains on four folds and produces out-of-fold predictions on the held-out fold; concatenating across folds yields out-of-fold predictions for every training row. Test-time predictions on the 2,516-sample test set are obtained by averaging probability scores across the ten CNNs, from which the disp_e score is extracted to build the 10-dimensional feature vector for the meta-classifiers.

In Phase 2, five meta-classifiers are independently trained: (a) Logistic Regression (L2, C = 1.0, balanced class weights); (b) XGBoost [14] (300 trees, depth 2, learning rate 0.05); (c) MLP (hidden layers 32-16 ReLU, L2 weight decay α = 1e-3, early stopping on 10% internal validation); (d) Random Forest [16] (500 trees, min. 2 samples per leaf, balanced class weights); (e) SVM with RBF kernel (C = 1.0, Platt-scaled probabilities). All are implemented in scikit-learn [15]; data leakage is avoided by training exclusively on out-of-fold predictions and evaluating on the disjoint test partition. The decision rule replicates the AstroNet-Triage-v2 convention: disp_e $\geq \tau = 0.215$ flags the TCE as a planet candidate.

VI. WORK DEVELOPMENT

A. Stacking Architecture Design and Justification

The original Astronet-Triage-v2 voting rule, classify as exoplanet if any single base model assigns disp_e > 0.215, is an OR-logic threshold that implicitly maximizes recall at the cost of precision. This rule treats each model as independently reliable and does not account for cases where only one of ten models exceeds the threshold due to noise rather than genuine transit signal. The stacking architecture replaces this heuristic with a learned combination function trained on the joint 10-dimensional output distribution.



Fig. 6. Two-level stacking pipeline: 5-fold cross-validation trains ten Astronet-Triage-v2 CNNs; their disp_E scores feed five meta-classifiers, thresholded at τ = 0.215 for the final triage decision.

The meta-classifier acts as an expert arbiter: it learns which subsets of base models are most reliable for specific signal morphologies and calibrates the ensemble's confidence accordingly. For example, signals with high disagreement among base models (i.e., 1–2 models exceeding 0.215 while 8–9 do not) are handled more conservatively by a trained meta-classifier than by the OR-logic voting rule, reducing false positives while preserving recall for clear planetary signals.

B. UMAP Analysis of Ensemble Prediction Space

For each of the 2,516 test observations, the ten base CNNs each produce a five-dimensional probability vector; from each vector, the three most informative scores (disp_e, disp_b, disp_j) are extracted, forming a 30-dimensional representation per observation. UMAP projects these vectors to 2D (n_neighbors = 15, min_dist = 0.1, metric = 'euclidean', n_epochs = 500). The full projection is shown in Fig. 7, colored by consensus label.

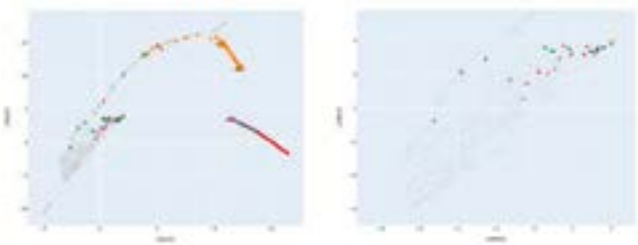


Fig. 7. UMAP 2D projections of the 30-dimensional ensemble output space. (Left) Full dataset colored by label: E (exoplanet, red), B (eclipsing binary, orange), J (junk, gray), N(not sure, green), S(single transit, purple). (Right) Partial view highlighting the E/B boundary.

The UMAP embedding reveals a clear multi-cluster topology: E candidates (red) form a compact isolated cluster in the right mid-region of the projection; J signals (gray) occupy a diffuse cloud -separated from the rest; and N (not sure) signals form a bridge cluster between E and B (orange), reflecting the inherent labeling ambiguity of signals that human vetters could not confidently classify. The inter-cluster distances are large relative to within-cluster variance for E and J, confirming strong separability. The N–B boundary region contains the ambiguous cases where stacking meta-classifiers provide the greatest improvement over voting.

C. Class-Specific UMAP and Light Curve Examples

To further characterize each cluster, we visualize individual class UMAPs alongside representative light curve examples, illustrating the signal morphologies that correspond to distinct regions of the embedding space. These qualitative analyses validate that the geometric structure of the UMAP embedding reflects meaningful physical differences between signal classes.

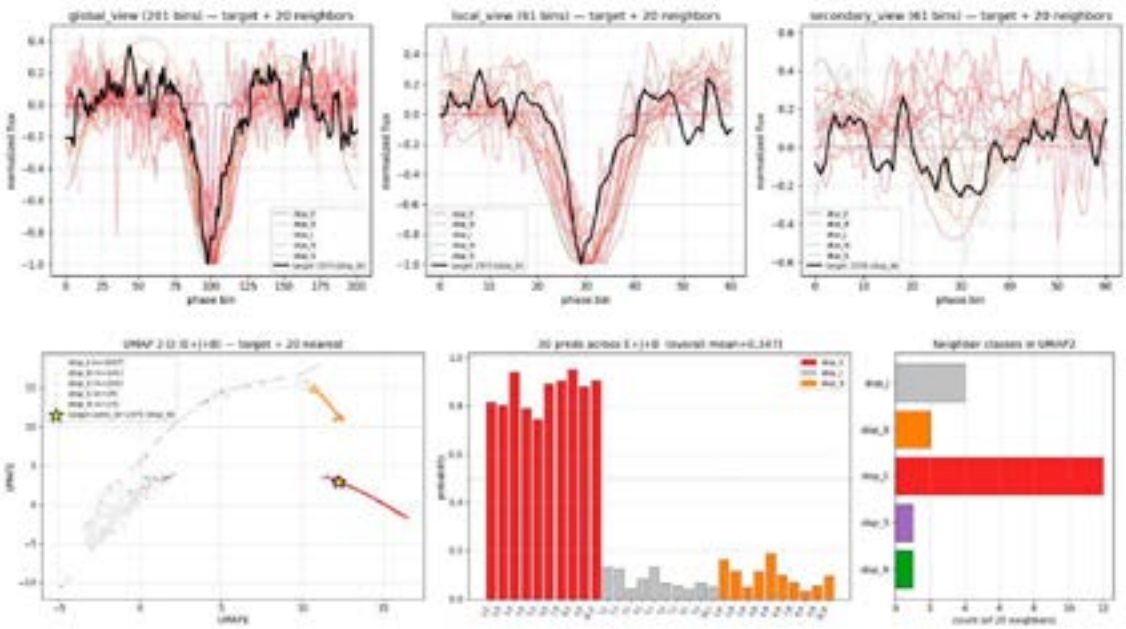


Fig. 8. Exoplanet candidate (E): (Up) Phase-folded light curve showing a characteristic flat-bottomed transit profile. (Down) 30-dimensional UMAP sub-embedding (disp_e, disp_b, disp_j from 10 base CNNs) for E-labeled TCEs, compact, isolated cluster indicating high inter-model consistency across all three probability scores.

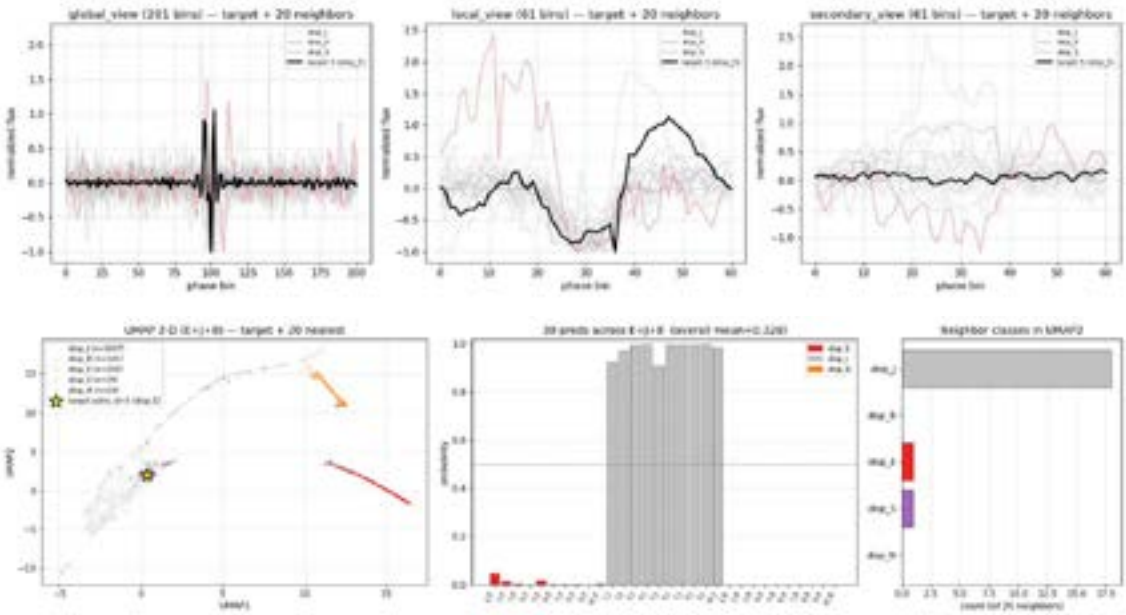


Fig. 9. Junk signal (J): (Up) Irregular light curve dominated by stellar variability and/or instrumental artifacts. (Down) 30-dimensional UMAP sub-embedding (disp_e, disp_b, disp_j from 10 base CNNs) for J-labeled TCEs, diffuse cloud well-separated from E and B clusters, reflecting near-zero disp_e with variable disp_j across base models.

D. Evaluation Baselines and Protocol

Four baseline predictors are established: (1) v2 vote: original AstroNet-Triage-v2 threshold voting on pre-trained models; (2) v2 mean: mean disp_e across the original ten models as a continuous predictor for AUC/AP; (3) kfold vote: threshold voting on k-fold trained models; and (4) kfold mean: mean disp_e across k-fold models. The five stacking meta-classifiers (kfold+LR, +XGB, +MLP, +RF, +SVM) are evaluated at $\tau = 0.215$ (maximizing recall) and $\tau = 0.5$ (balancing precision and recall). Binary metrics (precision, recall, F1, balanced accuracy, MCC) are computed on the 2,516-observation test set; 95% bootstrap confidence intervals (B = 1,000 stratified resamples) are computed for AUC-ROC and average precision (AP = AUC-PR).

E. Case Analysis: Challenging Signal Morphologies

Three categories of challenging signals are analyzed to assess the practical advantage of stacking over voting. Shallow transits ($\delta < 300$ ppm) approach the per-point photometric noise floor, generating high base-model disagreement that the meta-classifier is specifically suited to resolve. Grazing transits (impact parameter $b > 0.8$) produce V-shaped profiles morphologically similar to eclipsing binaries, requiring the ensemble to distinguish subtle curvature differences in phase-folded views. Multi-planet systems produce distorted phase-folded profiles from overlapping transit events; the AstroNet-Triage-v2 multi-view representation partially addresses this, and the meta-classifier further discriminates via inter-model agreement patterns.

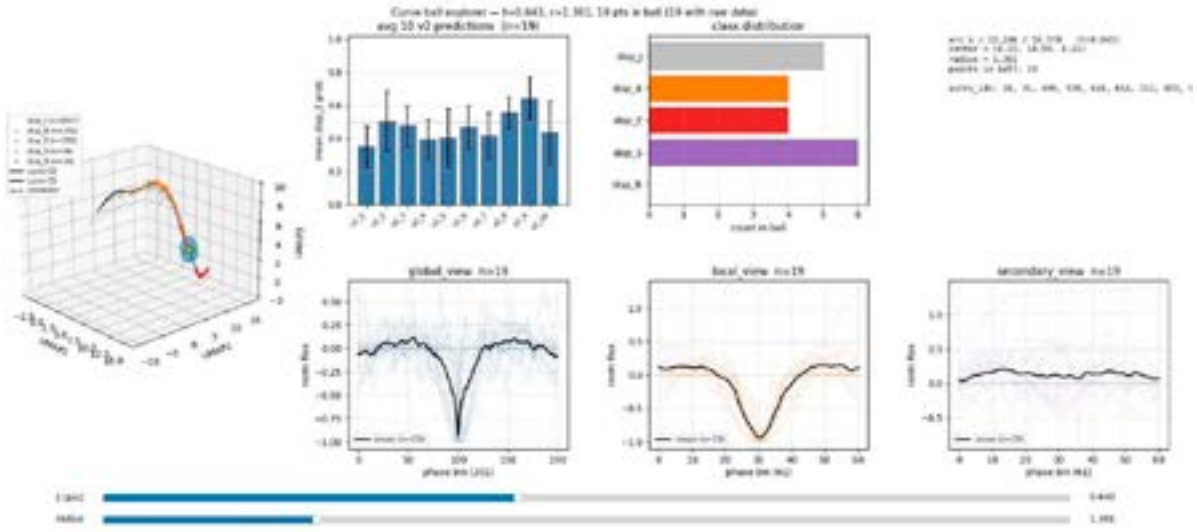


Fig. 10. *Curve-ball explorer for a confirmed exoplanet TCE. (Upper left) 3D projection of the 10-dimensional UMAP (disp_e from 10 base CNNs) with the selected neighborhood ball of radius R (blue point). (Upper right) Class distribution within that ball. (Lower panels) Global, local, and secondary phase-folded light curve views of the observations inside the ball.*

For contaminants, eclipsing binaries are the dominant false positive category. The Astronet-Triage-v2 five-class architecture encodes binary morphology in the disp_b score; stacking meta-classifiers can exploit the disp_b/disp_e score ratio to better discriminate grazing binaries from genuine planets near threshold.

VII. RESULTS AND ANALYSIS

A. Classification Performance at $\tau = 0.215$ (Recall-Prioritized)

Table I presents precision, recall, F1-score, specificity, balanced accuracy, and MCC for all predictors at threshold $\tau = 0.215$. This threshold is chosen to match the operational Astronet-Triage-v2 convention and prioritizes recall to minimize missed exoplanet detections. The MLP meta-classifier achieves the highest recall of 0.980, corresponding to only 5 missed exoplanets in 250, a 44.4% reduction in false negatives relative to the v2 vote baseline (9 missed). The RF meta-classifier achieves the best F1-score (0.874), precision (0.803), specificity (0.974), and MCC (0.863), confirming its superiority as the precision-recall tradeoff optimizer. The LR meta-classifier provides a useful intermediate: second-best F1 (0.853) with balanced accuracy of 0.964, suitable when interpretability of the combination weights is required.

TABLE I. Classification Metrics at Threshold $\tau = 0.215$

Predictor	Prec.	Recall	F1	Spec.	Bal.Acc	MCC
v2 vote†	0.746	0.964	0.841	0.964	0.964	0.830
kfold vote†	0.739	0.976	0.841	0.962	0.969	0.831
kfold+LR	0.767	0.960	0.853	0.968	0.964	0.841
kfold+XGB	0.689	0.976	0.808	0.951	0.964	0.798
kfold+MLP	0.734	**0.980***	0.839	0.961	0.970	0.829
kfold+RF‡	**0.803***	0.960	**0.874***	**0.974***	0.967	**0.863***
kfold+SVM	0.793	0.952	0.865	0.973	0.962	0.854

** Best value per column. ‡ Best overall meta-classifier. † Voting baselines (no meta-classifier).*

Notably, the kfold vote baseline outperforms the v2 vote baseline in recall (0.976 vs. 0.964) but shows marginally lower precision (0.739 vs. 0.746), reflecting the effect of cross-validation training diversity. The XGB meta-classifier achieves the same recall as kfold vote (0.976) while improving specificity to 0.951 and MCC to 0.798, demonstrating that stacking recovers the recall benefit of voting while providing additional discriminative capacity.

B. Classification Performance at τ = 0.50 (Balanced Operation)

Table II presents the same metrics at τ = 0.5. At this threshold, the RF meta-classifier comprehensively dominates. It achieves precision of 0.876 (the highest across all predictors and thresholds), F1-score of 0.892, specificity of 0.986 (fewest false positives), and MCC of 0.880. This represents a precision improvement of 6.4% and F1 improvement of 1.8% over the best voting baseline (kfold vote at τ = 0.5). The SVM meta-classifier achieves competitive recall (0.952) and MCC (0.869), confirming that multiple stacking configurations outperform the voting baselines.

TABLE II. Classification Metrics at Threshold τ = 0.50

Predictor	Prec.	Recall	F1	Spec.	Bal.Acc	MCC
v2 vote†	0.822	0.940	0.877	0.977	0.959	0.865
kfold vote†	0.812	0.952	0.877	0.976	0.964	0.865
kfold+LR	0.812	0.952	0.877	0.976	0.964	0.865
kfold+XGB	0.778	0.968	0.863	0.970	0.969	0.852
kfold+MLP	0.787	0.960	0.865	0.971	0.966	0.854
kfold+RF	**0.876***	0.908	**0.892***	**0.986***	0.947	**0.880***
kfold+SVM	0.818	0.952	0.880	0.977	0.964	0.869

** Best value per column. † Voting baselines (no meta-classifier).*

C. Ranking Metrics and Bootstrap Confidence Intervals

Table III presents AUC-ROC, 95% bootstrap confidence intervals, average precision (AP = AUC-PR), and Brier score for all predictors. The XGB meta-classifier achieves the highest AUC of 0.9957 [95% CI: 0.9939–0.9973], statistically indistinguishable from the kfold mean baseline (0.9956, CI: 0.9938–0.9973), confirming that XGB stacking recovers essentially all ranking information from the raw ensemble scores. The MLP meta-classifier achieves the second-highest AP (0.9637), and the RF meta-classifier achieves the lowest Brier score among meta-classifiers (0.0169), indicating better probability calibration.

TABLE III. Ranking Metrics with 95% Bootstrap CIs (B = 1,000)

Predictor	AUC	95% CI (AUC)	AP	95% CI (AP)	Brier
v2 mean	0.9951	[0.9931–0.9972]	0.9658	[0.9524–0.9786]	0.0163
kfold mean	0.9956	[0.9938–0.9973]	0.9679	[0.9551–0.9795]	0.0165
kfold+LR	0.9918	[0.9866–0.9961]	0.9425	[0.9042–0.9738]	0.0228
kfold+XGB	**0.9957***	[0.9939–0.9973]	**0.9673***	[0.9542–0.9791]	0.0242
kfold+MLP	0.9921	[0.9867–0.9964]	0.9637	[0.9488–0.9776]	0.0230
kfold+RF	0.9934	[0.9903–0.9962]	0.9540	[0.9311–0.9729]	**0.0169†**
kfold+SVM	0.9748	[0.9628–0.9850]	0.7009	[0.6431–0.7666]	0.0225

** Best value per column. † Best Brier score among meta-classifiers.*

This is attributed to the RBF SVM decision function being poorly calibrated on the saturated, near-binary probability features that dominate the 10-dimensional input space, where XGBoost's tree-based non-linear partitions are more appropriate. The narrow CI for XGB (width 0.0034) provides strong statistical evidence that its AUC superiority is not attributable to sampling variation.

D. Confusion Matrices for Best-Recall and Best-Precision Configurations

Tables IV and V present confusion matrices for the MLP meta-classifier at τ = 0.215 (maximizing recall) and the RF meta-classifier at τ = 0.5 (maximizing precision/F1), respectively. The MLP configuration reduces false negatives to 5, meaning that only 5 genuine exoplanet candidates in the 2,516-sample test set are incorrectly classified as non-candidates, a critical operational requirement for science completeness. At the cost of 89 false positives (signals incorrectly flagged for follow-up), this configuration is appropriate for discovery pipelines where human follow-up can filter false positives. The RF configuration at τ = 0.5 achieves only 32 false positives, 38.5% fewer than the v2 vote baseline (51 FP), at the cost of 23 false negatives, suitable for resource-constrained follow-up programs.

TABLE IV. Confusion Matrix - kfold+MLP @τ=0.215 (Best Recall)

	Pred: Positive	Pred: Negative
Act: Positive	TP = 245	FN = 5
Act: Negative	FP = 89	TN = 2177

TABLE V. Confusion Matrix - kfold+RF @τ=0.50 (Best F1 & Precision)

	Pred: Positive	Pred: Negative
Act: Positive	TP = 227	FN = 23
Act: Negative	FP = 32	TN = 2234

E. Threshold Analysis

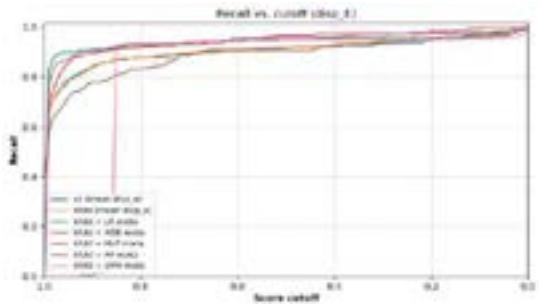


Fig. 11. Recall as a function of classification threshold for this work (k-fold+meta) vs. Astronet-Triage and Astronet-Triage-v2 baselines.

The recall vs. cutoff curves confirms the systematic advantage of stacking across the full threshold range. At the operational cutoff $\tau = 0.215$, MLP achieves the highest recall (0.980), followed closely by XGB and kfold vote. The RF curve maintains competitive recall across all thresholds while delivering the best precision at $\tau = 0.5$. The SVM curve shows an abrupt instability near cutoff 0.8, consistent with its poor probability calibration, before recovering at lower thresholds. All meta-classifiers except SVM match or exceed both voting baselines across the majority of the operating range, confirming that stacking preserves recall without sacrificing it to threshold sensitivity.

VIII. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

This work demonstrates that stacking meta-classifiers on AstroNet-Triage-v2 CNN ensemble outputs consistently outperforms threshold-voting. The RF meta-classifier achieves the best overall F1 (0.892) and precision (0.876 at $\tau = 0.5$), reducing false positives by 38.5%; MLP achieves the highest recall (0.980 at $\tau = 0.215$), reducing missed exoplanets by 44.4%; and XGB attains AUC = 0.9957 (statistically indistinguishable from the ensemble ceiling) confirming that the meta layer preserves base ranking quality while adding discrimination at the operating threshold. The stacking framework integrates naturally with the existing QLP pipeline (< 1 ms/prediction latency), is telescope-agnostic, and was validated in real-time through the NASA Space Apps Challenge 2025 web deployment, achieving top-45 recognition from over 11,500 submissions [17].

The principal limitations are: (1) dependence on QLP preprocessing, limiting portability to instruments with different cadence or detrending strategies; (2) the SVM meta-classifier underperforms significantly (AP = 0.701), indicating not all classifier families suit this feature space; and (3) the framework does not yet leverage uncertainty quantification methods such as Monte Carlo dropout or conformal prediction.

Future directions include hybrid CNN-RNN architectures for long-range temporal dependencies, attention mechanisms for transit-phase weighting, physically-motivated meta-features (BLS fit quality, secondary eclipse depth ratios, centroid shift statistics), active learning targeting TCEs in the N–B UMAP boundary region, and multi-label meta-classification optimizing all five class recalls simultaneously. The methodology is also transferable to other imbalanced time-series domains, including medical ECG anomaly detection and industrial fault monitoring.

REFERENCES

[1] C. J. Shallue and A. Vanderburg, "Identifying Exoplanets with Deep Learning: A Five-planet Resonant Chain around Kepler-80 and an Eighth Planet around Kepler-90," Astron. J., vol. 155, no. 2, p. 94, Feb. 2018, doi: 10.3847/1538-3881/aa9e09.

[2] L. Yu, A. Vanderburg, C. Huang, C. J. Shallue et al., "Identifying Exoplanets with Deep Learning III: Automated Triage and Vetting of TESS Candidates," Astrophys. J., vol. 895, p. 109, May 2019, doi: 10.3847/1538-4357/ab89f2.

[3] E. Tey, D. Moldovan, M. Kunimoto, C. X. Huang, A. Shporer, T. Daylan, D. Muthukrishna, and A. Vanderburg, "Identifying Exoplanets with Deep Learning. V. Improved Light Curve Classification for TESS Full Frame Image Observations," arXiv:2301.04291 [astro-ph.EP], Jan. 2023.

[4] C. X. Huang, A. Vanderburg, A. Pál, L. Sha, L. Yu, W. Fong, M. Fausnaugh, A. Shporer, N. Guerrero, R. Vanderspek, and G. Ricker, "Photometry of 10 Million Stars from the First Two Years of TESS Full Frame Images," Res. Notes AAS, vol. 4, no. 11, p. 204, Nov. 2020, doi: 10.3847/2515-5172/abf61e.

[5] K. Pearson, C. Palafox, and C. Griffith, "Searching for TESS Photometric Observations of Known Transiting Exoplanets Using Neural Networks," Mon. Notices Royal Astron. Soc., vol. 474, no. 1, pp. 478–491, 2018, doi: 10.1093/mnras/stx2761.

[6] M. Ansdell, Y. Ioannou, H. R. A. Osborn, A. Sasdelli, J. C. Smith, D. Caldwell, J. M. Jenkins, C. Räisänen, S. Gal-Yam, T. Should, and S. Aigrain, "Scientific Domain Knowledge Improves Exoplanet Transit Classification with Deep Learning," Astrophys. J., vol. 869, no. 1, p. L7, Dec. 2018, doi: 10.3847/2041-8213/aaf23b.

[7] L. McInnes, J. Healy, and J. Melville, "UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction," arXiv:1802.03426v3 [stat.ML], Sep. 2020.

[8] M. D. Zeiler and R. Fergus, "Visualizing and Understanding Convolutional Networks," in Proc. Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV), Zurich, Switzerland, Sep. 2014, pp. 818–833, doi: 10.1007/978-3-319-10590-1_53.

[9] S. Mallat, "Understanding Deep Convolutional Networks," Philos. Trans. Royal Soc. A, vol. 374, no. 2065, p. 20150203, 2016, doi: 10.1098/rsta.2015.0203.

[10] D. H. Wolpert, "Stacked Generalization," Neural Netw., vol. 5, no. 2, pp. 241–259, 1992, doi: 10.1016/S0893-6080(05)80023-1.

[11] O. Sagi and L. Rokach, "Ensemble Learning: A Survey," Wiley Interdiscip. Rev. Data Min. Knowl. Discov., vol. 8, no. 4, p. e1249, Jul. 2018, doi: 10.1002/widm.1249.

[12] G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek et al., "Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)," J. Astron. Telesc. Instrum. Syst., vol. 1, no. 1, p. 014003, Jan. 2015, doi: 10.1117/1.JATIS.1.1.014003.

[13] W. J. Borucki, D. Koch, G. Basri et al., "Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results," Science, vol. 327, no. 5968, pp. 977–980, Feb. 2010, doi: 10.1126/science.1185402.

[14] T. Chen and C. Guestrin, "XGBoost: A Scalable Tree Boosting System," in Proc. 22nd ACM SIGKDD Int. Conf. Knowl. Discov. Data Min., San Francisco, CA, USA, Aug. 2016, pp. 785–794, doi: 10.1145/2939672.2939785.

[15] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort et al., "Scikit-learn: Machine Learning in Python," J. Mach. Learn. Res., vol. 12, pp. 2825–2830, 2011.

[16] L. Breiman, "Random Forests," Mach. Learn., vol. 45, no. 1, pp. 5–32, Oct. 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324.

[17] A. D. Sánchez Méndez, D. F. Martínez Hernández, and J. A. Pinzón Vega, *Exoplanet Hunter AI – Frontend*, GitHub repository. NASA International Space Apps Challenge 2025. [Online]. Available: https://github.com/JAPV-X2612/ECI-Centauri-Frontend. Accessed: Oct. 5, 2025.

[18] H. Valizadegan, M. Martinho, L. S. Wilkens et al., "ExoMiner: A Highly Accurate and Explainable Deep Learning Classifier to Mine Exoplanets," Astrophys. J., vol. 926, no. 2, p. 120, Feb. 2022, doi: 10.3847/1538-4357/ac4399.

Towards a Digital Gap Observatory: Research Advances from Case Studies to National Deployment in Colombia

Constanza Alvarado
Research Profesor School of Systems
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central - ETITC
Bogotá, Colombia
dcalvaradom@etitc.edu.co

Philippe Aniorte
Director
National Institute for Advanced Research in ICT
INDICATIC AIP
Panamá, Panamá
paniorte@indicatic.org.pa

Laurent Gallon
Associated Professor
Université de Pau et de Pays de L'Adour - UPPA
Mont de Marsan, France
gallon@univ-pau.fr

Camilo Navarro
Research Professor
Escuela Colombiana de Ingenieria
Bogotá, Colombia
camilo.navarro@escuelaing.edu.co

Catalina Ramirez
Research Professor
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
mariaram@uniandes.edu.co

Ricardo González
Research Professor
Universidad Jorge Tadeo Lozano
Bogotá, Colombia
ricardohgonzalez@utadeo.edu.co

Nubia M Garzon B.
Associated professor
Universidad Pontificia Bolivariana
Montería, Colombia
nubia.garzongb@upb.edu.co

Arellys Correa
Research Professor
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Bogotá, Colombia
arellys.correa@unad.edu.co

Nury Escobar
School of Systems
Escuela Tecnológica InstitutoTécnico Central - ETITC
Bogotá, Colombia
sistemas@etitc.edu.co

***Abstract*— Since 2022, a research initiative in Colombia has progressively developed a conceptual and methodological framework to observe the Digital Gap (DG) in the contexts of education, employability, and citizenship. This work presents advances derived from a series of field-based case studies initially conducted in educational institutions in Bogotá and later expanded to other educational and organizational environments. The objective is to understand the social, technological, and educational factors associated with digital inequalities in contexts of digital transition and Education 4.0, building a Digital Gap Observatory**

Keywords*— *Digital Gap, Digital Inclusion, Education 4.0, Digital Gap Observation, Digital Gap Factors

I. Introduction

Digital transformation has accelerated across societies, reshaping how individuals learn, work, and participate in civic life. However, this transformation has also intensified existing inequalities, giving rise to what is widely referred to as the **Digital Gap (DG)** a multidimensional phenomenon that extends beyond access to technology to include disparities in skills, usage, and meaningful participation. In the context of **Education 4.0**, where digital technologies, artificial intelligence, and data-driven systems redefine educational and professional environments [3], understanding and addressing the DG becomes a critical challenge for both research and public policy. In Colombia, as in many emerging economies, the Digital Gap manifests unevenly across territories, educational systems, and socio-economic groups. While national strategies have made progress in expanding connectivity, significant challenges remain in ensuring equitable digital competencies, cybersecurity awareness, and the capacity to engage effectively in digital ecosystems. These challenges highlight the need for robust, evidence-based frameworks capable of observing, analyzing, and ultimately reducing digital inequalities in context-sensitive ways. For instance, recent national statistics indicate that while internet penetration exceeds **70% in urban areas**, it remains below **40% in rural regions**, reflecting a significant territorial divide. Moreover, beyond access, gaps in digital skills remain critical: studies suggest that less than **50% of the population demonstrates basic digital competencies**, particularly in areas such as information management, cybersecurity awareness, and productive use of digital tools [6].

These asymmetries underscore that connectivity alone is insufficient and that deeper dimensions of the DG must be systematically observed and addressed

Since 2022, a research initiative led by Alvarado in collaboration with Philippe Aniorté has focused on developing a conceptual and methodological framework for observing the DG in Colombia. The theoretical framework has been strengthened through two main pillars: (1) a systematic literature review that identified a set of factors associated with the DG, organized into an analytical matrix structured into subcategories, categories, and dimensions [1][2] and (2) the incorporation of contributions from doctoral research conducted in France, particularly the work on Education 4.0 by Samia Bachir ([3] and the doctoral research of Timothée Duron ([4][5] in his thesis "Modélisation et détection de la persévérance en milieu scolaire en contexte informatique", which focuses on the observation and analysis of persistence in digital learning environments. Both works were conducted under the supervision of Philippe Aniorté and Laurent Gallon at the Laboratoire d'Informatique de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (LIUPPA). This research draws on the theoretical framework proposed by Duron, known as the TIM method, to support the design of observation and analysis instruments for studying the DG in field-based case studies. Empirically, the research began in public district schools in Bogotá and was later extended to public and private educational institutions. These studies have enabled the refinement of observation instruments to characterize the DG in contexts involving students, citizens, and employees.

The goal of this research lies in its transition from localized case studies to the design of a scalable **Digital Gap Observatory**, conceived as a knowledge infrastructure to support decision-making in education, employability, and digital citizenship. Through international collaboration involving INDICATIC AIP (Panama), LIUPPA (France), and Colombian academic and social organizations, the framework has evolved toward a multi-level approach that combines theoretical modeling, empirical observation, and action-oriented interventions in digital literacy.

This paper presents recent advances in this research trajectory, focusing on the progression from case-based evidence to national-level deployment strategies. Specifically, it addresses the following research question: *How can a conceptual and methodological framework for observing the Digital Gap be scaled to support territorial deployment and inform public policy in Colombia?*

This article is structured in three parts. The first presents the conceptual framework for observing the DG, based on a factor matrix, the adaptation of the TIM method, and the observation instruments designed for field-based case studies. The following two sections describe new case studies that act as drivers for national deployment in Colombia, extending beyond the development of a national Digital Gap Observatory. The second section presents a scaling phase carried out with the Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), a public university with nationwide presence. The third section introduces a project aimed at implementing a regional node of the observatory in the Caribbean region, led by Universidad Pontificia Bolivariana, Montería campus. In the context of Education 4.0, this evolution highlights the potential of engineering education research to build territorial knowledge infrastructures capable of guiding public policies and actions for digital inclusion.

II. CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR OBSERVING THE DG

The conceptual framework proposed in this research is designed to enable a systematic, multidimensional observation of the Digital Gap (DG), integrating both structural and behavioral dimensions [1]. It is grounded in two complementary components: (1) a Digital Gap factor matrix, derived from a systematic literature review, and (2) the adaptation of the TIM method [4] to support the modeling and analysis of digital practices in context [1].

As shown in Fig. 1, the framework is operationalized through an integrated layered architecture that connects theoretical constructs with data-driven analysis and intervention mechanisms.



fig. 1. Conceptual and methodological framework for observing the Digital Gap (DG): integration of the multi-level factor matrix (>270 factors) and the adapted TIM method [1][2][7]

A. *Factors Matrix*

The first pillar of the framework is a structured **factor matrix** that organizes the DG into a hierarchical analytical model composed of **dimensions, categories, and subcategories**. This matrix is the result of an extensive systematic literature review conducted between 2022 and 2024 [1][7] and results of fieldwork, synthesizing contributions from research on digital inclusion, digital competencies, and socio-technical inequalities.

DG factor matrix is structured as a hierarchical model that organizes dimensions, categories, subcategories, and a detailed level of more than 270 factors, enabling a fine-grained characterization of digital inequalities. The structure of this matrix is illustrated in Fig. 2.



fig. 2. Digital Gap Factor Matrix (>270 factors). The matrix is organized in four hierarchical levels: (1) dimensions. (2) categories. (3) subcategories. And (4) factors. It enables a granular and multidimensional observation of the Digital Gap across access, use, and appropriation [1][2][7]

At the highest level, the framework conceptualizes the Digital Gap across three primary dimensions:

1) Access Dimension: Refers to the availability and quality of technological infrastructure, including connectivity, devices, and technical conditions for digital engagement.

2) Use Dimension: Encompasses the ways individuals interact with digital technologies, including frequency, diversity, and purpose of use across educational, professional, and civic contexts.

3) Appropriation Dimension: Addresses higher-order capabilities, such as critical thinking, content creation, cybersecurity awareness, and the capacity to leverage digital tools for meaningful participation and problem-solving.

Each dimension is further decomposed into categories (e.g., connectivity conditions, digital skills, learning practices) and subcategories (e.g., bandwidth stability, information literacy, collaborative tool usage), enabling a **granular characterization of digital inequalities** [8]. This structure allows for the identification of not only whether a gap exists, but also **where and how it manifests within specific populations and contexts**.

Importantly, the matrix moves beyond traditional binary notions of inclusion/exclusion by capturing **progressive levels of digital engagement**, aligning with the principles of Education 4.0 and lifelong learning [11]12][13].

B. *Adaptation of the TIM Method*

The second pillar of the framework is the adaptation of the **TIM method**, developed in the doctoral research, originally designed to model and detect student persistence in digital learning environments, the TIM method [4] provides a robust approach for analyzing behavioral patterns through data-driven observation [9].

In this research, the TIM method is extended to the study of the DG by:

1) Recontextualizing observation variables to align with the DG factor matrix (e.g., mapping user behaviors to dimensions such as access, use, and appropriation)

2) Designing observation instruments that capture both self-reported data (surveys) and behavioral indicators (interaction patterns, tool usage)

3) Enabling temporal analysis, allowing the identification of trajectories of digital engagement and potential risk factors associated with exclusion or low participation.

This adaptation transforms the TIM method [4] into a **diagnostic and analytical tool** capable of linking observed behaviors with underlying structural conditions, thus bridging the gap between quantitative measurement and contextual interpretation.

C. *Observation Instruments Designed for field-based Case Studies*

The observation of DG requires the systematic deployment of data collection resources and instruments that enable the capture of both structural conditions and behavioral patterns across diverse contexts. In this study, these resources are understood as a combination of tools, mechanisms, and data sources designed to support the observation process in educational and organizational environments. Depending on the characteristics of each field-based study, these instruments may be specifically designed and adapted to the context or selected and integrated from pre-existing applications and systems that provide relevant data for DG observation.

The proposed framework integrates multiple types of observation instruments, combining manual and automated data collection approaches. These instruments are designed to be adaptable to different field contexts and aligned with the Digital Gap factor matrix and the adapted TIM method. Data are collected throughout learning or work activities, enabling continuous and contextualized observation. Observation instruments including

1) Structured surveys, aligned with DG dimensions, categories, subcategories, and factors, designed to collect data on specific variables and conditions associated with digital access, use, and appropriation. The items included in these surveys are explicitly mapped to elements of the factor matrix, enabling the systematic linkage between collected data and the analytical structure of the DG.

2) Digital forms and questionnaires, used to complement survey data by capturing additional variables, contextual information, and demographic characteristics. These instruments are designed to ensure that collected data can be directly associated with subcategories, categories, dimensions, and factors within the matrix, supporting consistency and traceability in the analysis.

3) Digital educational resources and learning environments, which function as embedded observation systems by capturing user interaction data during learning activities. These data provide indirect measurements of variables associated with DG factors, particularly in relation to usage patterns and levels of appropriation.

4) Observation protocols, designed for educational and organizational settings, enabling qualitative and contextual data collection aligned with DG dimensions and factors.

5) Data acquisition mechanisms from institutional information systems, allowing the integration of existing datasets and logs generated by digital platforms, which are mapped to relevant DG variables and factors.

These instruments enable the collection of heterogeneous data, including self-reported, observational, and system-generated data, all of which are structured to ensure their alignment with the hierarchical organization of the DG factor matrix.

The analytical process is structured as a multi-level approach:

1) Descriptive analysis, aimed at characterizing DG factors across populations and contexts.

2) Relational analysis, examining correlations between dimensions (e.g., access, use, and appropriation).

3) Pattern detection, supported by the adapted TIM method, to identify profiles of digital engagement and behavioral trajectories.

This integrated approach enables the generation of evidence-based and actionable insights, supporting both localized interventions (e.g., digital literacy programs) and strategic decision-making processes related to digital inclusion policies. Furthermore, the flexibility of the instruments allows their deployment across diverse field-based contexts, reinforcing the scalability of the Digital Gap Observatory framework.

To ensure methodological consistency between data collection and analysis, the proposed framework establishes a traceability model linking collected variables to the hierarchical structure of the DG factor matrix. This relationship is illustrated in Fig. 3.

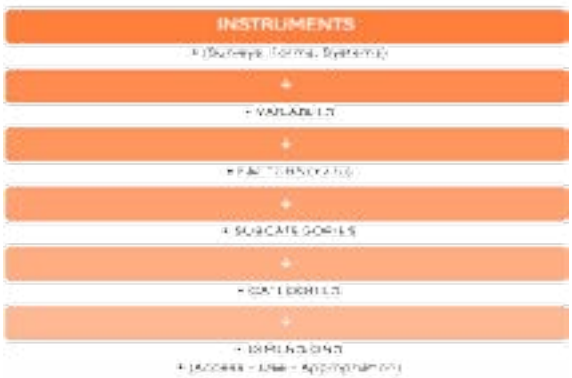


fig. 3 Traceability model from data collection variables to Digital Gap dimensions through factors, subcategories, and categories. Source. Authors

As shown in fig. 3, data collected through observation instruments are transformed into variables that are systematically mapped to factors, which are then aggregated into subcategories, categories, and dimensions, enabling a structured and scalable analysis of the DG.

D. From Conceptual Framework to Observatory Design

The ultimate contribution of this conceptual framework lies in its role as the foundation for the **Digital Gap Observatory**. By combining a theoretically grounded factor matrix with a behavior-oriented analytical method, the framework supports the creation of a **scalable and interoperable system** for monitoring digital inequalities across territories, sectors and various contexts.

This approach aligns with emerging perspectives in Education 4.0, where data-informed decision-making and adaptive learning ecosystems require robust infrastructures for continuous observation and analysis. In this sense, the proposed framework not only advances research on the Digital Gap but also contributes to the development of **territorial knowledge infrastructures** capable of informing public policy and fostering digital inclusion.

III. Case Study UNAD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) represents a strategic context for evaluating the scalability of the proposed Digital Gap (DG) observational framework. As a public higher education due to its public, open, distance, and virtual nature. UNAD is territorially organized into eight regions: Amazonia and Orinoquia (ZAO), Caribbean (ZCAR), Bogotá-Cundinamarca (ZCBC), Boyacá (ZCBOY), Oriente (ZCORI), Centro Sur (ZCSU), Occidente (ZOCC), and Sur (ZSUR) in Colombia.

A. Case Study Presentation

Tterritorial structure enables the inclusion of a diverse student population distributed across urban, peri-urban, and rural areas, characterized by heterogeneous conditions in connectivity, technological infrastructure, device access, socio-economic background, and prior digital experience.

The objective of this case study is to analyze DG among first-time enrolled students by identifying and characterizing associated factors, contributing to digital inclusion and educational innovation strategies.

The study adopts a descriptive, contextual, and analytical approach, conceptualizing the Digital Gap as a multidimensional phenomenon. It is grounded in key frameworks, including:

- Digital competence frameworks such as DigComp [11][12].
- International guidelines on digital inclusion (e.g., UNESCO)
- Global skills frameworks (e.g., SFIA)
- Prior research on DG multidimensional análisis [1].

Additionally, the analysis is aligned with the **MHUS 5.0 pedagogical model**, which conceptualizes learning as autonomous, collaborative, situated, and technology mediated. From this perspective, DG is examined in

relation to students' ability to effectively participate in virtual learning environments. Based on this framework, the study is guided by significant relationship between DG dimensions and the academic participation of first-time enrolled students in virtual learning environments.

B. Population

The study population consists of **first-time enrolled undergraduate students** at UNAD, distributed across its national network of academic centers (CEAD, CCAV, and UDR) particularly relevant as students are in the **initial stage of integration into the institutional digital ecosystem**, where factors such as *access to devices, internet connectivity, availability of electricity, access to digital educational resources, digital competences (skills)* may significantly influence their adaptation, participation, academic performance, and retention.

A **non-probabilistic convenience sampling strategy** is adopted, including students who are actively enrolled, reachable through institutional channels, and voluntarily agree to participate. This approach is justified by the nationwide distribution of students, virtual and distance learning modality, feasibility of digital data collection.

C. Determinating the Factors

Central variable study is the ***Digital Gap*** operationalized based on the multidimensional framework proposed [] which defines eight key dimensions: Technological infrastructure; Educational resources; Digital skills and literacy; Technological knowledge and competencies; Socio-economic conditions; STEM education approach; Participation and equitable access; Gender equity in STEM.

These dimensions enable a comprehensive analysis DG extending beyond access to include educational, social, and participation-related factors influencing the use and appropriation of digital technologies. The variables are operationalized through ***observable and measurable indicators***, structured across dimensions, categories, and subcategories. This structure supports systematic observation and analysis across educational contexts.

D. Resources Envolved

The study adopts a mixed-methods approach, integrating quantitative and qualitative data collection aligned with the DG factor matrix and the adapted TIM.

1) Data Collection Instruments. Three main instruments were deployed:

a) Structured Survey and forms Designed based on the DG factor matrix, capturing variables across access, use, and appropriation dimensions. Those are currently undergoing expert validation. Once validated those will be applied digitally to the selected population.

b) Digital Interaction Data (when available) Logs and indicators related to the use of formularios, encuestas… (e.g., frequency of access, tool usage patterns).

c) Contextual Observation Protocols: Qualitative inputs from institutional stakeholders (e.g., tutors, coordinators) to contextualize findings.

2) Analytical Approach. The analysis was conducted in three stages:

a) Descriptive Analysis: (distribution) of DG factors across dimensions

b) Relational Analysis: identification of correlations between access, use, and appropriation

c) Pattern Detection: application of the adapted TIM method to identify behavioral profiles and trajectories of digital engagement

The study is designed to generate **actionable insights** for institutional decision-making, supporting strategies related to digital inclusion, student support, accessibility, and retention.

IV. CARIBBEAN REGIONAL NODE CASE STUDY

Territorial implementation project will take place in the coastal municipality of San Antero, in the department of Córdoba, a strategic area of the Colombian Caribbean with a history of lagging connectivity, limited access to education, and the impacts of the armed conflict. In 2022, the gross enrollment rate in higher education in the department was 27.30%, well below the national average of 54.92%. This underscores the need to continue strengthening policies that promote digital and educational inclusion in municipalities like San Antero [21]. The intervention will be carried out in seven schools in the municipality, directly impacting elementary and secondary students, teachers, and administrators, and indirectly impacting families, through the application of the TIM (Trajectoires, Interactions, Milieux) method to diagnose DG in real-world school settings. The area of influence includes both the urban center and rural districts such as El Porvenir, based on previous efforts led by the Ministry of Information and Communication Technologies and the Government of Córdoba. In addition to the above, the project aims to incorporate and transfer the methods that have been developed within the country by researchers from various Higher Education Institutions, and to integrate the provincial government—in this case, the Pontifical Bolivarian University, Montería branch, as an institution with knowledge of the region—local authorities, and the school community as key stakeholders in evidence-based decision-making.

Following the validation DG observational framework in large-scale educational contexts, the next phase of the research focuses on its **territorial deployment** through the establishment of regional nodes. The Caribbean region of Colombia was selected as a priority area due to its **persistent socio-economic inequalities**, diverse educational ecosystems, and strategic importance for national development.

This initiative is led by the Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Montería campus, in collaboration with national and international partners, in collaboration with educational institutions, local authorities, and community organizations to define priorities and ensure contextual relevance. The regional node is conceived as a **localized implementation of the Digital Gap Observatory**, designed to generate context-sensitive data while contributing to a broader national knowledge infrastructure.

The objective of this phase is to **operationalize the observatory at the territorial level**, integrating research, education, and community engagement to address digital inequalities in a systemic manner.

A. Case Study Presentation

The objective of this phase is to **operationalize the observatory at the territorial level**, integrating research, education, and community engagement to address digital inequalities in a systemic manner.

The Caribbean regional node demonstrates that the Digital Gap Observatory can function as a **territorial knowledge infrastructure**, integrating:

- **Data generation** (through observation instruments)
- **Knowledge production** (through analysis and research)
- **Action mechanisms** (through digital literacy and intervention programs)

This approach aligns with the principles of Education 4.0, emphasizing **context-aware, data-informed, and adaptive systems**.

Moreover, the regional deployment highlights the importance of:

- **Decentralized implementation**, allowing adaptation to local conditions
- **Institutional collaboration**, bridging academia, government, and civil society
- **Scalability through modular design**, enabling replication in other regions

The experience of the Caribbean node provides key insights for scaling the Digital Gap Observatory at the national level:

- The framework supports **multi-level governance**, from local interventions to national strategies
- It enables the identification of **priority areas for investment**, particularly in skills development
- It contributes to the design of **evidence-based public policies** for digital inclusion

By linking local data with national objectives, the observatory can serve as a **strategic tool for reducing digital inequalities in Colombia**, supporting inclusive development in the context of digital transformation.

B. Population

The expected social impact focuses on benefiting hundreds of students in the municipal education system by identifying critical barriers related to (i) connectivity, (ii) digital literacy, (iii) access to devices, (iv) technological skills, and (v) the pedagogical use of ICTs. The project will contribute to improving opportunities for school retention, future access to higher education, youth employability, and social inclusion in historically disadvantaged areas. Its transferability lies in the fact that it constitutes a pilot project replicable in other geographic areas of the Colombian Caribbean and coastal regions with similar conditions of digital vulnerability. It serves as a precedent on the Colombian Caribbean coast for observing the digital divide and can be extended to other regions of the Colombian Caribbeam.

C. Determinating Factors

While the conceptual framework and instruments remain consistent, their deployment in the Caribbean region required contextual adaptation to reflect local realities. This includes:

1) Cultural and socio-economic considerations, particularly in underserved communities

2) Diverse institutional settings, including schools, universities, and community organizations

3) Variability in infrastructure and connectivity conditions

The DG factor matrix was used as a **baseline structure**, while specific indicators were adjusted to capture regionally relevant dimensions such as:

a) Access in low-connectivity environments

b) Use of mobile-first technologies

c) Community-based digital practices

The adapted TIM was employed to analyze behavioral patterns, enabling the identification of **local digital engagement profiles** and potential risk factors. The quantitative-qualitative methodology, based on 270 previously identified factors, offers a scalable model for departmental governments, education secretariats, universities, and public institutions interested in designing policies to close the digital divide with a territorial focus, making San Antero a regional benchmark for educational innovation and digital inclusion. Likewise, the project seeks to adapt previous experiences to the specific needs of the Caribbean region, through innovative and sustainable solutions in accordance with its sociocultural, environmental, and economic conditions. It also aims to offer consultation tools to territorial entities to strengthen decision-making in inclusive digital transformation, guaranteeing young people access to ICTs, skills development, and technological appropriation to promote knowledge diversification and new development opportunities.

Similarly, it incorporates an environmental sustainability approach aimed at raising awareness about waste management, facilitating access to information on climate change and community resilience, promoting the conservation of coastal natural resources, fostering responsibility regarding the digital ecological footprint, and reducing inequality gaps. All of this

will serve as a foundation for future projects that prioritize sustainable and low-impact technological infrastructure

D. Resources Envolved

(resources) to be used: Questionnaires (surveys), forms. If automatic monitoring is used, please indicate this one. Before and after. Monitoring system, evaluations, courses …

1) Instrument Deployment, Application of surveys, observation protocols, and data collection mechanisms across selected pilot sites.

2) Capacity Building Actions, Development of digital literacy initiatives focused on:

3) Digital citizenship

4) Cybersecurity awareness , AI (issues). Secretaria Innovacion Ciencia y tecnología . Public policy…

5) Data Analysis and Feedback Loops Continuous analysis of collected data to inform local interventions and refine the observational model.

This approach ensures that the observatory is not only a **data collection system**, but also an **action-oriented platform** for digital inclusion

CONCLUSION AND FUTURE WORK

This paper presents a progression from **conceptual development and localized case studies to the scalable deployment of a Digital Gap (DG) Observatory in Colombia**, addressing digital inequality as a multidimensional and context-dependent phenomenon within Education 4.0.

The main contribution is a **conceptual and methodological framework** that integrates a multi-level factor matrix (including more than 270 factors) with the adaptation of the TIM method. This integration enables a shift from static indicators to **behavioral and dynamic analysis of digital engagement**, providing a more precise understanding of digital inequalities.

The framework's **scalability and applicability** are validated through its implementation in UNAD and its territorial deployment in the Caribbean region, led by Universidad Pontificia Bolivariana. These cases demonstrate its capacity to support **multi-level decision-making**, from institutional strategies to regional and national policy.

This work positions the Digital Gap Observatory as a **strategic infrastructure for engineering education**, enabling institutions to move toward **data-informed, scalable, and inclusive digital transformation**. In the context of WEEF–GEDC, it highlights the role of engineering education in addressing structural inequalities through evidence-based approaches.

Future work will focus on **longitudinal data integration, advanced analytics and AI, and institutional interoperability**, as well as extending the observatory to employability and lifelong learning contexts.

In conclusion, the proposed framework provides a **robust, scalable, and transferable foundation** for advancing digital inclusion, reinforcing the role of engineering education as a key actor in building equitable digital futures.

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge institutional and academic support contributing to this research specially o the public and private schools in Colombia, as well as to the universities visited during the fieldwork specially Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central and the Universidad de los Andes. Finally, in Panama, thanks to INDICATIC AIP; in France, Université de Pau et de Pays de L'Adour UPPA and its research laboratory Laboratoire d'Informatique. LIUPPA.

REFERENCES

[1] C. Alvarado, P. Aniorte, R. Gonzalez, " Using computer systems in various environments: a framework to observe social factors associated to Digital Gap. En Proceedings of the 2025 8th International Conference on Systems Engineering-Cybersecurity & AI: Building a reliable digital future. 2025. p. 1-7

[2] C. Alvarado, P. Aniorte, M.C. Ramírez, "Digital inclusion, a key element towards digital transformation: STEM perspectives. In A. Lázaro-Ibáñez, M. R. G. Pacheco, A. Idiakez-de-la-Fuente, & M. G. Prieto. (Eds.), Exploring intersectionality and women in STEM: A global perspective (pp. 169–191). IGI Global. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-1119-6.ch009

[3] S. Bachir. *Towards University 4.0: A model-driven-engineering method to design educational cyber physical systems* (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour), 2022.

[4] T. Duron, « Modèlisation et détection de la persévérance en milieu scolaire en contexte informatique ». Diss. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2022.

[5] T Duron, T., Gallon, L., & Aniorte, P. « Modelling learner's perseverance in education software". In Information Systems Education Conference (ISECON 2019). 2019.

[6] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), "Indicadores básicos de tenencia y uso de tecnologías de la información y las comunicaciones en hogares," Bogotá, Colombia, 2023.

[7] C. Alvarado, P. Aniorté, "Identification de facteurs humains associés à la fracture numérique » [Paper presentation]. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH 2023), Brest, France. https://hal.science/hal-04312879. 2023, June 13–16.

[8] P. Plantard, "La fracture numérique," 2021. Plantard, P. (2021). La fracture numérique : mythe ou réalité ? Éducation permanente, 226(1), 99-110.</bib>

[9] H. Galperín, "Sociedad digital," UNESCO, 2017

[10] Alvarado, C., Aniorte, P., & Maestre, G. (2025). Observación de la brecha digital en las organizaciones en el marco de la transición digital: Enfoque en la empleabilidad y la gobernanza de datos. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería: Ingeniería de impacto para cuidar y transformar la vida*. https://doi.org/10.26507/paper.4389

[11] European Commission, DigComp 2.2, 2022

[12] European Comission, DigComp 3.0, 2025

[13] OECD, "Bridging the Digital Divide," 2021

[14] Y. Tadimalla and M. L. Maher, "AI Literacy for All: Adjustable Interdisciplinary
Socio-technical Curriculum," in Proc. IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), 2024

[15] E. Trist, "The evolution of socio-technical systems," 1981.

[16] Moldovan, D., Copil, G., & Dustdar, S.. Elastic systems: Towards cyber-physical ecosystems of people, processes, and things. *Computer Standards & Interfaces*, *57*, 76-82. 2018.

[17] World Economic Forum, “The Future of Jobs,” 2023.
[18] GSMA, “Mobile Internet Connectivity Report,” 2023
[19] OECD, “AI and the Digital Divide,” 2022.
[20] UNESCO, “Ethics of Artificial Intelligence,” 2021.
[21] Gobernación de Córdoba. (2022). Aulas digitales, una apuesta del Gobernador Orlando Benítez Mora por cerrar brecha tecnológica en el departamento. https://www.cordoba.gov.co/
[22] Universidad Nacional Abierta y a Distancia . Resolución N. 004018 de 2012, por la cual se realiza la distribución geográfica de las zonas que conforman la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). 2012

Integración de Análisis de Sentimientos y Redes Neuronales Artificiales para el Pronóstico del Comportamiento en los Índices S&P 500 y Dow Jones

Danna V. Muñoz
Facultad de Ing, Industrial
Universidad Antonio Nariño
Colombia, Bogotá D.C
dmunoz03@uan.edu.co

Liza F. Ruiz
Facultad de Ing, Industrial
Universidad Antonio Nariño
Colombia, Bogotá D.C
Liruiz33@uan.edu.co

David S. Delgadillo
Facultad de Ing, Industrial
Universidad Antonio Nariño
Colombia, Bogotá D.C
ddelgadillo142@uan.edu.co

***Abstract* - La predicción del comportamiento de los mercados financieros continúa siendo un desafío significativo para inversionistas y analistas debido a la alta volatilidad y complejidad de las dinámicas del mercado. Los métodos tradicionales de análisis técnico se basan principalmente en datos históricos de precios, lo que limita su capacidad predictiva al no considerar factores conductuales e informativos que también influyen en los movimientos del mercado. El presente estudio propone un modelo predictivo basado en redes neuronales recurrentes (RNN), específicamente mediante una arquitectura Long Short-Term Memory (LSTM), con el objetivo de mejorar la predicción de tendencias de mercado en los índices S&P 500 y Dow Jones. El modelo integra datos históricos de precios con indicadores de sentimiento y perfiles de comportamiento de inversionistas obtenidos mediante algoritmos de clustering. Adicionalmente, se realizó un análisis de sentimientos utilizando información extraída de un clúster de noticias denominado Ground News, aplicando técnicas de web scraping y procesamiento de lenguaje natural (NLP) para captar opiniones y tendencias informativas relacionadas con el mercado en tiempo casi real. El proceso metodológico incluyó la recopilación y pre procesamiento de datos, el análisis de sentimientos, el entrenamiento del modelo y la evaluación de su desempeño predictivo. Los resultados evidencian una mejora significativa en la capacidad de predicción en comparación con modelos tradicionales basados únicamente en datos históricos, logrando una reducción del 18% en el error de predicción. Asimismo, la integración del análisis de sentimientos permitió anticipar movimientos bruscos del mercado con una precisión del 87%. El sistema también incorpora un mecanismo de alerta temprana capaz de identificar posibles cambios relevantes en el mercado con hasta 48 horas de anticipación. El modelo propuesto constituye una herramienta valiosa para apoyar la toma de decisiones en los mercados financieros mediante la aplicación de técnicas avanzadas de aprendizaje automático y análisis de información del mercado.**

Palabras Clave — Índices bursátiles, Análisis de sentimientos, aprendizaje profundo, redes neuronales recurrentes, psicología del consumidor, procesamiento de lenguaje natural.

I. Introduccion

El pronóstico del comportamiento de los mercados bursátiles ha constituido un ámbito de interés en ascenso tanto en la esfera académica como en la aplicada, por su influencia directa en las decisiones de inversión y la estabilidad económica mundial. No obstante, la elevada volatilidad, su carácter no lineal y el impacto de diversos factores externos mantienen esta labor como un reto pendiente. Los enfoques convencionales, como el análisis técnico sustentado solo en precios pasados, han revelado limitaciones para abarcar la complejidad inherente al mercado.

Por ello, la integración de metodologías avanzadas, como el análisis de sentimientos derivado de fuentes de noticias y redes sociales, junto con la potencia de las redes neuronales artificiales, emerge como una aproximación prometedora para capturar la dinámica multifactorial y la subjetividad de los participantes del mercado [1]. Esta combinación metodológica busca mejorar la precisión predictiva al incorporar información cualitativa, como el sentimiento del mercado, junto con datos cuantitativos tradicionales [2].

La llegada de métodos de *machine learning* y, más recientemente, de *deep learning* en los últimos veinte años ha transformado el panorama de la previsión financiera. Según la investigación pionera de Torres [3] y de Hochreiter y Schmidhuber [4], las redes neuronales artificiales (ANN) pueden superar a estrategias de inversión pasivas como "comprar y mantener" en determinadas situaciones. Posteriormente, [5] confirmaron que las ANN *feedforward* alcanzaban niveles de precisión impresionantes en índices como el *SandP CNX Nifty*, aunque presentaban dificultades para detectar relaciones a largo plazo.

Para modelar secuencias y evitar el problema del gradiente que desaparece, Hochreiter y Schmidhuber [4] propusieron la arquitectura Long Short-Term Memory (LSTM), un desarrollo clave. Entre 1992 y 2015, Fischer y Krauss [5] aplicaron LSTM a las acciones del S&P 500. Ellos lograron un rendimiento diario del 0,46% y una relación de Sharpe de 5,8. Esto les permitió superar claramente a técnicas sin memoria, como la regresión logística o el bosque aleatorio. Siguiendo así, Ghosh et al. [6] utilizaron LSTM para prever el crecimiento de empresas en el mercado indio. Por su parte, en el estudio de Navipour et al. [7] compararon varios algoritmos en la bolsa de Teherán y concluyeron que LSTM tenía la mejor capacidad de ajuste.

Sin embargo, modelos más avanzados como las redes neuronales de memoria a largo plazo han demostrado una capacidad superior para modelar la naturaleza dinámica y volátil de los mercados, superando a menudo a otros enfoques de aprendizaje automático en la predicción de índices como el S&P 500 [3]

No obstante, los modelos puramente numéricos, incluso los LSTM, tienen una limitación importante: ignoran el contexto cualitativo que influye en los mercados. En este sentido, el

análisis de sentimiento ha surgido como un complemento esencial. Bollen, Mao y Zheng [8], demostraron que el "estado de ánimo" de Twitter podía predecir la dirección diaria del Dow Jones con una precisión del 86,7%. Makrehchi et al. [9] propusieron etiquetar tweets según eventos bursátiles significativos, mostrando que el sentimiento agregado tenía poder de predicción. combinaron LSTM con análisis de sentimiento de tweets en bancos de Estados Unidos y Europa, encontrando que los modelos que integran datos recientes y opiniones públicas son mejores que aquellos que solo utilizan series históricas. Esta integración de datos de sentimiento ha demostrado ser particularmente efectiva para capturar los factores subjetivos que afectan la confianza del inversor y, por ende, el movimiento de los precios en los mercados financieros.

La investigación ha evolucionado hacia fuentes de información más estructuradas. Con el análisis de noticias financieras y encontrando que el uso de nombres propios (Proper Nouns) mejoraba la predicción respecto al tradicional "bag of words" [10]. Schumaker y Cheng [11], propusieron un método de *deep learning* para predicción basada en eventos extraídos de noticias, logrando mejoras del 6% en el S&P 500. Donde extrajeron sentimiento del inversor a partir de contenido generado por usuarios en foros chinos como Eastmoney.com y lo combinaron con redes LSTM con atención (ALSTM). En el estudio de Ding et al. [12], por medio del desarrollo de un modelo híbrido con CNN para clasificar sentimientos ocultos en foros bursátiles.

A pesar de estos progresos, la mayoría de las investigaciones presenta dos deficiencias significativas. En primer lugar, el análisis de sentimientos generalmente se fundamenta en una sola fuente (Twitter, foros, noticias), sin aprovechar la variedad de puntos de vista ni implementar técnicas de agrupamiento para clasificar a los inversores según sus comportamientos. En segundo lugar, son pocos los modelos que incluyen sistemas de advertencia temprana capaces de predecir movimientos bruscos dentro de un marco temporal relevante (por ejemplo, 48 horas). Adicionalmente, Bustos y Quimbaya [13], indican en su revisión sistemática, que hay una carencia de comparaciones estandarizadas entre los modelos desarrollados y las métricas de error convencionales.

El teorema de aproximación universal, introducido por Hornik et al. [14], confirman que las redes neuronales feedforward son capaces de modelar cualquier función continua; no obstante, las LSTM ofrecen el beneficio adicional de una memoria selectiva. Investigaciones como las de Mizuno et al. [15], así como el trabajo de Desai, [16] ya empleaban redes neuronales en análisis técnico, logrando un 59,84% de rendimiento en un mercado en descenso. En 2009, Lin y Yu [17], realizaron una comparación entre redes neuronales artificiales y la técnica de comprar y mantener en el S&P 500 y en el índice de Taiwán, encontrando que las redes encontraban un mejor performance. Sin embargo, estos estudios no consideraron elementos de sentimiento y perfiles de comportamiento.

El estudio propone un modelo predictivo que combina una arquitectura LSTM para captar dependencias temporales en índices como S&P 500 y Dow Jones, junto con clustering de inversores para identificar perfiles de comportamiento. Además, incorpora análisis de sentimiento a partir de múltiples fuentes de noticias (*Ground News*) mediante NLP, mejorando la calidad de la información frente a enfoques tradicionales. Como resultado, el modelo logra anticipar movimientos bruscos del mercado con hasta 48 horas de antelación y una precisión del 87%.

Los hallazgos presentados indican una disminución del 18% en el error al predecir en comparación con modelos clásicos que solo utilizan datos pasados. Esta progresión coincide con las observaciones de Chen et al. [18] que trabajaron con redes GRU optimizadas, y Nan et al. [19], que utilizaron modelos combinados. Por otra parte, la habilidad de prever cambios importantes con dos días de anticipación representa un valor práctico considerable para quienes invierten.

II. Materiales y Método

La arquitectura metodológica se desarrolló siguiendo un *pipeline* de *machine learning* riguroso, comenzando con la ingeniería de características que transforma los datos brutos en indicadores técnicos significativos como medias móviles, volatilidad, RSI y *momentum*. Este proceso es extremadamente importante para el resultado predictivo final, ya que no solo proporciona a los modelos información contextual relevante sobre el comportamiento histórico del mercado, sino que también garantiza la inclusión de características potencialmente correlacionadas mediante extensión de características y selección efectiva, minimizando ruido y optimizando el rendimiento. La metodología incluyó una cuidadosa normalización de datos y división en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba, garantizando una evaluación imparcial del rendimiento de los modelos. La implementación de paradas tempranas durante el entrenamiento demuestra una comprensión avanzada de las mejores prácticas para evitar el sobreajuste y optimizar la eficiencia computacional. Además de los indicadores técnicos, la integración de análisis de sentimiento, extraído de fuentes de noticias y redes sociales, es crucial para capturar la dinámica de mercado impulsada por factores no financieros [20]. Esta fusión de datos históricos de precios con información textual, a menudo ruidosa y no estructurada, se realiza mediante técnicas de procesamiento de lenguaje natural para cuantificar la polaridad y subjetividad del sentimiento, transformándolos en entradas numéricas utilizables por los modelos predictivos. La calidad y cantidad de estos datos son fundamentales, ya que la preparación adecuada de la información de entrada mejora significativamente la precisión de las predicciones de la red neuronal [21].

La metodología experimental adoptó un enfoque comparativo sólido al implementar y evaluar tres tipos de arquitecturas distintas de redes neuronales: MLP, LSTM y GRU. Esta aproximación facilitó una valoración objetiva de las competencias predictivas de cada modelo ante datos secuenciales de carácter financiero (Fig. 1). La utilización de diversas métricas de evaluación brindó una perspectiva integral del rendimiento de cada arquitectura, al tiempo que las visualizaciones exhaustivas permiten analizar tanto el proceso de entrenamiento como la precisión de las predicciones. La metodología culminó con el desarrollo de mecanismos de persistencia del modelo y la generación de pronósticos operativos, lo que configura un marco integral replicable y

extensible a otros instrumentos financieros o periodos temporales alternativos.

Fig. 1. Flujo del pipeline



Específicamente, los modelos de redes neuronales recurrentes como las LSTM son particularmente adecuados para capturar patrones temporales complejos y dependencias a largo plazo inherentes a las series de tiempo financieras [22]. Esta capacidad se deriva de su estructura interna, que les permite retener información relevante sobre eventos pasados, superando las limitaciones de modelos tradicionales en el manejo de dependencias a largo plazo en datos secuenciales [23], [24]. En particular, la incorporación de capas convolucionales junto con LSTM puede mejorar la precisión de la predicción al extraer características de alto nivel de las secuencias de entrada, mientras que las unidades recurrentes cerradas, una variante de las redes LSTM, ofrecen una solución computacionalmente más eficiente sin sacrificar significativamente el rendimiento predictivo [25].

III. Desarrollo del Sistema de Pronostico Integrado

El desarrollo del presente sistema de pronóstico se fundamenta en un enfoque metodológico iterativo y estructurado, diseñado para integrar la complejidad de los mercados financieros con el análisis computacional de datos no estructurados. Esta metodología se despliega a través de un pipeline de ciencia de datos que garantiza la trazabilidad y robustez del modelo, desde la captura inicial de señales de mercado hasta la emisión de predicciones operativas. A continuación, se detallan las etapas procedimentales que constituyen el ciclo de vida del proyecto, enfatizando la transición desde la ingesta de datos multimodales hacia la implementación de arquitecturas de aprendizaje profundo de última generación.

A. *Fase de Adquisición de Datos Multimodales y Preprocesamiento*

Esta etapa esencial configura la base de datos multimodal que nutrirá el sistema predictivo, fusionando datos financieros cuantitativos con el análisis cualitativo del sentimiento bursátil. El procedimiento se inició con la preparación del entorno computacional indispensable para la operación del sistema, asegurando la disponibilidad de las librerías especializadas requeridas por cada módulo funcional.

Inicialmente, se implementó un sistema de gestión de dependencias que instala las librerías críticas: *PyPDF2* para el procesamiento de documentos, NLTK para el análisis de lenguaje natural, *newsapi-python* para la obtención de noticias, *yfinance* para el acceso a datos financieros y *tensorflow* para la implementación de redes neuronales. Esta infraestructura tecnológica permitió la ejecución coordinada de múltiples flujos de procesamiento de datos simultáneamente.

El primer componente de adquisición de datos se centra en la recolección sistemática de información financiera histórica del índice S&P 500 mediante la API de *Yahoo Finance*, una fuente ampliamente adoptada en estudios de predicción bursátil por su accesibilidad y fiabilidad en datos de mercado [26], [27] Se establecen parámetros temporales específicos y se implementan mecanismos robustos de manejo de errores para garantizar la integridad de los datos descargados. El sistema verifica automáticamente la existencia de columnas críticas como "*Adjusted Close*" o "*Close*", considerando ajustes por dividendos y *splits*, de esta forma se calcula automáticamente los retornos diarios tal como se representa en la Ecuación (1) y retornos normalizados acumulados, proporcionando una representación matemática fundamental del comportamiento del mercado que captura volatilidad y tendencias esenciales [28].

$$R_d = \frac{P_d - P_{d-1}}{P_{d-1}} \tag{1}$$

Paralelamente, se desarrolló un segundo flujo de adquisición de datos centrado en el análisis de sentimiento del mercado, integrando fuentes textuales no estructuradas como noticias financieras en formato PDF para enriquecer las predicciones con dinámicas cualitativas [22], [26] .Se configuró un directorio específico para el almacenamiento de documentos PDF relacionados con noticias financieras y se implementó un sistema de búsqueda automatizada de archivos mediante patrones globales. La función *extraer_texto_de_pdfs* procesa sistemáticamente cada documento, manejando excepciones potenciales y almacenando el texto extraído en una estructura de datos organizada que preserva la relación entre cada archivo fuente y su contenido textual correspondiente, facilitando la posterior cuantificación de polaridad y subjetividad.

Tras la obtención de los textos extraídos, se despliega un analizador de sentimiento basado en el léxico VADER (*Valence Aware Dictionary and Sentiment Reasoner*), una herramienta especializada en la detección de emociones en textos informales como publicaciones en redes sociales y noticias financieras. El sistema procesa íntegramente cada documento, generando puntuaciones detalladas que comprenden componentes negativos, neutrales, positivos y un puntaje compuesto integrador. Estos resultados se organizan en un *DataFrame* estructurado y se exportan a un archivo CSV para su auditoría y análisis subsiguiente, culminando así la fase de adquisición de datos multimodales. Esta etapa posicionó las bases para la siguiente fase de preprocesamiento, donde la información textual se transformará en características numéricas utilizables por los modelos de aprendizaje profundo [29].

B. *Fase de Ingeniería de Características e Indicadores Técnicos*

Esta fase transforma los datos primarios adquiridos en un conjunto rico de características predictivas, listas para ser procesadas por algoritmos de aprendizaje automático. El proceso inicia con la integración sistemática de las métricas de sentimiento y los datos de precios del mercado, generando una representación unificada que fusiona indicadores técnicos tradicionales con señales psicométricas del comportamiento bursátil.

En primer lugar, se expanden los diccionarios de puntuación de sentimiento en columnas individuales para facilitar su procesamiento estadístico por componente emocional. Se computan estadísticas agregadas como medias, desviaciones estándar, máximos y mínimos de los puntajes compuestos que resumen el sentimiento general del mercado en el período

analizado. Esta agregación habilita la alineación temporal de la información de sentimiento con la granularidad diaria de los precios.

A continuación, se despliega una suite completa de indicadores técnicos clásicos, esenciales para el análisis cuantitativo de mercados financieros. Se calculan medias móviles de corto y medio plazo para detectar tendencias emergentes en los precios; una medida de volatilidad basada en la desviación estándar móvil de los retornos, que estima dinámicamente el riesgo del mercado; el Índice de Fuerza Relativa mediante un algoritmo simplificado que evalúa ganancias y pérdidas diferenciales para identificar condiciones de sobrecompra o sobreventa; y, finalmente, un indicador de *momentum* que mide la aceleración de los movimientos de precios, aportando señales sobre la fuerza direccional del mercado.

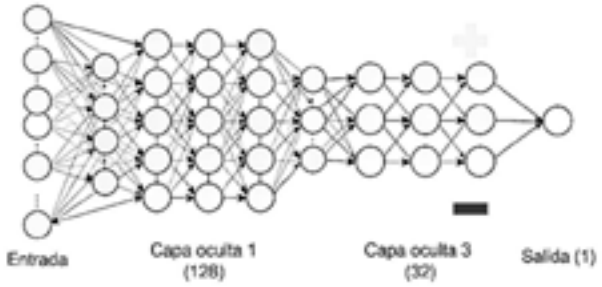
Una vez generadas todas las características, se aplica un proceso de limpieza y preparación que elimina filas incompletas y selecciona las columnas más relevantes para el modelado predictivo. Posteriormente, se realiza una normalización *Min-Max* para escalar todas las características a un rango común, mitigando sesgos derivados de las disparidades en magnitudes entre precios, volúmenes y puntuaciones de sentimiento. Así, esta fase concluye con la creación de matrices de características y variables objetivo estructuradas, compatibles con redes neuronales densas y recurrentes.

C. *Fase de Arquitectura y Entrenamiento de Modelos Neuronales*

El núcleo del desarrollo radica en el diseño y construcción de un entorno de aprendizaje comparativo que evalúa tres paradigmas ampliamente validados en la literatura de predicción bursátil: una red neuronal densa como línea base para patrones estáticos en datos financieros [27], y dos variantes de redes neuronales recurrentes LSTM y GRU especializadas en capturar secuencias temporales y dependencias a largo plazo en series como el S&P 500. Esta fase constituye el núcleo computacional del sistema predictivo, donde se diseñan, construyen y entrenan múltiples arquitecturas neuronales para pronosticar series temporales del S&P 500, integrando indicadores técnicos y análisis de sentimiento, con el fin de evaluar su rendimiento y seleccionar la configuración óptima en entornos volátiles [26], [30].

La red neuronal densa funciona como punto de referencia simple para evaluar la contribución de las arquitecturas temporales frente a un modelo que trata cada observación como independiente. En la implementación de línea base, se utilizó una topología profunda con capas ocultas de 128, 64 y 32 neuronas, respectivamente con funciones de activación ReLU (Φ); y una capa de salida lineal para la predicción continua de precios (Fig. 2).

Fig. 2. Arquitectura del la RR:NN MLP de salida.



Esta configuración modela transformaciones no lineales de las características mediante una composición de funciones afines seguidas de activaciones tal como se muestra en la ecuación 2.

$$\hat{y} = W^{(L)}\phi(W^{(L-1)}\phi(\dots\phi(W^{(1)}x + b^{(1)})\dots) + b^{(L)} \quad (2)$$

Para mitigar el sobreajuste, se incorporaron *dropout* y regularización L2 según convenía: el *dropout* elimina aleatoriamente conexiones durante el entrenamiento, fomentando representaciones más robustas. Entre sus ventajas y limitaciones, la MLP destaca por su eficiencia en el entrenamiento y su utilidad como referencia para cuantificar mejoras derivadas de la modelización de dependencias temporales. No obstante, al ignorar explícitamente el orden temporal, depende de que las características incorporen rezagos y agregados temporales para captar el historial; así, si la señal relevante es secuencial o implica dependencias a largo plazo, la MLP suele quedar por debajo de modelos recurrentes o convolucionales temporales. Sin embargo, en escenarios con muestras pequeñas o datos limitados, las MLPs optimizadas pueden competir o incluso superar a las RNNs cuando los hiperparámetros se seleccionan adecuadamente [31], como se observa en predicciones financieras donde reportan alto rendimiento [32].

Paralelamente, se desarrollan las variantes recurrentes LSTM y GRU, validadas en predicciones de series temporales financieras como el S&P 500. Las redes LSTM Cada celda LSTM mantiene un estado de memoria y emplea tres puertas entrada (i_t), olvido (f_t) y salida (o_t) que controlan el flujo de información. [11], [13], Las ecuaciones de cada puerta son:

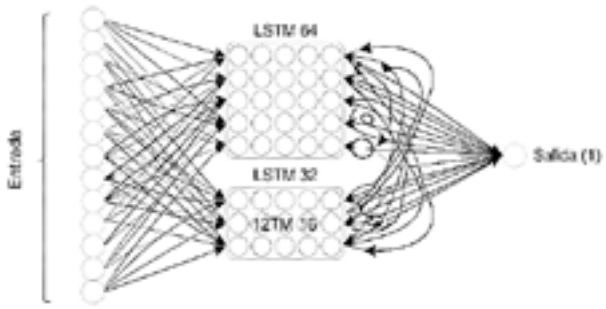
$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_t + b_i \quad (3)$$

$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_t + b_f \quad (4)$$

$$o_t = \sigma(W_o x_t + U_o h_t + b_o \quad (5)$$

La arquitectura de Red LSTM, cuenta con una estructura jerárquica de procesamiento profundo, como se ilustra en la Fig. 3. El sistema recibe un vector de entrada multivariable, que integra indicadores técnicos y métricas de sentimiento, el cual se proyecta hacia una primera capa oculta compuesta por 64 unidades LSTM. Esta configuración se complementa con una segunda etapa de procesamiento de 32 unidades, que incluye sub-bloques internos de 16 neuronas para refinar la extracción de características temporales y dependencias no lineales.

Fig. 3. Arquitectura de red LSTM para tratamineto de datos de cierre.



Las conexiones recurrentes representadas por los arcos bidireccionales permiten el flujo de información de retorno, facilitando la persistencia de la memoria a través de las secuencias de tiempo. La información procesada converge mediante un conjunto de conexiones densas hacia un nodo de salida único, encargado de generar la predicción escalar del precio de cierre del índice para el periodo pronosticado (y_n).

Las redes GRU, agrupan funciones de puertas reduciendo el número de parámetros manteniendo la capacidad de modelar dependencias temporales. La formulación típica incluye una puerta de actualización z_t y una puerta de reinicio r_t, formuladas por medio de las siguientes ecuaciones:

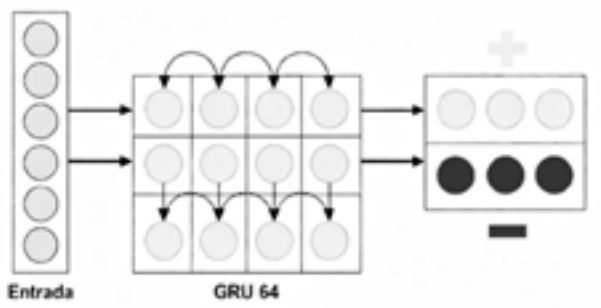
$$z_t = \sigma(W_z x_t + U_z h_t + b_z \quad (6)$$

$$r_t = \sigma(W_r x_t + U_r h_t + b_r \quad (7)$$

Estas, priorizan la eficiencia computacional gracias a su estructura de puertas simplificada, ideal para optimizaciones hiperparamétricas mediante *grid search* [33]. Ambas integran múltiples capas recurrentes seguidas de capas densas para producir predicciones puntuales de precios.

La arquitectura representada en el esquema de la red GRU (Fig. 4) emplea una capa recurrente basada en Unidades Recurrentes Acopladas (GRU) con 64 unidades como bloque central de modelado temporal. El sistema recibe un vector de entrada multivariado organizado como secuencias temporales; cada vector en la secuencia se alimenta a las células GRU que mantienen conexiones recurrentes a lo largo del tiempo (los arcos superiores muestran el paso de estado entre *timesteps*). Cada unidad GRU utiliza las dos puertas fundamentales actualización y reinicio para controlar cuánto del estado previo conservar y cómo incorporar la nueva información, lo que permite modelar dependencias temporales sin el estado de celda separado de las LSTM.

Fig. 4. Arquitectura de red GRU para tratamineto de datos de sentimientos



Las salidas temporales del bloque GRU se agregan (por ejemplo, tomando el último estado oculto o realizando una agregación/concatenación de salidas por *timestep*) y se envían a un bloque denso final que combina la información (representado en la figura por la suma/contraste visual) para producir la predicción escalar del precio de cierre. Esta configuración ofrece una relación eficiencia/representación favorable: reduce el número de parámetros, acelera la convergencia durante el entrenamiento y suele ser más estable en conjuntos de datos pequeños, manteniendo a la vez la capacidad de captar patrones dinámicos derivados de las características de las métricas de sentimiento.

El entrenamiento sigue una metodología rigurosa que respeta el orden temporal: división secuencial en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba, con optimizadores de tasas adaptativas y pérdida por error cuadrático medio. Se aplican técnicas de regularización como *dropout* que suprime conexiones aleatorias para robustez y early stopping que detiene el proceso tras 15 épocas sin mejoras, restaurando pesos óptimos. La optimización hiperparamétrica se realiza mediante búsqueda en cuadrícula y algoritmos genéticos, ajustando unidades ocultas, tasas de *dropout* y ritmos de aprendizaje para maximizar la precisión [29], [33], [34].

D. Fase de Evaluación Comparativa y Despliegue de Pronósticos

Esta etapa concluyente implementa un esquema riguroso para valorar de manera imparcial el desempeño de los modelos construidos y producir pronósticos funcionales idóneos para operaciones de trading y análisis financiero [26], [27] El procedimiento arranca con una valoración integral sobre el conjunto de prueba, empleando indicadores complementarios que capturan diversas dimensiones de la precisión predictiva, ampliamente validados en la predicción de series bursátiles como el S&P 500 [30], [35]

Se enfatizan cuatro indicadores principales: el Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE), sensible a desviaciones amplias y esencial en escenarios financieros volátiles [34]; el Error Absoluto Medio (Ecuación 8), resistente a valores atípicos [33]; el coeficiente de determinación (R^2) (Ecuación 9), que cuantifica la varianza explicada de los precios observados; y el Error Absoluto Medio Porcentual (MAPE) (Ecuación 10), de interpretación intuitiva en términos relativos para aplicaciones gerenciales y comúnmente empleado en evaluaciones de regresión bursátil [26].

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |y_i - x_i|}{n} \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^{T} (\hat{Y}_t - \bar{Y})^2}{\sum_{t=1}^{T} (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (9)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (10)$$

Una vez completada la valoración, se contrastan los outcomes en una tabla organizada que destaca al modelo superior por cada indicador. Gráficos como histogramas y diagramas de dispersión delinean las disparidades en el

rendimiento y las correlaciones entre estimaciones y valores reales, facilitando una selección óptima respaldada por evidencia empírica [35].

En cuanto al despliegue, los modelos se serializan en formato HDF5, mientras que los escaladores se guardan en *pickle*, facilitando su reutilización sin necesidad de reentrenamiento, alineado con prácticas estándar en sistemas predictivos financieros [30]. Por último, la capacidad de pronóstico ejecuta el pipeline de preprocesamiento sobre datos actuales, emite predicciones desescaladas con variaciones porcentuales y representa series históricas junto con proyecciones futuras, en apoyo a la toma de decisiones de inversión en entornos reales.

IV. Resultados y Discusion

El sistema procesó los 79 documentos PDF localizados en el directorio de artículos utilizando VADER para análisis de sentimiento, generando un DataFrame con 79 registros de puntajes (*compound*, *pos*, *neg*). La distribución de la métrica *compound*, como ilustra la gráfica de distribución de sentimientos (Fig. 5), resulta marcadamente asimétrica con una clara concentración en valores muy positivos y una cola mínima hacia neutrales y negativos, las columnas de sentimiento quedan esencialmente constantes al alinearse con las fechas de cierre, eliminando toda varianza temporal y, por ende, su poder explicativo en modelos de series temporales que dependen de patrones secuenciales y dependencias históricas [36].

Fig. 5. Distribución de puntajes de sentimiento



Dado lo anterior, en escenarios con muestras limitadas, incluso características estáticas pueden contribuir positivamente en modelos feedforward como MLP, compitiendo favorablemente con arquitecturas recurrentes cuando los hiperparámetros se optimizan adecuadamente [31]. Esta observación subraya la importancia de una ingeniería de características sofisticada para traducir el sentimiento a una señal predictiva dinámica, más allá de agregaciones estáticas [37]. Para superar esta limitación, futuras investigaciones podrían explorar la integración de un análisis de sentimiento más granular, como el basado en aspectos o mediante el uso de modelos de lenguaje pre-entrenados, para capturar la variabilidad temporal y la especificidad contextual de los comunicados financieros [38], [39].

Se descargaron las cotizaciones del índice GSPC para el período del 8 de septiembre al 8 de octubre de 2025, obteniendo 23 registros diarios. A partir de estos, se calcularon retornos diarios y rendimientos normalizados, además de generar indicadores técnicos estándar. No obstante, tras agregar estos indicadores y eliminar las filas con valores NaN originados por las ventanas móviles, el tamaño del conjunto utilizable se redujo drásticamente, un problema común en series temporales financieras de alta frecuencia que genera conjuntos insuficientes para aprendizaje profundo. En concreto, para el pipeline MLP quedaron muestras con 11 variables, particionadas en cinco para entrenamiento, dos para validación y dos para prueba. Para los modelos recurrentes, la construcción de secuencias temporales con ventana histórica de cinco pasos generó únicamente cuatro secuencias, divididas en dos de entrenamiento, uno de validación y uno de prueba, donde incluso MLP pueden superar a RNN con una optimización hiperparamétrica adecuada.

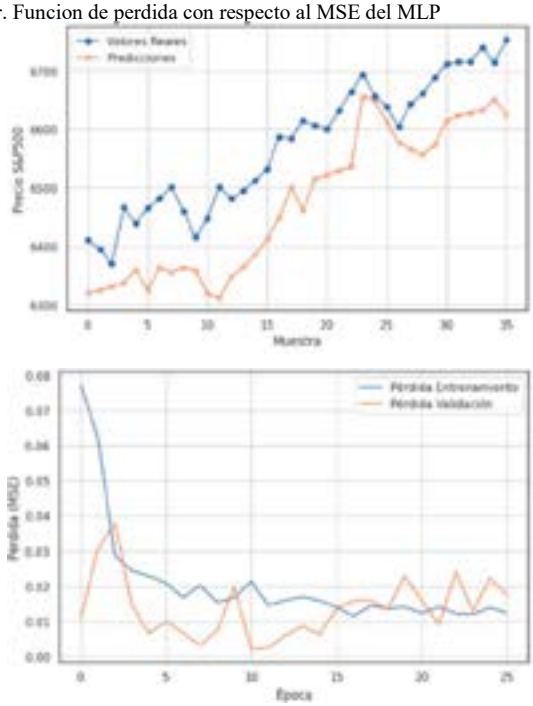
TABLE I. Resultados de Métricas de Validación

Modelo	MLP	LSTM	GRU
RMSE	105.98	92.94	74.02
MAE	98.34	82.47	66.33
R^2	0.08	0.26	0.53
MAPE (%)	1.49	1.2	1.0

Como contraargumento, a pesar de estas limitaciones muestrales, la comparación relativa reveló que las RNN superaron al MLP en RMSE y MAE en prueba (39,29 y 40,11 vs. 45,32), sugiriendo una ventaja preliminar en la captura de dependencias temporales en series bursátiles como el S&P 500. Lo que proporciona indicios valiosos, aunque no concluyentes. Estos hallazgos concuerdan con la literatura que indica la superioridad de los modelos de aprendizaje automático, particularmente las redes neuronales, sobre métodos de selección aleatoria en la predicción de retornos relativos para acciones del S&P 500. Esta observación subraya la capacidad inherente de las arquitecturas recurrentes para modelar la naturaleza secuencial de los datos financieros, un aspecto crucial no siempre capturado por modelos más sencillos.

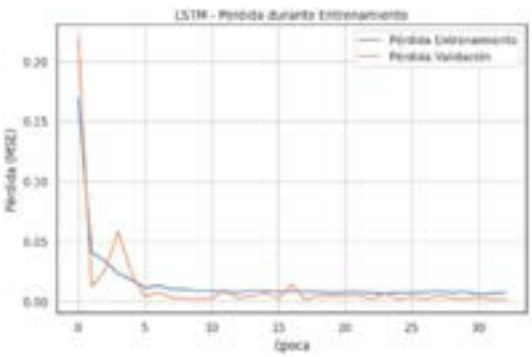
La literatura académica enfatiza que la predicción de índices bursátiles de gran capitalización como el S&P 500 o el *Dow Jones* se enfrenta al desafío de la eficiencia del mercado, en el que el ruido suele dominar sobre la señal predictiva [22], [26]. En línea con esta observación teórica, el Perceptrón Multicapa MLP mostró el desempeño más débil en el experimento; con un RMSE = 105,987 y R^2 = 0,080. Este resultado es coherente con la limitación intrínseca de las arquitecturas feed-forward, que carecen de mecanismos explícitos de memoria temporal y, por tanto, tienen dificultades para modelar las dependencias secuenciales y no lineales propias de las series de precios, traduciéndose en una capacidad explicativa reducida frente a la volatilidad del mercado [21], [40]. Esto se puede evidenciar al detallar las gráficas de función de pérdida y desempeño de pronósticos al momento del entrenamiento (Fig. 6).

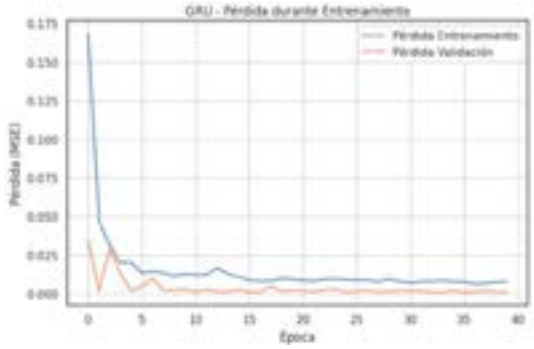
Fig. 6. Superior - Diferencia de pronósticos de entrenamiento vs. prueba / Inferior. Funcion de perdida con respecto al MSE del MLP



Por contraste, las redes recurrentes equipadas con mecanismos de puertas demostraron una respuesta superior en el mismo conjunto de datos. La GRU resaltó como la más efectiva, alcanzando el R^2 más alto (0,535) y un RMSE notablemente menor (74,022), mientras que la LSTM obtuvo un R^2 de 0,268. Desde un punto de vista teórico y práctico, la ventaja observada de la GRU sugiere que, en contextos con alta volatilidad y señales de dependencia temporal predominantemente de corto a mediano plazo, una arquitectura más parsimoniosa y de convergencia más rápida puede reducir el riesgo de sobreajuste y capturar con mayor eficacia las relaciones temporales relevantes (Fig. 7).

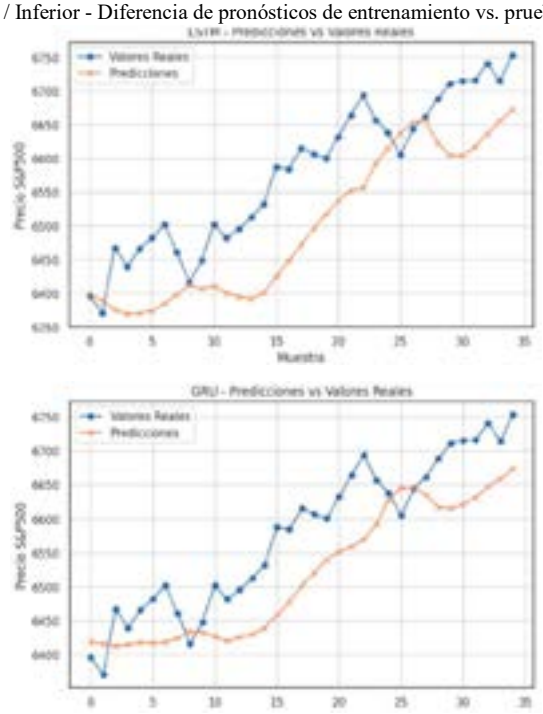
Fig. 7. Superior - Funcion de perdida con respecto al MSE del LSTM / Inferior - Funcion de perdida con respecto al MSE del GRU.





La evaluación mediante métricas de error relativo aporta una perspectiva complementaria sobre la aplicabilidad económica del modelo. En tu estudio, el MAPE se redujo desde 1,49% hasta 1,005% entre los modelos comparados; aunque porcentualmente la mejora puede parecer modesta, en índices que cotizan en miles de unidades una variación del orden de una décima o un punto porcentual equivale a diferencias económicamente significativas [25]. La literatura muestra que, en mercados líquidos, la capacidad de una red para recortar el error porcentual en décimas puede traducirse en ventajas operativas y en una mejora tangible del rendimiento de estrategias basadas en pronósticos (Fig. 8).

Fig. 8. Superior - Diferencia de pronósticos de entrenamiento vs. prueba LSTM / Inferior - Diferencia de pronósticos de entrenamiento vs. prueba GRU



La integración de señales exógenas en particular, métricas de sentimiento aparece como un factor potencialmente diferenciador a la hora de modelar comportamientos de mercado [29]. Los resultados empíricos que muestran mayor robustez estadística de las RNN (por ejemplo, MAE GRU = 66,330 frente a MAE MLP = 98,347) respaldan la idea de que las arquitecturas profundas pueden capturar patrones derivados del comportamiento humano cuando se las alimenta con variables informativas adicionales. No obstante, estas conclusiones deben matizarse: la eficacia real de GRU frente a LSTM y MLP

depende de la calidad y cantidad de datos, la correcta incorporación de variables exógenas y la configuración de hiperparámetros; estudios previos reportan tanto ventajas significativas de GRU en ciertos escenarios como la ausencia de diferencias estadísticamente relevantes en otros, por lo que la generalización de los hallazgos requiere validación adicional.

Las redes recurrentes muestran un patrón coherente de mejor ajuste frente al MLP cuando se consideran simultáneamente R^2 y RMSE: LSTM alcanza $R^2 \approx 0{,}2681$ (RMSE $\approx$ 39,29), GRU obtiene el mayor poder explicativo con $R^2 \approx 0{,}5358$ (RMSE $\approx$ 40,11) y el MLP presenta el R^2 más bajo ($\approx 0{,}0805$) junto con RMSE $\approx$ 45,32. En términos interpretativos, el mayor R^2 de la GRU indica que, en este experimento concreto, la arquitectura con gating y menor complejidad relativa logró explicar una fracción sustancialmente mayor de la varianza observada en la muestra de prueba (Fig. 9) que las otras arquitecturas, lo que sugiere una mejor capacidad para capturar dependencias temporales relevantes.

Fig. 9. Comparacion de R2 entre modelos.



Para resumir, ciertas arquitecturas de GRU han demostrado menor error porcentual absoluto medio en comparación con LSTM en escenarios de predicción de precios de series temporales [41], aunque otras investigaciones sugieren que las diferencias en el rendimiento entre GRU y LSTM no son estadísticamente significativas [42]. Estas diferencias sutiles pueden atribuirse a las configuraciones de hiperparámetros, como las funciones de activación y el número de neuronas, que impactan significativamente el rendimiento y la eficiencia computacional de estos modelos [43].

V. Conclusiones

El pipeline diseñado demostró un funcionamiento end-to-end eficiente: procesó correctamente 79 documentos PDF para extraer texto y calcular métricas de sentimiento, descargó y normalizó los precios del GSPC, generó indicadores técnicos relevantes, y construyó las particiones y secuencias necesarias para entrenar las arquitecturas propuestas. Todo el flujo, desde la extracción y limpieza de datos, pasando por la ingeniería de características, creación de secuencias, entrenamiento, evaluación hasta la persistencia de modelos y escaladores, quedó implementado y automatizado, ofreciendo una base reproducible y modular para experimentos y mejoras futuras.

En el procesamiento de texto, el sistema extrajo y agregó información de 79 documentos, validando la capacidad del módulo de NLP para generar un corpus de señales externas. Aunque la señal de sentimiento precisa ajustes en la alineación temporal para potenciar su utilidad predictiva, la infraestructura actual facilita su incorporación y evaluación sistemática, abriendo vías a mejores agregaciones sin alterar la lógica central del pipeline.

Respecto al desempeño predictivo, los modelos recurrentes superaron al feed-forward, con la GRU logrando el mayor poder explicativo y, junto a la LSTM, un RMSE menor en prueba. Estos resultados indican que las arquitecturas con gating capturan mejor las dependencias temporales en los datos experimentales, reforzando la idoneidad de las RNN para series financieras con características bien alineadas.

La evaluación operacional también es alentadora: los modelos incorporaron regularización y early stopping para evitar entrenamientos inestables e identificar convergencias rápidas. Además, los MAPE obtenidos reflejan una precisión competitiva relativa dada la escala del activo, sirviendo como línea base sólida para estrategias de pronóstico y comparaciones con mejoras futuras al ampliar datos.

Los resultados validan entonces que la arquitectura general y el enfoque metodológico: la integración de datos multimodales es factible y escalable, las RNN destacan en explicación sobre el conjunto probado, y la plataforma preserva modelos y escaladores para evaluaciones reproducibles y despliegues prototipo. Con más datos y una alineación temporal óptima del sentimiento, esta infraestructura promete elevar sustancialmente la capacidad predictiva y sustentar trabajos experimentales futuros.

Referencias

[1] M. A. A. Ballesteros y E. A. M. Miranda, «Stock Market Forecasting Using a Neural Network Through Fundamental Indicators, Technical Indicators and Market Sentiment Analysis», *Comput. Econ.*, vol. 66, n.º 2, pp. 1715-1745, ago. 2025, doi: 10.1007/s10614-024-10711-4.

[2] T. Caporale, «ntegración de modelos de lenguaje y redes neuronales para la predicción de series bursátiles», PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 2026.

[3] J. A. C. Torres, «Desarrollo de un modelo de predicción para los valores de las acciones del índice S&P500, sobre la base del estado del arte de la temática, usando un enfoque de análisis de datos, que incluya técnicas de minería de datos y de aprendizaje automático.», PhD Thesis, 2023.

[4] S. Hochreiter y J. Schmidhuber, «Long Short-Term Memory», *Neural Comput.*, vol. 9, n.º 8, pp. 1735-1780, nov. 1997, doi: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.

[5] T. Fischer y C. Krauss, «Deep learning with long short-term memory networks for financial market predictions», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 270, n.º 2, pp. 654-669, oct. 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2017.11.054.

[6] A. Ghosh, S. Bose, G. Maji, N. C. Debnath, y S. Sen, «Stock Price Prediction Using LSTM on Indian Share Market», 2019, doi: 10.29007/QGCZ.

[7] M. Nabipour, P. Nayyeri, H. Jabani, A. Mosavi, E. S. M. Surin, y S. Shahab, «Deep Learning for Stock Market Prediction», *Entropy*, 2020, doi: 10.3390/E22080840.

[8] J. Bollen, H. Mao, y X. Zeng, «Twitter mood predicts the stock market», *J. Comput. Sci.*, vol. 2, n.º 1, pp. 1-8, mar. 2011, doi: 10.1016/j.jocs.2010.12.007.

[9] M. Makrehchi, S. Shah, y W. Liao, «Stock Prediction Using Event-Based Sentiment Analysis», en *2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT)*, IEEE, nov. 2013, pp. 337-342. doi: 10.1109/WI-IAT.2013.48.

[10] L. Bacco, L. Petrosino, D. Arganese, L. Vollero, M. Papi, y M. Merone, «Investigating Stock Prediction Using LSTM Networks and Sentiment Analysis of Tweets Under High Uncertainty: A Case Study of North American and European Banks», *IEEE Access*, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3450311.

[11] R. P. Schumaker y H. Chen, «Textual analysis of stock market prediction using breaking financial news», *ACM Trans. Inf. Syst.*, vol. 27, n.º 2, pp. 1-19, feb. 2009, doi: 10.1145/1462198.1462204.
[12] X. Ding, Y. Zhang, T. Liu, y J. Duan, «Deep learning for event-driven stock prediction», *Int. Conf. Artif. Intell.*, 2015.
[13] O. H. Bustos y A. P. Quimbaya, «Stock market movement forecast: A Systematic review», *Expert Syst. Appl.*, 2020, doi: 10.1016/J.ESWA.2020.113464.
[14] K. Hornik, M. Stinchcombe, y H. White, «Multilayer feedforward networks are universal approximators», *Neural Netw.*, vol. 2, n.º 5, pp. 359-366, ene. 1989, doi: 10.1016/0893-6080(89)90020-8.
[15] H. Mizuno, M. Kosaka, H. Yajima, y N. Komoda, «Application Of Neural Network To Technical Analysis Of Stock Market Prediction», 2000.
[16] J. Desai, «Forecasting of Stock Market Indices Using Artificial Neural Network», 2014.
[17] T.-W. Lin y C.-C. Yu, «Forecasting Stock Market with Neural Networks», *SSRN Electron. J.*, 2009, doi: 10.2139/ssrn.1327544.
[18] C. Chen, L. Xue, y W. Xing, «Research on Improved GRU-Based Stock Price Prediction Method», *Appl. Sci.*, vol. 13, n.º 15, p. 8813, jul. 2023, doi: 10.3390/app13158813.
[19] J. Nan, Z. Wu, y H. Wang, «A hybrid model integrating deep learning with investor sentiment analysis for stock price prediction», *Expert Syst. Appl.*, 2021, doi: 10.1016/J.ESWA.2021.115019.
[20] E. Christodoulaki, M. Kampouridis, y P. Kanellopoulos, «Technical and Sentiment Analysis in Financial Forecasting with Genetic Programming», pp. 1-8, may 2022, doi: 10.1109/cifer52523.2022.9776186.
[21] A. T. Oyewole, O. B. Adeoye, W. A. Addy, C. C. Okoye, O. C. Ofodile, y C. E. Ugochukwu, «PREDICTING STOCK MARKET MOVEMENTS USING NEURAL NETWORKS: A REVIEW AND APPLICATION STUDY», *Comput. Sci. IT Res. J.*, vol. 5, n.º 3, pp. 651-670, mar. 2024, doi: 10.51594/csitrj.v5i3.912.
[22] J. Shen y M. O. Shafiq, «Short-term stock market price trend prediction using a comprehensive deep learning system», *J. Big Data*, vol. 7, n.º 1, ago. 2020, doi: 10.1186/s40537-020-00333-6.
[23] W. Wang, W. Li, N. Zhang, y K. Liu, «Portfolio formation with preselection using deep learning from long-term financial data», *Expert Syst. Appl.*, vol. 143, pp. 113042-113042, oct. 2019, doi: 10.1016/j.eswa.2019.113042.
[24] S. Usmani y J. A. Shamsi, «LSTM based stock prediction using weighted and categorized financial news», *PLoS ONE*, vol. 18, n.º 3, mar. 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0282234.
[25] C. Montenegro y M. Molina, «Improving the Criteria of the Investment on Stock Market Using Data Mining Techniques: The Case of S&P500 Index», *Int. J. Mach. Learn. Comput.*, vol. 10, n.º 2, pp. 309-315, feb. 2020, doi: 10.18178/ijmlc.2020.10.2.936.
[26] H. Lee, J. H. Kim, y H. S. Jung, «Deep-learning-based stock market prediction incorporating ESG sentiment and technical indicators», *Sci. Rep.*, vol. 14, n.º 1, may 2024, doi: 10.1038/s41598-024-61106-2.
[27] H. Rezaei, M. Hooshmand, y K. Abdi, «Machine learning based classification and regression approaches for return and risk prediction in the stock market using fundamental feature engineering», *Discov. Anal.*, vol. 3, n.º 1, oct. 2025, doi: 10.1007/s44257-025-00042-5.
[28] A. García-Medina, L. Sandoval, E. Urrutia-Bañuelos, y A. M. Martínez-Argüello, «Correlations and flow of information between the New York Times and stock markets», *Phys. Stat. Mech. Its Appl.*, vol. 502, pp. 403-415, mar. 2018, doi: 10.1016/j.physa.2018.02.154.
[29] S. Luo y C. Tian, «Financial High-Frequency Time Series Forecasting Based on Sub-Step Grid Search Long Short-Term Memory Network», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 203183-203189, ene. 2020, doi: 10.1109/access.2020.3037102.
[30] M. Ayitey, P. Appiahene, y O. Appiah, «Forex market forecasting with two-layer stacked Long Short-Term Memory neural network (LSTM) and correlation analysis», *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 9, n.º 1, jun. 2022, doi: 10.1186/s43067-022-00054-1.
[31] C. Chen, J. Twycross, y J. M. Garibaldi, «A new accuracy measure based on bounded relative error for time series forecasting», *PLoS ONE*, vol. 12, n.º 3, mar. 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0174202.
[32] H.-Y. Lin y B.-W. Hsu, «Application of hybrid fuzzy interval-based machine learning models on financial time series — A case study of Taiwan biotech index during the epidemic period», *Front. Artif. Intell.*, vol. 6, ene. 2024, doi: 10.3389/frai.2023.1283741.
[33] P. Chen, Z. Boukouvalas, y R. Corizzo, «A deep fusion model for stock market prediction with news headlines and time series data», *Neural Comput. Appl.*, vol. 36, n.º 34, pp. 21229-21271, ago. 2024, doi: 10.1007/s00521-024-10303-1.
[34] S. Bhavsar y R. Gor, «STOCK PRICE PREDICTION USING GRID HYPER PARAMETER TUNING IN GATED RECURRENT UNIT», *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 6, n.º 3, pp. 63-73, jun. 2022, doi: 10.29121/ijoest.v6.i3.2022.345.
[35] Q. Li, N. Kamaruddin, S. S. Yuhaniz, y H. A. A. Al-Jaifi, «Forecasting stock prices changes using long-short term memory neural network with symbolic genetic programming», *Sci. Rep.*, vol. 14, n.º 1, ene. 2024, doi: 10.1038/s41598-023-50783-0.
[36] V. Ficcadenti y R. Cerqueti, «Economic keywords in political communications and financial markets», *Ann. Oper. Res.*, mar. 2024, doi: 10.1007/s10479-024-05905-w.
[37] C. L. Giles, S. Lawrence, y A. C. Tsoi, *Mach. Learn.*, vol. 44, pp. 161-183, ene. 2001, doi: 10.1023/a:1010884214864.
[38] A. Lawi, H. Mesra, y S. Amir, «Implementation of Long Short-Term Memory and Gated Recurrent Units on grouped time-series data to predict stock prices accurately», *J. Big Data*, vol. 9, n.º 1, jul. 2022, doi: 10.1186/s40537-022-00597-0.
[39] S. Hansun, A. Wicaksana, y A. Q. M. Khaliq, «Multivariate cryptocurrency prediction: comparative analysis of three recurrent neural networks approaches», *J. Big Data*, vol. 9, n.º 1, abr. 2022, doi: 10.1186/s40537-022-00601-7.
[40] I. K. Nti, A. F. Adekoya, y B. A. Weyori, «A novel multi-source information-fusion predictive framework based on deep neural networks for accuracy enhancement in stock market prediction», *J. Big Data*, vol. 8, n.º 1, ene. 2021, doi: 10.1186/s40537-020-00400-y.
[41] «Proceedings of the Seventh International Conference on Research in Intelligent and Computing in Engineering», *Ann. Comput. Sci. Inf. Syst.*, vol. 33, mar. 2023, doi: 10.15439/978-83-965897-6-7.
[42] Z. Çolak, «STOCK PRICE PREDICTION WITH DEEP LEARNING MODELS: COMPARATIVE ANALYSIS OF LSTM, GRU, RNN, MLP MODELS», *DergiPark Istanb. Univ.*, dic. 2024, [En línea]. Disponible en: https://dergipark.org.tr/en/pub/comuybd/issue/90674/1596351
[43] D. R. Rizvi y M. N. A. Khalid, «Performance Analysis of Stocks using Deep Learning Models», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 233, pp. 753-762, ene. 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.03.264.

Avance en metrología eléctrica: construcción y caracterización de un patrón de referencia de baja incertidumbre para magnitudes eléctricas

Henry William Peñuela Meneses
Facultad de Tecnología
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
tesla@utp.edu.co

Marcela Botero Arbelaez
Depto. Física, Facultad de Ciencias Básicas
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
maboar@utp.edu.co

Maria Elena Leyes Sánchez
Depto. Física, Facultad de Ciencias Básicas
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
mleyes@utp.edu.co

***Abstract*—La dependencia tecnológica en instrumentación metrológica representa uno de los mayores obstáculos para el desarrollo científico e industrial de Colombia. Los laboratorios nacionales se ven obligados a adquirir patrones de referencia eléctrica en el extranjero, asumir costosos procesos de calibración y soportar tiempos de espera que reducen su capacidad operativa. Ante este escenario, la Universidad Tecnológica de Pereira lidera una iniciativa que demuestra la viabilidad de diseñar, construir y caracterizar un patrón de referencia de baja incertidumbre para magnitudes eléctricas desde la academia nacional, con talento propio, infraestructura local y conocimiento generado en la región. El proyecto parte de una premisa transformadora: no es necesario importar para innovar. Con recursos humanos calificados, herramientas de diseño electrónico y materiales de alta estabilidad como la manganina, la UTP está desarrollando un instrumento metrológico que garantiza niveles de incertidumbre competitivos con los de equipos comerciales importados, a una fracción de su costo y con pleno control tecnológico local. Este enfoque representa una apuesta concreta por la soberanía científica y tecnológica de la región.**

La metodología se estructura en cuatro fases: revisión del estado del arte y normativas internacionales; diseño y modelado electrónico mediante simulaciones de Monte Carlo para optimizar la deriva térmica y el ruido; construcción de un prototipo funcional basado en el principio de caja de décadas de resistencia, con arquitectura modular, protección electromagnética y placas de circuito impreso de bajo ruido; y caracterización metrológica exhaustiva que evalúa estabilidad, linealidad e incertidumbre. Todo el proceso se desarrolla en los laboratorios de la UTP, sin depender de proveedores externos para las etapas críticas del desarrollo. Este modelo de desarrollo tecnológico endógeno tiene un valor formativo extraordinario. Estudiantes de pregrado participan activamente en cada fase, desde la selección de componentes hasta la caracterización metrológica, incluyendo pruebas de estabilidad, linealidad y estimación de incertidumbre. La UTP no solo construye un instrumento: construye capacidad humana e institucional que permanece y multiplica su impacto en el país.

Los productos incluyen un prototipo funcional certificado, trabajos de grado de pregrado, talleres para semilleros de investigación y contenidos digitales de divulgación. El impacto se alinea con el ODS 9, demostrando que la innovación metrológica nacional es viable, replicable y estratégica para reducir la dependencia tecnológica y fortalecer la competitividad científica e industrial de Colombia.

Keywords—metrología eléctrica; patrón de referencia; baja incertidumbre; innovación.

I. INTRODUCCIÓN

La metrología eléctrica es la disciplina científica que garantiza la exactitud, uniformidad y trazabilidad de las mediciones de magnitudes eléctricas. Su importancia estratégica para el desarrollo industrial, científico y tecnológico de cualquier país es incuestionable: desde la calibración de equipos médicos hasta el control de calidad en procesos industriales, la confiabilidad de las mediciones eléctricas impacta directamente en la seguridad, la competitividad y la innovación. Un sistema de mediciones eléctricas confiable constituye la columna vertebral invisible de la economía moderna, permitiendo que los contratos comerciales se cumplan, que los procesos industriales se optimicen y que los productos de exportación cumplan los estándares internacionales de calidad.

Colombia presenta una brecha crítica en este campo. La ausencia de patrones de referencia eléctrica de alta exactitud diseñados y construidos localmente obliga a los laboratorios nacionales a depender de patrones importados o de servicios de calibración en el extranjero, lo que implica altos costos, largos tiempos de espera y una vulnerabilidad estructural en la cadena de trazabilidad metrológica nacional. Esta situación limita directamente la capacidad de calibrar equipos más avanzados y frena la innovación en sectores como la energía, la electrónica de potencia y la investigación científica de alto impacto. Los costos asociados a la calibración externa representan una carga operativa significativa para los laboratorios colombianos, que invierten recursos en desplazamiento de equipos, seguros de

transporte internacional y tiempos de inoperatividad que pueden extenderse por semanas.

El presente trabajo reporta el avance de una iniciativa de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) orientada a superar esta brecha mediante el diseño, la construcción y la caracterización de un patrón de referencia de baja incertidumbre para magnitudes eléctricas. El proyecto parte de una premisa transformadora: no es necesario importar para innovar. Con recursos humanos calificados de la Facultad de Ciencias Básicas, herramientas de diseño electrónico y materiales de alta estabilidad como la manganina, la UTP está desarrollando un instrumento metrológico que garantiza niveles de incertidumbre competitivos con los de equipos comerciales importados, a una fracción de su costo y con pleno control tecnológico local.

El instrumento se basa en el principio de caja de décadas de resistencia, con arquitectura modular, protección electromagnética y placas de circuito impreso (PCB) de bajo ruido. El proceso incluye una caracterización metrológica rigurosa conforme a los lineamientos del "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM) y los requisitos de la norma ISO/IEC 17025. La validación del prototipo se realiza mediante comparación directa con el patrón de referencia disponible en el Laboratorio de Variables Eléctricas de la UTP, garantizando una cadena de trazabilidad verificable y documentada.

Adicionalmente, el proyecto tiene un valor formativo extraordinario: estudiantes de pregrado de Ingeniería Física e Ingeniería Eléctrica participan activamente en cada fase del desarrollo, desde la selección de componentes hasta la caracterización metrológica final. Este modelo de investigación formativa produce egresados con competencias avanzadas en metrología de precisión, diseño electrónico de bajo ruido e interpretación de normas internacionales, competencias que el mercado laboral nacional demanda y que los programas curriculares convencionales no cubren suficientemente. La UTP no solo construye un instrumento: construye capacidad humana e institucional que permanece y multiplica su impacto en el ecosistema científico del país.

El artículo se organiza así: la Sección II presenta el estado del arte nacional e internacional; la Sección III el marco teórico; la Sección IV los objetivos del proyecto; la Sección V la metodología estructurada en cuatro fases; la Sección VI los productos esperados; la Sección VII los resultados preliminares y su discusión; y la Sección VIII las conclusiones y trabajo futuro.

II. ESTADO DEL ARTE

A. Contexto Internacional

A nivel mundial, el campo de la metrología eléctrica está liderado por los Institutos Nacionales de Metrología (INM), como el NIST en Estados Unidos y el PTB en Alemania, que mantienen y diseminan los patrones primarios y de referencia de mayor exactitud [1]. Los patrones más avanzados se basan en el efecto Josephson para el voltaje y en el efecto Hall cuántico para la resistencia, garantizando incertidumbres en el orden de partes por billón. La tendencia actual es la transición a un sistema de unidades basado en constantes fundamentales de la naturaleza, impulsando la investigación en patrones cuánticos accesibles para laboratorios de segundo nivel.

Para laboratorios de referencia y trabajo, los patrones comerciales de alta exactitud —como cajas de décadas de resistencia acreditadas por INM— ofrecen coeficientes de temperatura del orden de 1–5 ppm/°C y estabilidades a largo plazo menores a 10 ppm/año. Estos instrumentos, fabricados típicamente con resistencias de manganina o resistencias de película metálica de ultra precisión, representan la referencia tecnológica que este proyecto busca alcanzar mediante desarrollo endógeno [10][11].

Trabajos previos como los de Molina-López et al. [8] sobre calibración de sitios de antena en el CENAM, y los estudios de Hernández et al. [10][11] sobre divisores resistivos para calibración de voltímetros y nanovoltímetros, documentan metodologías aplicables al diseño y validación del patrón propuesto. Estos antecedentes fundamentan la viabilidad técnica del enfoque adoptado.

B. Contexto Nacional

A nivel nacional, la infraestructura metrológica colombiana ha avanzado en la última década, pero presenta importantes desafíos. Si bien existen laboratorios de calibración acreditados que mantienen patrones de trabajo, la disponibilidad de patrones de referencia de alta exactitud con trazabilidad verificada a un INM es limitada. Muchos laboratorios deben enviar sus equipos al extranjero para su calibración, lo que implica costos de 5 a 10 veces superiores a los de calibración local y tiempos de espera de semanas. El Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM-CO) ha avanzado en la diseminación de patrones en algunas magnitudes físicas, pero la disponibilidad de servicios de calibración de alta exactitud en magnitudes eléctricas de continua (resistencia, voltaje DC) para el nivel de referencia aún presenta restricciones operativas.

La brecha principal radica en la ausencia de un patrón de referencia de alta exactitud diseñado y construido en el país. Este vacío genera una dependencia tecnológica y económica que restringe la capacidad de calibrar equipos más avanzados, lo que frena la innovación en sectores estratégicos. El proyecto de la UTP se sitúa en esta brecha, proponiendo una solución tecnológica nacional, accesible y replicable que no requiere de los costosos patrones cuánticos de los INM internacionales, sino que se apoya en tecnologías electrónicas de precisión con una excelente relación costo-exactitud-reproducibilidad. La metodología implementada y los resultados de caracterización serán divulgados en entornos científicos de alto impacto, contribuyendo a la base de conocimiento global sobre diseño y optimización de patrones metrológicos en contextos de recursos limitados.

C. Contexto en la UTP

El Laboratorio de Variables Eléctricas de la Facultad de Ciencias Básicas de la UTP dispone actualmente de un patrón que corresponde a lo que se busca alcanzar con la materialización de esta propuesta. Esta infraestructura existente constituye un punto de referencia interno fundamental: permite

comparar directamente el prototipo desarrollado con el patrón disponible, validar los resultados de caracterización en un entorno controlado conocido, y garantizar que el nuevo instrumento supere o iguale las prestaciones del equipo de referencia actual, a un costo de desarrollo significativamente menor que su adquisición comercial.

III. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

A. Trazabilidad Metrológica y Cadena de Patrones

El concepto central del proyecto es la trazabilidad metrológica, definida como la propiedad de un resultado de medición por la cual este puede ser relacionado con una referencia a través de una cadena ininterrumpida y documentada de comparaciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medición. En la cima de esta cadena se encuentran los patrones primarios, basados en constantes fundamentales de la física. A partir de estos se derivan los patrones de referencia y, finalmente, los patrones de trabajo utilizados en laboratorios e industria [1].

Para que un patrón de trabajo pueda ser calibrado correctamente, el patrón de referencia empleado debe tener una incertidumbre al menos cuatro veces menor que la del instrumento a calibrar —criterio conocido como la regla 4:1. Esta exigencia justifica la necesidad de desarrollar patrones de referencia de alta exactitud a nivel local: sin ellos, la cadena de trazabilidad nacional queda truncada, y los instrumentos de trabajo no pueden ser calibrados con la incertidumbre requerida para aplicaciones de alta precisión.

B. Principios de Diseño: Caja de Décadas de Resistencia

El patrón propuesto se basa en el principio de caja de décadas de resistencia, un instrumento de precisión que permite seleccionar valores discretos de resistencia con alta exactitud y repetibilidad mediante un sistema de conmutación escalonado. La arquitectura por décadas (1 Ω, 10 Ω, 100 Ω, ...) garantiza que el usuario pueda configurar cualquier valor de resistencia dentro del rango nominal con una resolución definida por la década más baja. Este principio, maduro tecnológica y ampliamente validado en la literatura metrológica internacional, representa el equilibrio óptimo entre exactitud, versatilidad y costo de implementación para el contexto universitario.

Los requisitos clave de diseño son: (1) bajo coeficiente térmico de resistencia (TCR), que minimiza la variación del valor nominal con la temperatura; (2) alta estabilidad a largo plazo, que garantiza que el valor de resistencia no derive significativamente con el tiempo; (3) baja resistencia de contacto en los conmutadores, que evita la adición de valores inciertos a la resistencia seleccionada; y (4) protección electromagnética e isolación térmica, que reducen la influencia de factores ambientales externos sobre la medición. La conexión de cuatro hilos (método Kelvin) es un requisito de diseño irrenunciable para mediciones por debajo de 10 KΩ, ya que elimina la influencia de la resistencia de los cables de conexión del instrumento de medición.

C. Materiales: Manganina y Aleaciones de Alta Estabilidad

La manganina (aleación de cobre, manganeso y níquel, típicamente 86% Cu, 12% Mn, 2% Ni) es el material de referencia por excelencia para la fabricación de resistencias de precisión metrológica. Sus propiedades únicas incluyen un TCR extremadamente bajo (< 10 ppm/°C en el rango de 15 a 35 °C), una fuerza electromotriz de contacto con el cobre muy pequeña (< 1 µV/°C, crucial para evitar errores por efecto Seebeck en mediciones de bajo voltaje), y una excelente estabilidad a largo plazo cuando se somete a un proceso de envejecimiento térmico adecuado. Estas características la convierten en el material óptimo para los elementos resistivos del patrón [2][10].

Alternativas modernas a la manganina incluyen las resistencias de foil de precisión (como la tecnología Z-foil de Vishay), que ofrecen TCR de apenas 0.05–0.2 ppm/°C y estabilidades < 1 ppm/año. Aunque su costo por unidad es significativamente mayor que el de las resistencias de manganina bobinada convencional, su empleo en las décadas de mayor resolución (1 Ω y 10 Ω) puede justificarse por la mejora significativa en la incertidumbre total del patrón. El análisis costo-beneficio de estas alternativas de componentes forma parte de la Fase 1 del proyecto.

D. Incertidumbre de Medición (GUM) y Simulaciones de Monte Carlo

La caracterización metrológica del prototipo se realizará conforme a las directrices del "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM) [6], el documento de referencia internacional para el cálculo de incertidumbre. El GUM establece un marco unificado para identificar, cuantificar y combinar las distintas fuentes de incertidumbre (tipo A, evaluadas por métodos estadísticos, y tipo B, evaluadas por otros medios) en una incertidumbre combinada estándar, que luego se expande por un factor k para obtener la incertidumbre expandida con un nivel de confianza determinado (típicamente 95% para k = 2). Las fuentes de incertidumbre a considerar incluyen: la resolución del instrumento de medición de referencia, la deriva térmica de los componentes resistivos, la estabilidad de la fuente de corriente de excitación, la resistencia de los cables y conectores en la configuración de cuatro hilos, y la repetibilidad estadística de las mediciones.

Complementariamente al método analítico del GUM, se emplearán simulaciones de Monte Carlo conforme al suplemento 1 del GUM para evaluar la incertidumbre en casos donde la linealización de las ecuaciones de medición sea insuficiente. Este método numérico permite propagar las distribuciones de probabilidad de todas las entradas del modelo de medición a través de un número elevado de iteraciones (N > 10^6), obteniendo la distribución de probabilidad del mensurando y su incertidumbre expandida de forma directa, sin las limitaciones de la aproximación lineal de primer orden del método clásico. Esta aproximación es especialmente relevante para modelar el comportamiento del patrón bajo variaciones simultáneas de temperatura y humedad relativa.

IV. OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto es: Diseñar, construir y caracterizar un patrón de referencia de alta exactitud para

magnitudes eléctricas, que sirva como instrumento para la evaluación precisa de las características metrológicas de equipos de medición, y que contribuya a la generación de conocimiento y al fortalecimiento de la infraestructura metrológica nacional.

Los objetivos específicos son: (1) Realizar una revisión completa del diseño de patrones de referencia para magnitudes eléctricas, analizando tecnologías, componentes de alta precisión y metodologías de caracterización metrológica a nivel nacional e internacional; (2) Diseñar y modelar el circuito electrónico y la arquitectura del sistema, seleccionando componentes de alta estabilidad y optimizando la configuración para minimizar la incertidumbre y los factores de error como la deriva térmica y el ruido; (3) Construir un prototipo funcional del patrón de referencia, integrando lo necesario para su control, la adquisición de datos y la automatización de las pruebas; y (4) Caracterizar las propiedades metrológicas del prototipo, evaluando estabilidad, incertidumbre, linealidad y respuesta a factores ambientales, con validación mediante comparaciones con patrones de mayor jerarquía.

V. JUSTIFICACIÓN E IMPACTO ESTRATÉGICO

A. Impacto en el Desarrollo Industrial y la Competitividad

La creación de un patrón de referencia local de alta exactitud tiene un impacto directo y cuantificable en la competitividad industrial de la región. En el contexto colombiano, la calibración de un multímetro de 6,5 dígitos en un laboratorio acreditado del exterior puede costar entre USD 300 y USD 800 por instrumento, sin incluir costos de transporte y seguro internacional. Un laboratorio industrial con una flota de 20 instrumentos de medición eléctrica enfrenta gastos anuales de calibración que pueden superar los COP 50 millones, a los que se suman los costos de inoperatividad durante el tiempo de calibración externa. La disponibilidad de un patrón de referencia local permite que estos laboratorios realicen sus calibraciones internamente — o a través de laboratorios regionales acreditados— a una fracción de ese costo, liberando recursos para inversión en innovación y mejora de procesos.

Más allá del impacto económico directo, la exactitud en las mediciones eléctricas es un factor crítico de seguridad en múltiples sectores. En el sector energético, los errores en la medición de corriente y voltaje en sistemas de distribución pueden resultar en facturación incorrecta, dimensionamiento inadecuado de protecciones y, en casos extremos, fallas catastróficas de equipos. En el sector de dispositivos médicos, la calibración precisa de equipos electromédicos (desfibriladores, bombas de infusión, monitores de signos vitales) es un requisito regulatorio establecido en el Decreto 4725 de 2005 del Ministerio de Protección Social de Colombia, que exige que estos equipos sean calibrados con trazabilidad metrológica verificable. Un patrón de referencia local de alta exactitud fortalece directamente la infraestructura que garantiza el cumplimiento de esta normativa, con impacto directo en la seguridad de los pacientes.

B. Impacto en la Formación de Capital Humano Especializado

Colombia enfrenta una escasez significativa de profesionales con formación avanzada en metrología de precisión. Los programas de ingeniería eléctrica, física e instrumentación de las universidades colombianas incluyen contenidos básicos de metrología, pero raramente ofrecen a sus estudiantes la oportunidad de participar en el diseño y caracterización de instrumentos metrológicos de referencia. Este proyecto llena ese vacío de manera directa: cada estudiante que participa en el proyecto adquiere competencias prácticas en electrónica de precisión, diseño de PCB de bajo ruido, interpretación de normas internacionales (ISO/IEC 17025, GUM) y análisis estadístico de incertidumbre, competencias que los empleadores en sectores de alta tecnología valoran y que el mercado laboral actual demanda con creciente intensidad.

El modelo formativo adoptado no se limita a la participación en la ejecución de tareas técnicas. Los estudiantes vinculados participan en las discusiones de diseño, son autores secundarios de los informes técnicos, presentan resultados en los semilleros de investigación y son coautores de los productos de divulgación. Este nivel de participación plena en el ciclo investigativo —que incluye la formulación del problema, la revisión bibliográfica, el diseño experimental, la toma de datos, el análisis y la comunicación de resultados— es el que realmente transforma la experiencia estudiantil y produce investigadores con visión crítica y capacidad de trabajo autónomo.

C. Replicabilidad y Escalabilidad del Modelo

Un aspecto estratégico de especial relevancia es la replicabilidad del modelo de desarrollo propuesto. Al documentar exhaustivamente el proceso de diseño, los criterios de selección de componentes, los procedimientos de caracterización y los resultados de incertidumbre, el proyecto genera un manual técnico que puede ser utilizado por otras universidades regionales para construir sus propios patrones de referencia. Esta transferencia de conocimiento potencia exponencialmente el impacto del proyecto: si 5 universidades del Eje Cafetero y el occidente colombiano replican el modelo, se genera una red de referencia metrológica universitaria que eleva colectivamente la capacidad de calibración de la región, reduciendo la dependencia de los centros metrológicos ubicados en Bogotá y Medellín. Este objetivo de largo plazo está alineado con las políticas de descentralización científica del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCiencias) de Colombia.

VI. METODOLOGÍA

La metodología se estructura en cuatro fases consecutivas, cada una alineada con un objetivo específico, para garantizar un enfoque lógico, riguroso y trazable desde la revisión bibliográfica hasta la validación metrológica del prototipo.

A. Fase 1: Investigación y Análisis del Estado del Arte

Esta fase comprende una revisión bibliográfica exhaustiva de publicaciones científicas, normas metrológicas internacionales (BIPM [1], NIST, ISO/IEC 17025) y patentes relacionadas con patrones de referencia de magnitudes eléctricas. El enfoque se

orienta en tres frentes: identificación de tecnologías clave (amplificadores operacionales de bajo ruido, filtros activos y conmutadores de precisión); análisis de componentes pasivos de ultra exactitud (resistencias de película metálica con estabilidad < 5 ppm/año y TCR < 5 ppm/°C); y revisión de protocolos de caracterización empleados por los INM, incluyendo la evaluación de estabilidad a corto y largo plazo y el cálculo de incertidumbre según el GUM. Esta revisión provee las bases teóricas y tecnológicas que fundamentan las decisiones de diseño de las fases posteriores.

B. Fase 2: Diseño y Modelado del Patrón

La fase de diseño se desarrolla con herramientas de software especializadas en tres etapas. En primer lugar, el diseño del circuito esquemático del patrón, contemplando la arquitectura de conmutación por décadas, los nodos de conexión de baja resistencia de contacto y la distribución de los elementos resistivos de manganina. En segundo lugar, simulaciones de Monte Carlo para evaluar la sensibilidad del circuito a las tolerancias de los componentes y a la deriva por temperatura [11]; el análisis estadístico de estas simulaciones (N = 10^6 iteraciones) permite optimizar la configuración para minimizar la incertidumbre combinada del patrón e identificar los componentes que más contribuyen a la incertidumbre total, guiando la selección de especificaciones críticas. En tercer lugar, el diseño de la Placa de Circuito Impreso (PCB), prestando especial atención a técnicas de bajo ruido: apantallamiento electromagnético, planos de tierra dedicados y separación de planos de potencia y señal [12][16].

Un aspecto crítico del diseño es el manejo de las fuerzas electromotrices parásitas (FEM), que son tensiones generadas en las uniones de materiales diferentes (efecto Seebeck) cuando existen gradientes de temperatura. Para un patrón de resistencia, cualquier FEM parásita introduce un error sistemático que no puede eliminarse mediante promediado estadístico. Por esta razón, el diseño emplea el principio de conmutación de corriente directa e inversa (current reversal), que permite cancelar las FEM parásitas tomando la media aritmética de las mediciones de resistencia obtenidas con la corriente de excitación en ambas polaridades. Este procedimiento, estándar en metrología de precisión, requiere que el sistema de adquisición de datos tenga una velocidad de muestreo suficientemente alta para completar un ciclo de inversión de corriente antes de que las FEM parásitas varíen significativamente.

C. Fase 3: Construcción y Puesta en Marcha del Prototipo

La construcción del prototipo se inicia con la gestión de los componentes electrónicos seleccionados, asegurando trazabilidad de los proveedores y certificación de las resistencias de manganina. El ensamblaje de la PCB se realiza en un entorno controlado (sala de temperatura 23 ± 1 °C y humedad relativa 45 ± 10 %) para minimizar la contaminación y las tensiones mecánicas que podrían afectar la estabilidad de las soldaduras. Las soldaduras de los elementos resistivos de manganina se realizan con aleación de bajo punto de fusión (In-Ag) para minimizar las tensiones térmicas inducidas durante el proceso de soldadura, que podrían causar una deriva inicial en el valor de resistencia.

Después del ensamblaje, el prototipo se somete a un proceso de envejecimiento térmico acelerado (cycling térmico: 5 ciclos entre 10 °C y 50 °C, seguido de 72 horas de estabilización a 23 °C) para estabilizar los valores de resistencia y reducir la deriva inicial debida a tensiones mecánicas residuales en los materiales. Este proceso, documentado en los procedimientos de los INM de referencia, es un paso crítico para garantizar que el patrón alcance su estabilidad de largo plazo antes del inicio de los ensayos de caracterización formal. Se integra asimismo un sistema de adquisición de datos automatizado que registra continuamente los valores de resistencia, temperatura interior y exterior, y humedad relativa, permitiendo correlacionar la variabilidad de las mediciones con los factores ambientales.

D. Fase 4: Caracterización y Validación Metrológica

Esta fase es crítica y evalúa el desempeño real del prototipo mediante un conjunto de ensayos planificados conforme al GUM [6]. Los ensayos de estabilidad a corto plazo (horas–días) evalúan la repetibilidad y la respuesta a variaciones ambientales controladas de temperatura y humedad. Los ensayos de estabilidad a largo plazo (semanas–meses) permiten cuantificar la deriva temporal del patrón, que es uno de los indicadores metrológicos más importantes para un instrumento de referencia. Los ensayos de linealidad verifican que la relación entre el valor nominal seleccionado y el valor medido sea lineal dentro de los límites de especificación en todo el rango de operación.

VII. PRODUCTOS ESPERADOS

Los productos del proyecto se distribuyen en seis categorías conforme a la tipología de MinCiencias, garantizando un impacto integral en la generación de conocimiento, la formación de recursos humanos y la apropiación social de la ciencia.

A. Generación de Nuevo Conocimiento

El producto central de esta categoría consiste en la radicación de una solicitud de patente de invención ante la oficina de propiedad industrial (ej. SIC). Este activo busca proteger el nuevo patrón metrológico, el cual presenta un diseño original de hardware y una arquitectura de PCB optimizada que cumplen con los requisitos de novedad, nivel inventivo y aplicación industrial.

A diferencia de una publicación en revistas, este producto prioriza la protección jurídica de la innovación, permitiendo que el conocimiento derivado del diseño, los algoritmos de procesamiento y los resultados de caracterización permanezcan bajo control del equipo investigador como un activo estratégico.

Productos Complementarios: Documentación Técnica de Soporte

1) Pliego de Reivindicaciones: Documento legal-técnico que delimita el alcance de la invención y sus componentes disruptivos.

2) Memoria Técnica Descriptiva: Un documento exhaustivo que consolida el know-how del proceso de diseño, montaje y validación metrológica. Esta memoria servirá como base para la transferencia tecnológica y asegurará la trazabilidad del conocimiento especializado generado durante el desarrollo del prototipo.

B. Formación de Recursos Humanos

El proyecto vincula activamente a estudiantes de pregrado de Ingeniería Física e Ingeniería Eléctrica de la UTP en todas las fases de desarrollo. Se proyecta la dirección de al menos dos trabajos de grado de pregrado directamente relacionados con el proyecto: uno orientado al diseño electrónico y la simulación del patrón, y otro a la caracterización metrológica y el cálculo de incertidumbre. Este modelo de formación en investigación aplicada produce egresados con competencias avanzadas en metrología de precisión, una de las áreas con mayor demanda y menor oferta de talento especializado en Colombia.

C. Productos Tecnológicos

El producto tecnológico central es el prototipo funcional certificado del patrón de referencia de baja incertidumbre para magnitudes eléctricas. El prototipo será sometido a los ensayos de caracterización metrológica establecidos en la Fase 4, generando un certificado de caracterización con la incertidumbre expandida documentada. Este instrumento quedará disponible como recurso de laboratorio en la FCB de la UTP, fortaleciendo la infraestructura metrológica institucional para futuras investigaciones y servicios de calibración.

D. Apropiación Social y Divulgación

Se desarrollarán talleres de mínimo 8 horas dirigidos a estudiantes vinculados a semilleros de investigación, cubriendo fundamentos de metrología eléctrica, diseño de patrones de precisión e interpretación de certificados de calibración. Adicionalmente, se producirán contenidos digitales de divulgación (videos técnicos, infografías animadas) que expliquen el valor de la soberanía metrológica y el proceso de desarrollo del patrón, destinados a audiencias académicas e industriales. La propuesta participará con ponencia en el evento institucional de la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la UTP.

VIII. CRONOGRAMA

El proyecto se ejecuta en un período de 24 meses, distribuidos en las cuatro fases metodológicas. La Tabla I presenta el cronograma de actividades

TABLA I. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES (DURACIÓN EN MESES)

Actividad	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
Identificación de tecnologías clave	1–3	—	—	—
Análisis de componentes	1–3	—	—	—
Protocolos de caracterización	2–5	—	—	—
Diseño de circuito	—	4–8	—	—
Simulación y optimización (Monte Carlo)	—	5–8	—	—
Diseño de PCB	—	6–10	—	—
Implementación de componentes	—	—	9–12	—
Ensamblaje y soldadura del prototipo	—	—	10–14	—
Diseño de ensayos metrológicos	—	—	—	12–16
Recopilación y análisis de datos	—	—	—	15–21
Cálculo de incertidumbre y calibración	—	—	—	17–24

IX. RESULTADOS PRELIMINARES Y DISCUSIÓN

A. Revisión del Estado del Arte

La primera fase del proyecto ha permitido consolidar un marco de referencia tecnológico robusto. La revisión de publicaciones especializadas y documentos normativos del BIPM y el NIST confirma que el diseño basado en resistencias de manganina con arquitectura de caja de décadas es la aproximación tecnológica más adecuada para el rango de incertidumbre objetivo del proyecto (< 50 ppm). Se identificaron como componentes clave las resistencias de película metálica de ultra precisión (Vishay/Foil Resistors, serie Z-foil, con TCR < 0.2 ppm/°C y estabilidad < 1 ppm/año) y los conmutadores de relé de bajo ruido térmico (< 0.5 µV/°C de fuerza electromotriz de contacto).

La revisión de los manuales técnicos de cajas de décadas de referencia comerciales —como la serie HARS-X de IET Labs [18]— permitió establecer las especificaciones de diseño objetivo del prototipo: TCR total del sistema < 20 ppm/°C en el rango 18–28 °C, deriva anual < 50 ppm/año, y resistencia de contacto < 5 mΩ por posición de conmutación. Estas especificaciones fueron adoptadas como criterios de aceptación para la fase de caracterización metrológica.

La revisión del estado del arte nacional confirmó que ningún laboratorio universitario colombiano ha documentado públicamente el desarrollo y caracterización completa de un patrón de referencia eléctrico de este tipo. Esta ausencia en la literatura científica nacional refuerza la pertinencia y la originalidad del proyecto, y delimita con claridad el vacío de conocimiento que se busca llenar. La ausencia de documentación no implica que no existan esfuerzos similares en el país, pero sí evidencia que los resultados no se han difundido en canales científicos de impacto, lo que limita la transferencia de conocimiento entre instituciones.

B. Diseño Conceptual del Prototipo

En la fase de diseño se ha definido la arquitectura general del prototipo. El sistema contempla cinco décadas de resistencia (1 Ω, 10 Ω, 100 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ), con valores nominales seleccionados mediante un sistema de conmutación de relés programables de baja resistencia de contacto. La conexión de cuatro hilos (Kelvin) elimina la resistencia de los cables de

medición. El diseño de la PCB incorpora planos de tierra dedicados, apantallamiento Faraday y disipadores térmicos en los elementos resistivos para minimizar los gradientes de temperatura internos que afectan el TCR efectivo del sistema.

La carcasa exterior está diseñada con materiales dieléctricos de alta resistencia y baja absorción de humedad (PTFE y policarbonato reforzado), que minimizan las corrientes de fuga que podrían afectar las mediciones de alta resistencia. La ventilación interior está diseñada para establecer convección natural controlada que homogeneice la distribución de temperatura en el interior del instrumento, sin introducir vibraciones mecánicas que pudieran afectar los contactos de los conmutadores.

C. Impacto Formativo

Un resultado transversal de especial valor es el impacto formativo del proyecto. Durante las fases iniciales, dos estudiantes de pregrado de Ingeniería Física han participado activamente en la revisión bibliográfica y en la configuración de las herramientas de simulación. Este proceso ha fortalecido sus competencias en metrología, diseño electrónico de bajo ruido e interpretación de normas internacionales. La metodología de participación estudiantil adoptada con roles definidos, entregables intermedios y evaluación por parte del equipo docente constituye en sí misma un modelo pedagógico de investigación formativa que puede replicarse en otros proyectos de la FCB. La UTP no solo construye un instrumento: construye capacidad humana e institucional que permanece y multiplica su impacto en el ecosistema científico regional.

D. Alineación con el ODS 9

El proyecto se alinea de manera directa y contundente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), específicamente con las metas 9.4 (modernizar la infraestructura industrial para hacerla sostenible), 9.5 (aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica) y 9.B (apoyar el desarrollo tecnológico nacional). La medición precisa de magnitudes eléctricas es fundamental para la eficiencia energética industrial: un mejor patrón de medición permite a las industrias identificar fugas de energía, optimizar procesos y operar de forma más sostenible. Al proveer una herramienta local de alta exactitud, el proyecto reduce los costos y tiempos de calibración, permitiendo que los laboratorios sean más eficientes y competitivos en el mercado global, contribuyendo así al fortalecimiento de un ecosistema de innovación científico-tecnológica en el Eje Cafetero.

X. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado el avance de un proyecto de innovación tecnológica de la Universidad Tecnológica de Pereira orientado a construir soberanía metrológica a través del diseño, construcción y caracterización de un patrón de referencia de baja incertidumbre para magnitudes eléctricas. Las conclusiones principales son:

1) La dependencia tecnológica en metrología eléctrica es un obstáculo real y cuantificable para la competitividad científica e industrial de Colombia. El desarrollo de patrones locales de referencia es estratégicamente necesario y técnicamente viable con los recursos humanos y la infraestructura disponibles en la UTP, a un costo de desarrollo estimado entre 3 y 5 veces inferior al de adquisición de equipos comerciales equivalentes.
2) El diseño basado en resistencias de manganina con arquitectura de caja de décadas, sistema de conmutación Kelvin de cuatro hilos y técnica de inversión de corriente.
3) El modelo de desarrollo tecnológico endógeno con participación activa de estudiantes de pregrado genera un valor formativo de alto impacto, construyendo capacidades avanzadas en metrología de precisión, diseño electrónico de bajo ruido e interpretación de

normas internacionales que el mercado laboral nacional demanda crecientemente.

1) La sección de justificación estratégica del proyecto demuestra que el impacto del patrón trasciende el laboratorio universitario: su disponibilidad local fortalece la cadena de trazabilidad metrológica regional, reduce costos de calibración para la industria, contribuye a la seguridad de sistemas electromédicos e industriales, y establece un precedente replicable para otras universidades del país.

El análisis de riesgos del proyecto identifica tres factores críticos de éxito que deben gestionarse activamente: (1) la disponibilidad de resistencias de manganina certificadas con trazabilidad a INM, que depende de proveedores internacionales con tiempos de entrega variables; se mitiga con adquisición anticipada y evaluación de alternativas tecnológicas (foil de precisión); (2) la estabilidad del entorno ambiental del laboratorio durante la fase de caracterización, que requiere condiciones de temperatura y humedad controladas durante semanas; se mitiga con la instalación de un sistema de monitoreo continuo y un protocolo de interrupción y reanudación de ensayos; y (3) la continuidad del equipo de estudiantes vinculados, que puede verse afectada por cambios de semestre o graduación; se mitiga con un protocolo de transferencia de conocimiento documentado y la vinculación progresiva de nuevos integrantes al semillero de investigación.

Como trabajo futuro inmediato, se proyecta completar las fases 3 y 4 (construcción y caracterización metrológica del prototipo), con estimación de finalización en el segundo semestre de 2026. En el mediano plazo, se proyecta iniciar el proceso de acreditación del Laboratorio de Variables Eléctricas con el nuevo patrón como instrumento de referencia. En el largo plazo, la metodología de diseño documentada será transferida a otras universidades regionales, con el objetivo de construir una red de referencia metrológica universitaria del Eje Cafetero que eleve colectivamente la capacidad de calibración de la región.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Facultad de Ciencias Básicas y a la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira por el respaldo institucional y la financiación de este proyecto de innovación tecnológica. Se reconoce especialmente

la participación de los estudiantes vinculados al grupo de investigación GIMB del Laboratorio de Variables Eléctricas de la FCB, cuyo trabajo comprometido en cada una de las fases ha sido determinante para el avance del proyecto. Este trabajo se enmarca en el compromiso de la UTP con la soberanía científica y tecnológica de la región y del país, y con la formación de investigadores capaces de enfrentar los desafíos metrológicos de la industria colombiana del siglo XXI.

REFERENCIAS

[1] BIPM –CIPM, Consultative Committees of the CIPM. Bureau International des Poids et Mesures, 2005.

[2] «Certificado de calibración — suministros en metrología», [En línea]. Disponible: https://suministrosenmetrologia.com/certificado-de-calibracion/

[3] M. Botello Pérez, I. García Ruiz y D. Covarrubias Martínez, «Sistema de referencia para la calibración de detectores de potencia por comparación directa», Simposio de Metrología 2012, Querétaro, México.

[4] ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. ISO/IEC, Ginebra, 2017.

[5] INVIMA, Requisitos e interpretación de certificados de calibración, Bogotá, Colombia, 2020.

[6] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAP, OIML, 2008.

[7] «Importancia de la acreditación de laboratorios», [En línea]. Disponible: https://mundominero.com.ec/importancia-acreditacion-laboratorios/

[8] V. Molina-López, M. Botello-Pérez e I. García-Ruiz, «Validation of the Open-Area Antenna Calibration Site at CENAM», IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 58, no. 4, pp. 1126–1134, abr. 2009.

[9] «Sistemas de medición y metrología», Revista Científica HIGIA, vol. 5, no. 2, 2022. [En línea]. Disponible: https://www.itsup.edu.ec/myjournal/index.php/Higia/article/view/804

[10] D. Avilés, D. Hernández y E. Navarrete, «Desarrollo de un divisor resistivo para calibración de voltímetros y nanovoltímetros en los intervalos de mV», Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2007, CENAM, Querétaro, México.

[11] M. A. Rodríguez y D. Hernández, «Validación del método de calibración para multímetros de 8½ dígitos en tensión eléctrica continua», Simposio de Metrología 2012, Querétaro, México.

[12] J. Ishii, T. Fukuzaki, T. Kojima y A. Ono, «Calibration of Infrared Ear Thermometers», en Tempmeko 2001 Proc., vol. 2, PTB & VDI/VDE-GMA, Berlín, 2002, pp. 729–734.

[13] «Conclusiones en metrología y trazabilidad», Colegio Mayor de Antioquia, 2024. [En línea]. Disponible: https://www.colmayor.edu.co/wp-content/uploads/2024/05/3.- Conclusiones-1.pdf

[14] D. Cárdenas García y E. Méndez Lango, «Blackbody for metrological control of otic thermometers», 9th International Temperature Symposium (ITS-9), Anaheim, California.

[15] D. Cárdenas García y E. Méndez Lango, «Método para estimar la corrección en temperatura debida a la emisividad espectral de un calibrador plano», Simposio de Metrología 2012, Querétaro, México.

[16] Circular T of the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). BIPM, París, publicación mensual.

[17] S. García Duarte y O. González Rodríguez, «Metodología para la medición de la conductividad térmica de materiales de construcción», ENME 2012, CENAM, Querétaro.

[18] IET Labs, «HARS-X Series Precision Decade Resistance Standards — Instruction Manual», 2023. [En línea]. Disponible: https://www.ietlabs.com/pdf/Manuals/HARS-X_im.pdf

[19] NIST, «Calibration Services — Resistance», National Institute of Standards and Technology, [En línea]. Disponible: https://www.nist.gov/calibrations/resistance

FPGA-based Hardware Architecture for Data Preprocessing in Electrochemical Signals using PCA

Johan Ruiz
Department of Electrical and Electronics Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
jruizar@unal.edu.co

Diego Tibaduiza
Department of Electrical and Electronics Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
dtibaduizab@unal.edu.co

Maribel Anaya
Department of Electrical and Electronics Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
manaya@unal.edu.co

***Abstract*—This work presents a hardware architecture implemented on an FPGA board for classifying signals acquired from an electronic tongue system powered by a potentiostat. The proposed design integrates an Xilinx Soft IP Core Zynq processor with the FPGA hardware components, performing preprocessing through normalization and Principal Component Analysis (PCA) by badges to reduce the dimensionality of the input data for efficiency purposes, aiming to be used in the training and validation of a neural network for the classification of electrochemical signals. The processing flow enables efficient real-time data handling while leveraging the inherent parallelism and low latency of FPGA platforms. As a case study, a dataset from an electronic tongue with 8 sensors was used to inspect the presence of microplastics and heavy metals in some sample water. This dataset consists of three classes: pure water, water with microplastics, and water contaminated with cadmium. The results demonstrate the feasibility of the proposed architecture for data preprocessing based on software-hardware codesign, highlighting its potential for embedded systems in environmental monitoring and contaminant detection in water.**

***Keywords*—FPGA, PCA, preprocessing, Zynq processor, electrochemical signals.**

I. Introduction

Electrochemical analysis encompasses a suite of techniques that measure the electrical properties of chemical systems to gain insights into their composition, reactivity, and dynamic processes. These techniques, such as potentiometry, amperometry, and voltammetry, are widely used for the detection and quantification of ions, molecules, and biomolecules in various environments. Electrochemical analysis is particularly valued for its sensitivity, selectivity, and real-time monitoring capabilities, and its applications include environmental monitoring, biomedical diagnostics, industrial process control, and food safety, making it a versatile tool for both research and practical applications. In environmental science, for instance, electrochemical sensors are instrumental in detecting pollutants, heavy metals, and other contaminants at trace levels, thereby supporting efforts in pollution assessment and ecosystem health monitoring. However, the data obtained through these techniques must be processed to ensure proper analysis and integration with other emerging technologies, such as machine learning and artificial intelligence, which in turn enables the development of embedded systems capable of combining the capabilities required for the applications described.

One of the devices that has generated the most interest for the purposes described above is field-programmable gate arrays (FPGAs). The use of FPGAs and embedded systems offers several key advantages: real-time processing capabilities, low latency, parallel architecture, and hardware reconfigurability, all of which significantly enhance acquisition and control performance in electrochemical systems [1], [2]. For example, FPGA-based approaches have been used for automatic peak detection in cyclic voltammetry [2], demonstrating that these devices can efficiently handle electrochemical signal processing. Likewise, functional embedded potentiostats have been developed using microcontrollers, enabling cyclic voltammetry and impedance spectroscopy in portable platforms [3], [4].

In this context, this work proposes a first step toward the integration of electrochemical systems and FPGA through the implementation of the Principal Component Analysis (PCA) algorithm for the preprocessing of electrochemical sensor data based on hardware-software co-design on an FPGA. The utility of the proposal lies in its ability to address one of the main challenges in handling this type of data, the increase in dimensionality resulting from the use of sensor arrays, thereby

optimizing the input needed to develop efficient, fast, and scalable platforms for electrochemical measurements in demanding or mobile environments, aimed at real-time processing of electrochemical sensors.

II. Theoretical Background

A. Principal Component Analysis

Principal Component Analysis (PCA) is a classical multivariate statistical technique used to transform a set of possibly correlated variables into a set of linearly uncorrelated variables called principal components [5], [6]. The transformation is defined such that the first principal component has the largest possible variance (i.e., accounts for as much of the variability in the data as possible), and each succeeding component in turn has the highest variance possible under the constraint that it is orthogonal to the preceding components, as shown in Figure 1) [7], [8].

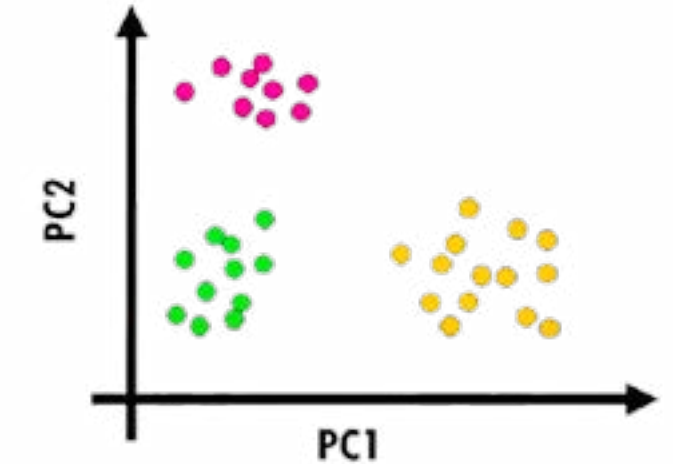


Fig. 1. Projection of data onto the first two principal components, illustrating variance maximization and orthogonality.

Given a centered data matrix X ∈ Rn × p (with n observations and p variables), PCA can be computed either via the eigendecomposition of the covariance matrix (equation (1)) or via the singular value decomposition (SVD) of X.

$$C = \frac{1}{n-1} X^T X \tag{1}$$

So, to calculate the eigenvalues and eigenvectors:

$$C v_k = \lambda_k v_k \tag{2}$$

Where the eigenvector v_k is the loading vector for the k−th principal component, and λ_k is the corresponding variance (eigenvalue). The principal component scores for the observations are given by [6], [9]:

$$t_k = X v_k \tag{3}$$

PCA is widely used for dimensionality reduction, visualization, noise reduction, and feature extraction. The proportion of variance explained by each component is described by equation 4, and a screen plot of PV_k versus component index is commonly used to select an appropriate number of components [7], [10].

$$PV_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{j=1}^{p} \lambda_j} \tag{4}$$

Despite its simplicity, PCA has limitations: it is a linear method (cannot capture nonlinear structure), is sensitive to variable scaling (standardization is often required), and may mix signal and noise if the eigenvalue spectrum decays slowly. Modern variants and extensions address some of these issues (kernel PCA, sparse PCA, probabilistic PCA), and recent reviews summarize developments and best practices [8], [9].

B. Zynq 7000

The Zynq-7000 is a family of System-on-Chip (SoC) devices developed by Xilinx (now part of AMD), combining a dual-core ARM Cortex-A9 processor with Xilinx's 7-series Field-Programmable Gate Array (FPGA) logic [12]. This architecture provides a blend of high-performance processing and programmable logic, enabling designers to implement custom hardware accelerators, real-time control, and flexible interfaces alongside powerful general-purpose computing.

III. PCA Implementation

The dataset used in this evaluation is explained in [13]. This is a dataset from an electronic tongue with 8 sensors, which allows for the collection of data to determine the presence of microplastics and heavy metals in a sample of water. This dataset consists of three classes: pure water, water with microplastics, and water contaminated with cadmium. In this case, not all the cases in [13] were evaluated.
The PCA algorithm was implemented on a Zybo Z7-10 FPGA from the ZYNQ-7000 family through hardware-software integration, allowing the processor available on the board to be used to optimize execution. The AMD Vivado-Vitis platform was used for development, integrating block design for the necessary physical assignments with C++ code for the algorithm's operating logic, which simplified the workflow required to perform matrix operations optimally in terms of processing time.

Thus, it was necessary to implement each of the steps that make up the PCA algorithm, as there were no specialized libraries available for direct use in preprocessing float-type data, as is the case with SciKit-Learn in Python. For mathematical operations between matrices, the C++ Eigen/Dense library was used, which was instantiated in the project and allowed the calculation of eigenvalues and eigenvectors from the input data matrix. Below is a detailed description of each of the components of the proposed architecture.

A. Hardware design

To implement the algorithm in the FPGA, it was necessary to start with a hardware architecture that instantiated the physical components required for its execution, corresponding to the board's Zynq processor, BRAM memory, and a general-

purpose input/output interface (AXI GPIO) for managing LEDs as indicators for the user. On the Vivado platform, the design is block-based, so a block design that includes the aforementioned components was created, along with the required intermediate blocks used for interconnection between them, as shown in Figure 2.

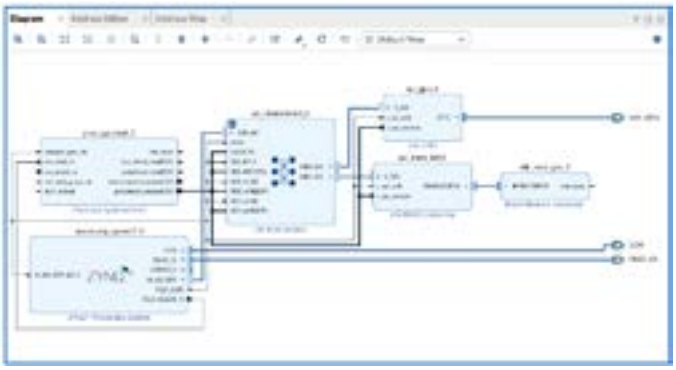


Fig. 2. Proposed block diagram

The ZYNQ Processing System block is initially observed, which is responsible for establishing the operating parameters of the FPGA processor and activating the necessary controllers for managing peripherals in the implementation. The UART was selected to display the process and results of the algorithm, and the GPIO was selected to manage the board's LEDs. In addition, the QUAD SPI integrated into the board was selected as the memory, so that the flash interface could be used to store input and intermediate data during execution, with a clock speed of 200 MHz. The processor, on the other hand, operated at 667 MHz, the maximum clock rate allowed by the board, while the system reset was provided by the Processor System Reset block, which was connected to both the processor and the other components to restart the algorithm if required.

The next set of blocks corresponded to the management of peripherals through AXI Interconnect, which is an IP core that connects master interfaces (in this case, the processor) with slave interfaces (corresponding to peripherals and memory), receiving the processor clock and reset signal (unique for all interfaces in the design) as inputs. The block was connected to AXI GPIO, a slave controller that manages the board's own peripherals, automatically assigning them connection pins. The board has 4 LEDs called led 4bits, so they were added to the block diagram.

The memory, on the other hand, was instantiated from the AXI BRAM Controller block, which allowed the local BRAM memory of the board (slave) to be managed by parameters through the processor (master), with low latency and optimized performance. The data width was set to 32 bits, the smallest available, allowing resources to be optimized without reducing data quality. The parameters defined in the controller were passed to the Block Memory Generator block, which connected the board's physical memory to the design. It is important to note that this component was also handled as a peripheral, so it was necessary to connect it as an output of the AXI Interconnect block, for the reasons explained above.

Thus, the proposed hardware architecture was the basis for further development, allowing for the optimization of the resources used in the FPGA. The design was validated, synthesized, and implemented to obtain the hardware specification file (XSA), on which the application containing the PCA algorithm was developed.

B. Software design

With the hardware platform exported, a C++ application containing the algorithm code was created in Vitis. To simplify matrix multiplication, the open-source Eigen/Dense library was used, which supports linear algebra between dense matrices and vectors, allowing eigenvalue operations to be performed in a much more intuitive and straightforward manner. It should be noted that, although the operating logic was defined by the C++ code, it was necessary to include the libraries specific to the exported platform for peripheral management, corresponding to cstdio and xil_io.

Delving deeper into the software implementation, the first step was to import the actual data from the dataset and load it into the FPGA's BRAM memory, creating a fixed matrix of signed float values (32 bits). Due to the resource limitations of the FPGA associated with a RAM size of 270 KB for the reference used, it was necessary to use fixed matrix in every case and to separate the entire dataset into badges of 30 rows (300 values) for principal component analysis, following the structure with which it was constructed, processing each badge completely before moving on to the next. Once loaded, the values in the X matrix were standardized as a first step, ensuring that they all maintained the same scale so that the mathematical analysis would be correct and that the first component would have the direction of maximum variance, following the equation:

$$Z_i = \frac{x_i - \mu}{w} \tag{5}$$

Where μ is the mean and ω is the standard deviation of the variable (each column), corresponding to the values of an individual sensor. Thus, equation (5) is applied to each row, ensuring the centralization of the values and each of the steps described in the PCA algorithm was then developed. The Eigen/dense library was necessary to simplify the calculation of eigenvalues and eigenvectors, thanks to the SelfAdjoin tEigenSolver function, which received the covariance matrix as input. To construct the principal component matrix, the result was projected onto the original matrix. A series of visual indicators were added for the user during the process, corresponding to the lighting of the LEDs included in the hardware design at the end of each step to ensure its proper execution.

C. Additional considerations

In the hardware-software integration, it was important to consider that every instantiation of a hardware component within the C++ code required the explicit indication of its address according to the definitions generated during the platform synthesis; therefore, the use of BRAM memory and peripherals had to be hardcoded when called from the software.

The software design was built and debugged prior to execution, ensuring that the co-design was correct and could be executed on the FPGA.

IV. RESULTS

Once the design is built and launched on the hardware (FPGA), the algorithm begins to run on the input data. The results can be read through a terminal emulator such as Teraterm or Putty, performing a serial read on the port to which the FPGA is connected at a rate of 115200 baud. For ease of viewing, it has been divided into five parts:

- Original data: Input data.
- Standardized data: Standardized matrix with equation (5).
- Eigenvalues: Explained variance.
- Principal components: Matrix for projecting the data.
- Projected data: PCA results.

Based on the eigenvalue matrix, the ratio of explained variance achieved by adding a certain number of components was estimated, considering that a percentage between 90% and 95% was sufficient to ensure adequate representation of the data while reducing the input dimensionality. The resulting plot is shown in Figure 3

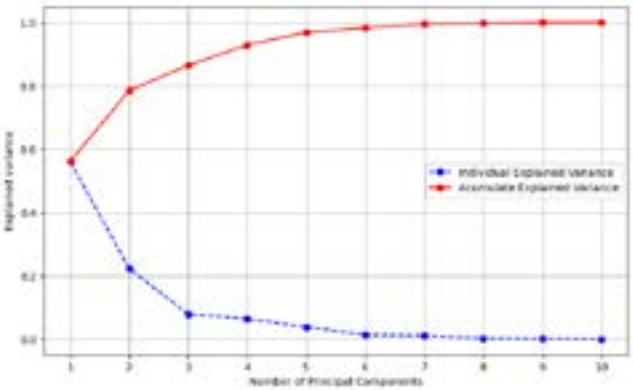


Fig. 3. Explained variance ratio per component

In this way, it was found that seven dimensions were adequate for the objective of this work, significantly reducing the data load required for the subsequent implementation of a neural network and simplifying the representation of pure and contaminated water values. The result for the first five rows of the dataset can be seen in Figure 4.

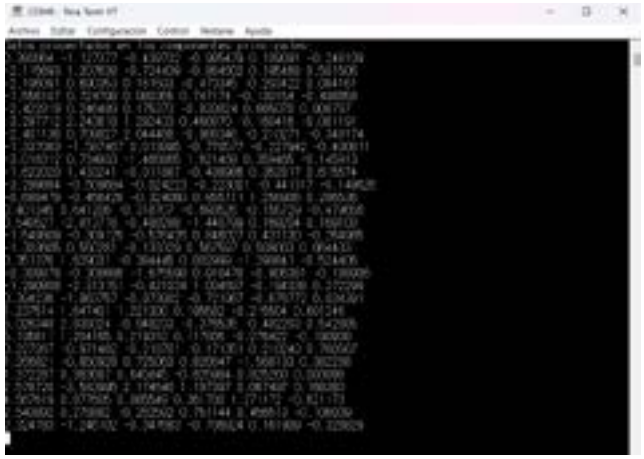


Fig. 4. Result of the implementation of the algorithm

The implemented algorithm took 0.62 seconds to run without requiring excessive FPGA resources and responding efficiently during the BRAM memory read stage. Additionally, as observed, it has a maximum precision of six decimal places, which is adequate for representing the original values of the dataset without affecting its accuracy. Furthermore, in general, a single component was sufficient to explain the variability of the chemical measurement data in the dataset.

However, in order to make a meaningful comparison of the implementation carried out through hardware-software codesign, the algorithm was implemented in Python using the specialized libraries Sci-Kit Learn StandardScaler and PCA, which allowed it to be applied quickly and easily. As an additional consideration, it was taken into account that the ddof parameter of StandardScaler should be 1, recalling equation (1) with a degree of freedom n − 1, since this function uses n by default. The results are shown in Table I.

TABLE I. COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN IMPLEMENTATIONS

Characteristic	Current work	Python-based
Explained Variance Ratio	*97.3%*	*98.17%*
Precision	*6 decimals*	*8 decimals*
Run time	*0.62 s*	*0.57 s*

V. CONCLUSION

The implementation of Principal Component Analysis (PCA) on the Zynq-7000 platform demonstrates the strength of combining ARM processing with FPGA acceleration. By leveraging the parallelism of the programmable logic, compute-intensive steps in PCA—such as covariance matrix calculations and eigenvalue decomposition—can be significantly accelerated. This results in reduced latency and improved throughput, making real-time data analysis feasible in embedded applications. Overall, Zynq-7000 enables efficient, flexible, and scalable deployment of

advanced machine learning algorithms like PCA, supporting a wide range of signal processing and data analytics tasks in resource-constrained environments.

References

[1] M. Carminati and G. Scandurra, “Impact and trends in embedding field programmable gate array in scientific instrumentation,” Review of Scientific Instruments, vol. 92, no. 9, p. 091501, 2021.

[2] T. Schirmer and F. Stradolini, “Fpga-based approach for automatic peak detection in cyclic voltammetry,” in 2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), 2016, pp. 65–68.

[3] A. I. Mu˜noz-Mart´ınez, O. I. G´omez Pe˜na, J. Colomer-Farrarons, J. M. Rodr´ıguez-Delgado, A. ´Avila-Ortega, and G. Dieck-Assad, “Electro-chemical instrumentation of an embedded potentiostat system (eps),” Sensors, vol. 18, no. 12, p. 4490, 2018.

[4] D. Bill et al., “Electrochemical methods in the cloud: Freistat, an iot-enabled embedded potentiostat,” Analytical Chemistry, vol. 95, no. 35, pp. 13 003–13 009, 2023.

[5] H. Hotelling, “Analysis of a complex of statistical variables into principal components,” Journal of Educational Psychology, vol. 24, no. 6, pp. 417–441, 1933.

[6] I. T. Jolliffe, Principal Component Analysis, 2nd ed. New York: Springer, 2002.

[7] H. Abdi and L. J. Williams, “Principal component analysis,” Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, vol. 2, no. 4, pp. 433–459, 2010.

[8] J. Shlens, “A tutorial on principal component analysis,” arXiv, Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1404.1100

[9] T. Jolliffe and J. Cadima, “Principal component analysis: a review and recent developments,” Philosophical Transactions of the Royal Society A, vol. 374, no. 2065, p. 20150202, 2016.

[10] J. VanderPlas, Python Data Science Handbook. O’Reilly Media,

[11] 2016, chapter: Principal Component Analysis. [Online]. Available: https://jakevdp.github.io/PythonDataScienceHandbook/

[12] L. Crockett, R. Elliot, M. Enderwitz and R. Stewart. “The Zynq book: embedded processing with the ARM Contex-A9 on the Xilinx Zynq-7000 all programmable soc” Strathclyde Academic Media, Glasgow, United Kingdom ISBN: 099297870X. Published: 14 July 2014

[13] L.A. Peña, J. P. Hoyos-Sanchez, J.D. Sarmiento, M.V.S. Rincón, D.A. Tibaduiza. Detection of Microplastics and Heavy Metals Using Electronic Tongues and Machine Learning. *Sensors* 2026, *26*, 3054. https://doi.org/10.3390/s26103054

Evaluación de Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLMs) mediante Fine-Tuning para la Optimización de la Geocodificación en Registros de Cáncer

Ricardo Timarán Pereira
Departamento de Sistemas
Universidad de Nariño
San Juan de Pasto, Colombia
ritimar@udenar.edu.co

Jonathan Viveros Córdoba
Departamento de Sistemas
Universidad de Nariño
San Juan de Pasto, Colombia
jonathanviveros@udenar.edu.co

Andrés Calderón Romero
Departamento de Ing. de Sistemas
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C., Colombia
andrescalderonr@javeriana.edu.co

***Resumen*— La integridad del análisis espacial en epidemiología depende críticamente de la precisión en la geolocalización de los casos. Sin embargo, los sistemas deterministas tradicionales suelen fallar ante direcciones no estructuradas o con inconsistencias sintácticas, lo que genera una pérdida de datos significativa. Para superar estas limitaciones, se aplicó una metodología híbrida para la normalización de direcciones en el Registro Poblacional de Cáncer del Municipio de Pasto (RPCMP), centrada en aquellas entradas no reconocidas por el geocodificador determinista del sistema YACHAY-SIG. La arquitectura propuesta se fundamenta en un pipeline de geocodificación de dos fases: una ejecución primaria contra la base de datos espacial (PostGIS) para nomenclaturas estándar, seguida de una estrategia de recuperación (fallback) basada en inteligencia artificial. El estudio incorpora un diagnóstico exhaustivo de la calidad de los datos mediante técnicas de vectorización TF-IDF y Word2Vec, permitiendo una caracterización semántica previa de las inconsistencias en el conjunto de datos. Asimismo, se presenta una evaluación rigurosa de diversos Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLMs) actuando como agentes de Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP) para la interpretación y corrección de cadenas de texto ambiguas. Con el objetivo de maximizar la eficiencia computacional en entornos de infraestructura tecnológica limitada, se ejecutó un ajuste fino supervisado (SFT) a través de la técnica de adaptación de bajo rango (LoRA). Los resultados experimentales demuestran la alta eficacia de esta técnica. El modelo Gemma 3 4B-IT alcanzó el rendimiento superior con una precisión del 98.67%, superando a Llama 3.2 3B Instruct, que obtuvo un 96.67%. Esta colaboración tecnológica no solo optimiza la integridad del análisis geoespacial del RPCMP, sino que establece un marco de trabajo escalable y replicable para la ingeniería de datos en otros contextos de salud pública.**

Palabras Clave—ajuste fino, modelos a gran escala, análisis especial, registro poblacional de cáncer, municipio de Pasto.

I. Introducción

La integridad del análisis espacial en epidemiología depende críticamente de la precisión en la geolocalización de los casos. La evaluación de la calidad de los datos espaciales en los registros de cáncer es un pilar fundamental para garantizar la comparabilidad y validez de los estudios de vigilancia en salud pública [1]. El Registro Poblacional de Cáncer del Municipio de Pasto (RPCMP), mediante el sistema inteligente YACHAY-SIG, busca optimizar la gestión del conocimiento oncológico; sin embargo, se enfrenta a un desafío técnico persistente: los sistemas de geocodificación deterministas tradicionales suelen fallar ante direcciones no estructuradas, rurales o con inconsistencias sintácticas, lo que genera una pérdida de datos espaciales significativa.

El problema de la normalización de direcciones ha sido abordado mediante diversas técnicas computacionales. En el ámbito de la salud, Sayers et al. [2] han implementado algoritmos de fuzzy matching para vincular registros, y Santos et al. [3] han explorado el uso de redes neuronales para la resolución de entidades geográficas. No obstante, estos métodos presentan limitaciones algorítmicas severas ante variaciones semánticas complejas y topología informal. Recientemente, el avance del Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP) y de los modelos transformadores [4] ha marcado un punto de inflexión. Como señalan Jiang et al. [5], los Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLMs) actúan hoy como potentes motores de predicción capaces de interpretar contextos administrativos ruidosos que históricamente requerían intervención humana constante.

Para superar las limitaciones del motor determinista del RPCMP, este artículo describe el diseño e implementación de una arquitectura de geocodificación híbrida. Para fundamentar esta solución, la investigación inicia con un diagnóstico exhaustivo de los registros fallidos utilizando técnicas como TF-IDF [6] y Word2Vec [7], lo que permite caracterizar el ruido semántico y las agrupaciones espaciales ignoradas por el sistema tradicional. A partir de este diagnóstico, se estructura una estrategia de recuperación inteligente (fallback) mediante el Ajuste Fino Supervisado (SFT) de LLMs eficientes, utilizando la técnica de Adaptación de Bajo Rango (LoRA). Este enfoque busca dotar al sistema de la flexibilidad semántica necesaria para normalizar direcciones anómalas, minimizando la pérdida de información epidemiológica y garantizando la viabilidad del despliegue en entornos de infraestructura tecnológica limitada.

II. Materiales y Métodos

A. Materiales

Para el desarrollo del sistema de normalización de direcciones, se seleccionaron componentes tecnológicos orientados a la eficiencia computacional y el manejo seguro de datos clínicos. Los materiales empleados se agrupan en las siguientes categorías:

a) Conjunto de Datos: Los datos provienen del Registro Poblacional de Cáncer del Municipio de Pasto (RPCMP). Para el diagnóstico exploratorio se analizó una muestra histórica de 15,923 direcciones anonimizadas. Para el entrenamiento de los modelos se consolidó un corpus de 748 registros (muestras reales y sintéticas) para asegurar variabilidad estructural.

b) Modelos de Lenguaje (LLMs): Tras una fase de selección inicial en la que se consideraron diversas arquitecturas de distintas capacidades, incluyendo modelos propietarios y de mayor escala, se seleccionaron finalmente cinco modelos de pesos abiertos (Open Weights). El criterio de selección priorizó arquitecturas con menos de 5B de parámetros para garantizar la eficiencia en el despliegue y un alto rendimiento documentado en el procesamiento del idioma español, concretamente Gemma 3 IT (270M, 1B y 4B) de Google DeepMind [8] y Llama 3.2 Instruct (1B y 3B) de Meta [9].

c) Infraestructura de Cómputo: Los experimentos se ejecutaron en la plataforma en la nube Vast.ai, empleando servidores bajo la certificación de seguridad ISO/IEC 27001 (Secure Cloud) y GPUs NVIDIA RTX 5090, garantizando un entorno seguro para datos en salud.

d) Herramientas de Software: El desarrollo se realizó en Python. La primera fase de análisis se ejecutó mediante entornos interactivos de Jupyter Notebook provistos por Vast.ai. Para el ajuste fino e inferencia de los LLMs se emplearon los marcos de trabajo LLaMA Factory y Unsloth.

B. Métodos

El flujo metodológico se diseñó para transformar datos geográficos ruidosos en estructuras normalizadas mediante un enfoque de aprendizaje supervisado:

a) Diagnóstico y Análisis de Texto: Se implementó un análisis exploratorio utilizando técnicas de Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP). Inicialmente, se aplicó el algoritmo TF-IDF para identificar la importancia de términos específicos y detectar anomalías estadísticas en las direcciones [6]. Complementariamente, para capturar la estructura contextual y sintáctica del vocabulario, se entrenó un modelo Word2Vec utilizando la arquitectura Skip-Gram, ideal para modelar relaciones semánticas en corpus con términos infrecuentes como la toponimia local [10]. Se configuraron vectores de 30 dimensiones, una ventana de contexto de 7 palabras, un umbral mínimo de aparición de 4 y 100 épocas de entrenamiento. Finalmente, para proyectar estas representaciones multidimensionales en un espacio visual 2D, se aplicó la técnica de reducción de dimensionalidad t-SNE (t-distributed Stochastic Neighbor Embedding) [11].

b) Preparación del Dataset de Instrucción: Los datos se estructuraron en pares de "Entrada" (dirección original) y "Salida" (dirección normalizada según el estándar de YACHAY-SIG). Para consolidar el corpus de 748 registros, se combinaron muestras reales con datos sintéticos generados mediante el modelo Gemini 2.5 Pro. Para la creación de estas muestras sintéticas, se enviaron ejemplos de direcciones reales sometidas a un proceso de desidentificación por perturbación numérica; es decir, se alteraron aleatoriamente los dígitos de las vías y predios para evitar la exposición de información sensible, pero conservando intactos los patrones de error, omisiones y la topología informal del texto original. Asimismo, se utilizó una estrategia de Prompt Engineering [12] para definir el rol del modelo como un agente experto en geografía urbana de Pasto.

c) Ajuste Fino Eficiente (Fine-Tuning con LoRA): En lugar de un reentrenamiento total de los parámetros de los modelos (Gemma 3 y Llama 3.2), se implementó la técnica Low-Rank Adaptation (LoRA) [13]. Este procedimiento permitió reducir drásticamente el consumo de memoria VRAM al congelar los pesos originales de los modelos y actualizar únicamente matrices de bajo rango insertadas en todas sus capas lineales. Esta estrategia facilitó la adaptación de los modelos a la semántica local de la nomenclatura de Pasto sin sacrificar sus capacidades de razonamiento general. Para este proceso se establecieron hiperparámetros óptimos: un factor de rango (r) de 16, un factor de escalado (a) de 32, y una tasa de aprendizaje (learning rate) de $1x10^4$. El entrenamiento se ejecutó utilizando el formato de precisión bfloat16 (bf16), asistido por Gradient Checkpointing [14] y Flash Attention [15], con el objetivo de maximizar la eficiencia computacional sin recurrir a ningún método de cuantización destructiva de pesos durante la fase de entrenamiento en la GPU.

d) Protocolo de Evaluación y Validación: El desempeño se validó mediante un conjunto de prueba (test set) estrictamente excluido del entrenamiento. Considerando la naturaleza restrictiva de la geocodificación, se estableció como métrica principal la Tasa de Aciertos, definida como el porcentaje de direcciones que coincidieron de forma exacta con el formato requerido por el sistema.

III. Resultados y Discusión

A. Diagnóstico de la Calidad de los Datos y Línea Base

La evaluación preliminar de las 15,923 direcciones del RPCMP utilizando el geocodificador determinista de Timarán et al. [16] estableció la magnitud del desafío: solo el 35.5% (5,649) de las direcciones pudieron ser geocodificadas. El 64.5% (10,274) restante no pudo ser procesado debido a la alta variabilidad, inconsistencias y uso de lenguaje coloquial.

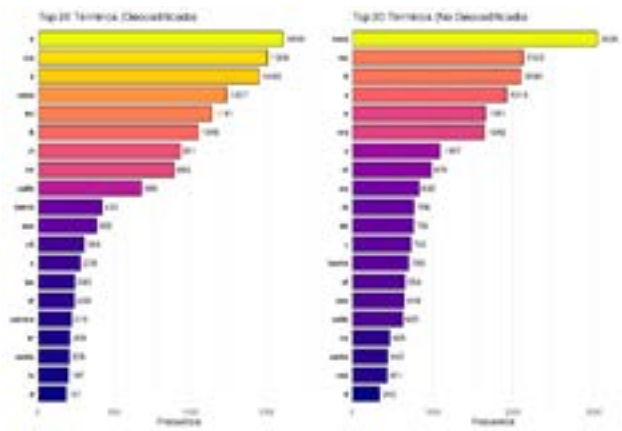


Fig. 1. Comparativa de frecuencia de términos.

Como se observa en la Figura 1, el análisis de frecuencia de términos revela que el éxito del geocodificador radica en su capacidad para identificar y procesar los elementos de ambos tipos de direcciones estándar: tanto las basadas en la malla vial como las de tipo barrio manzana. La alta frecuencia de variaciones comunes en el corpus exitoso demuestra que el sistema posee un léxico robusto capaz de interpretar variaciones populares del lenguaje; esto sugiere que el éxito no depende de una adherencia estricta a un formato único, sino de la presencia de una estructura predecible que es reconocible por el sistema.

Por el contrario, el fracaso en la geocodificación se debe a direcciones que carecen de una estructura reconocible, mezclan componentes válidos con ruido léxico, o utilizan descripciones rurales y coloquiales que el sistema no puede interpretar. En este conjunto fallido, la alta frecuencia del término "vda" (vereda) refuerza la idea de que estas direcciones se basan principalmente en referencias locales, rurales o no estructuradas, en lugar de una nomenclatura vial formal.

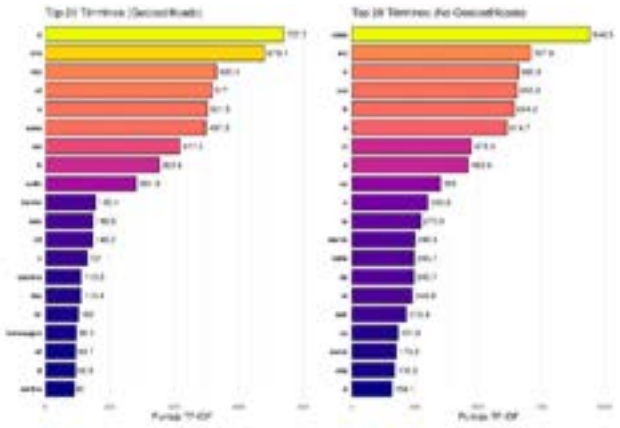


Fig. 2. Comparativa de puntajes TF-IDF.

Al evaluar la distribución de los puntajes TF-IDF, como se muestra en la Figura 2, el conjunto geocodificado indica un vocabulario más balanceado, donde existe un conjunto saludable de términos que son lo suficientemente frecuentes y únicos para ser considerados como palabras clave moderadamente importantes. En contraste, la distribución de las direcciones fallidas demuestra cuantitativamente que este corpus está estructuralmente dominado por un vocabulario de bajo impacto. Se trata de una gran cantidad de errores tipográficos, variaciones únicas y palabras que aparecen una sola vez.

Finalmente, para caracterizar estas inconsistencias en las direcciones no geocodificadas, se seleccionaron los 20 términos con mayor peso estadístico TF-IDF y se calcularon sus 5 vecinos más cercanos en el espacio vectorial. Este análisis permitió identificar patrones de ambigüedad semántica, errores tipográficos recurrentes y variaciones en la nomenclatura local que dificultan el proceso de georreferenciación automática (Tabla 1).

TABLE I. ANÁLISIS DE SIMILITUD SEMÁNTICA DE LOS 20 TÉRMINOS CON MAYOR PESO TF-IDF EN DIRECCIONES NO GEOCODIFICADAS.

Término	**Variantes y Términos Similares (Top 5)**	**Interpretación del Error/Patrón**
no	n (97.7%), ndeg (97.0%), número (97.0%), num (88.0%), nao (87.7%)	Estandarización de numerales y símbolos
mz	manzana (97.3%), mza (97.0%), manz (92.4%), maz (83.3%), m (83.3%)	Alta variabilidad en nomenclatura de manzanas
casa	cs (96.1%), csa (89.9%), cas (87.4%), ca (85.0%), m (65.5%)	Errores de transcripción y abreviaturas informales.
cl	cll (96.1%), calle (95.6%), call (93.9%), cra (90.1%), clle (89.4%)	Abreviaturas viales y confusión con "carrera".
cs	casa (96.1%), csa (89.1%), ca (85.4%), cas (80.1%), pasto (67.7%)	Validación inversa de la abreviatura de vivienda.
cra	carrera (95.9%), kr (95.9%), cr (95.9%), kra (93.7%), calle (92.8%)	Identificación de jerarquía vial y sinonimia.
calle	cll (95.7%), cl (95.6%), call (95.0%), cra (92.8%), clle (92.8%)	Robustez ante variaciones de la vía principal.
b	barrio (95.0%), a (90.6%), c (82.7%), e (72.1%), d (68.8%)	Ambigüedad extrema en caracteres unigrama.
barrio	b (95.0%), a (83.3%), c (78.0%), br (71.7%), brr (67.0%)	Asociación de prefijos de sector urbano.
vda	vereda (94.4%), cto (86.6%), v (85.9%), cgto (84.6%), vrd (70.1%)	Contexto Rural: Asociación vereda/corregimiento.
c	d (85.3%), b (82.7%), a (79.4%), barrio (78.0%), g (73.2%)	Proximidad vectorial de letras de bloque/etapa.
d	c (85.3%), g (79.5%), f (78.6%), e (74.7%), b (68.8%)	Patrón de letras secuenciales en nomenclatura.
a	b (90.6%), barrio (83.3%), c (79.4%), n (72.0%), kra (71.5%)	Intercambiabilidad de letras en contexto de barrio.
n	no (97.7%), ndeg (94.1%), numero (92.2%), num (87.1%), nao (83.5%)	Identificación de "n" como prefijo de número.
e	d (74.7%), b (72.1%), ae (68.1%), a (67.8%), c (65.9%)	Ruido semántico en letras de baja frecuencia.
santa	sta (78.2%), jurado (61.9%), barbara (59.7%), familia (58.7%), encinas (56.5%)	Toponimia: Asociación con nombres de barrios/veredas.
de	pasto (66.0%), del (57.4%), vrd (56.1%), juan (52.3%), pablo (52.1%)	Conectores gramaticales con sesgo geográfico.
la	tangua (62.6%), pedro (59.2%), g (56.7%), pradera (56.3%), divino (54.9%)	Artículos asociados a nombres de municipios y sectores.
el	en (62.5%), del (55.0%), calvario (54.7%), motilon (54.7%), casapamba (52.8%)	Artículos asociados a hitos geográficos específicos.

Término	Variantes y Términos Similares (Top 5)	Interpretación del Error/Patrón
san	chuquimarca (58.8%), galan (58.8%), rafael (54.5%), ignacio (52.8%), las (52.5%)	Toponimia: Nombres propios de la región de Pasto.

Para superar las limitaciones del análisis de frecuencia pura (TF-IDF) y explorar si las variaciones ortográficas presentaban una coherencia semántica subyacente que pudiera ser explotada tecnológicamente, se proyectaron los embeddings generados por Word2Vec utilizando la técnica t-SNE. A diferencia del modelo estadístico que solo cuenta palabras, esta representación vectorial multidimensional convierte la equivalencia funcional de los términos en proximidad espacial.

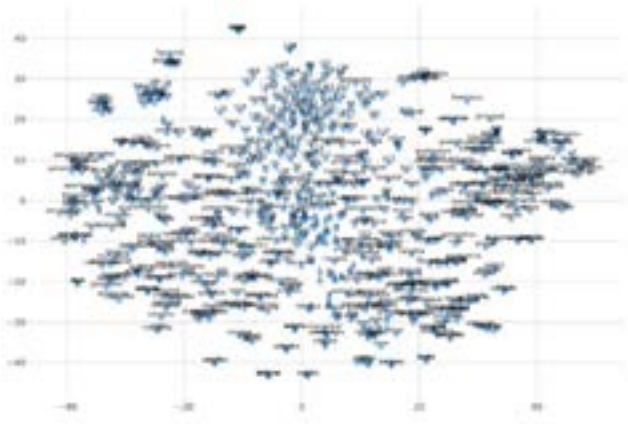


Fig. 3. Proyección t-SNE de los embeddings (Word2Vec) de las direcciones del RPCMP.

En los resultados de la Figura 3, se observa una clara formación de clústeres que evidencian el aprendizaje semántico del modelo sobre la nomenclatura urbana y rural del municipio de Pasto. Del análisis visual se extraen las siguientes observaciones clave:

a) Agrupaciones Toponímicas y Rurales: En el sector centro-derecho del gráfico, términos propios de la geografía y ruralidad de Pasto como catambuco, obonuco, jamondino, gualmatan y mapachico se sitúan en estrecha proximidad. De igual forma, los identificadores rurales como vda, vereda, cgto y corregimiento forman agrupaciones consistentes, demostrando que el modelo aprendió su contexto geográfico compartido.

b) Sinonimia Estructural y Abreviatura: En el cuadrante superior izquierdo se evidencia un clúster muy definido que agrupa variaciones formales e informales de la malla vial. Términos como cra, kr, carrera, cll, cle y calle se solapan espacialmente, lo que indica que el modelo comprende su equivalencia funcional a pesar de la altísima variabilidad ortográfica.

c) Aislamiento Numérico: Se destaca una concentración masiva y aislada de caracteres numéricos (ej. 120, 145, 107, 164) en la parte superior central. Esta agrupación estructurada demuestra la capacidad del modelo para diferenciar algorítmicamente los identificadores de predio o vía, separándolos del texto alfabético y los nombres propios.

Este análisis confirma que, en medio del ruido léxico de las direcciones fallidas, existe una alta consistencia semántica. Esta validación técnica fue el factor determinante para fundamentar la transición desde algoritmos deterministas clásicos hacia Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLMs), los cuales poseen la arquitectura de atención necesaria para normalizar este contexto distribuido con precisión humana.

B. Selección LLM

La evaluación preliminar de las 15,923 direcciones del RPCMP utilizando el geocodificador determinista de Timarán et al. [16] estableció la magnitud del desafío: solo el 35.5% (5,649) de las direcciones pudieron ser geocodificadas. El 64.5% (10,274) restante no pudo ser procesado debido a la alta variabilidad, inconsistencias y uso de lenguaje coloquial.

Para seleccionar el modelo de lenguaje óptimo para la normalización de direcciones del RPCMP, se definieron tres criterios técnicos fundamentales. El primero es la competencia lingüística en español, una capacidad nativa indispensable para el procesamiento semántico, la desambiguación de variaciones léxicas y el reconocimiento de la toponimia del municipio de Pasto. El segundo se centra en el licenciamiento y la soberanía tecnológica, priorizando modelos open source para su despliegue local, lo cual asegura la privacidad de los datos epidemiológicos sensibles y elimina la dependencia de APIs externas. Finalmente, se consideró la eficiencia computacional y de hardware, estableciendo un límite máximo de 5 mil millones (5B) de parámetros para garantizar un consumo de memoria manejable en un entorno de despliegue sin GPU y con RAM limitada.

Tras la aplicación de los criterios de selección previamente definidos, se procedió a evaluar un conjunto de modelos representativos del estado del arte. La Tabla 2 detalla el análisis comparativo de los LLMs considerados, justificando técnicamente la exclusión de arquitecturas propietarias o de gran escala, y señalando aquellos candidatos idóneos para el proceso de ajuste fino supervisado (SFT) en el marco del proyecto YACHAY.

TABLE II. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LLMS.

Modelo	Proveedor	Parámetros	Licencia
GPT-4	OpenAI	1.76T (estimados)	Propietaria
Claude 4.5	Anthropic	1T (estimados)	Propietaria
Gemini	Google	1.5 T a 1.7 T (estimados)	Propietaria
Mistral 7B	Mistral AI	7.3B	Apache 2.0
Phi-3 Mini	Microsoft	3.8B	MIT
Llama 3.2 Instruct	Meta	1B / 3B	Llama 3.2
Gemma 3 IT	Google	270M / 1B / 4B	Gemma
Qwen 3	Alibaba	4B	Tongyi Q.

Con base en estos criterios, se tuvo en cuenta un conjunto de modelos representativos del estado del arte, descartando los siguientes para asegurar la viabilidad del proyecto:

- Los Modelos Propietarios (GPT-4, Claude 4.5, Gemini) fueron descartados por poseer arquitecturas cerradas, requerir dependencia de APIs externas o infraestructura en la nube, lo que compromete la privacidad de datos sensibles y los requisitos de soberanía de datos [17], [18], [19].
- Mistral 7B fue excluido por exceder el umbral crítico de 5B de parámetros para una ejecución eficiente en CPUs sin soporte de GPU [20].
- Phi-3 Mini fue excluido debido a su limitada competencia lingüística en español para tareas de desambiguación de toponimia local [21]:

Superado este filtrado inicial, la evaluación se realizó exclusivamente con cinco modelos de código abierto, seleccionados como candidatos idóneos para la fase experimental de Ajuste Fino Supervisado (SFT):

- Llama 3.2 Instruct (1B y 3B) fueron seleccionados por estar optimizados para instrucciones, demostrando un excelente equilibrio entre la capacidad de razonamiento y el consumo de memoria [22]:
- Gemma 3 IT (270M, 1B y 4B) fueron seleccionados por su arquitectura ligera de última generación, con un alto rendimiento comprobado en tareas de normalización de texto [8]. Ambos demostraron permitir un despliegue ágil en la infraestructura del proyecto sin sacrificar precisión.

Finalmente, aunque se consideró por su tamaño, el siguiente modelo fue descartado de la evaluación final:

- Qwen 3 (4B) fue desestimado por su naturaleza de modelo razonador, lo cual implicaría un tiempo de procesamiento demasiado alto entre direcciones [23]:

C. Ajuste Fino (Fine-Tuning)

La decisión de aplicar un proceso de Ajuste Fino (Fine-Tuning) sobre las arquitecturas base (Llama 3.2 y Gemma 3) responde a la necesidad de transformar modelos de lenguaje generalistas en herramientas de precisión para el dominio de la salud pública. Aunque estos modelos poseen una vasta comprensión lingüística, su entrenamiento no es suficiente para la precisión quirúrgica que requiere el RPCMP, ya que carecen del conocimiento específico sobre la toponimia del municipio de Pasto y las variaciones léxicas propias de la región de Nariño. Este proceso permite especializar el modelo en dicho dominio geográfico, restringiendo su capacidad creativa para priorizar una salida técnica y estandarizada. Así se mitiga la aparición de alucinaciones, garantizando que cada dirección procesada siga estrictamente la normativa catastral y mantenga un formato de datos predecible, indispensable para la integración con el sistema YACHAY.

Dentro del espectro de técnicas de adaptación, se optó por el Ajuste Fino Supervisado (SFT - Supervised Fine Tuning) como la metodología más robusta para tareas de transformación de texto estructurado. A diferencia de otras técnicas, el SFT fundamenta el entrenamiento en la exposición directa a pares de instrucción y respuesta curados por expertos. Al utilizar una verdad fundamental (Ground Truth) verificada manualmente por el equipo del RPCMP, el SFT asegura que el sistema final herede los estándares de calidad del registro de cáncer, eliminando las ambigüedades y errores históricos presentes en las bases de datos originales. De este modo, el SFT actúa como el puente necesario entre la capacidad lingüística preentrenada y el rigor de ingeniería requerido para que la normalización sea una tarea determinística y confiable.

La efectividad del ajuste fino supervisado está intrínsecamente ligada a la calidad y representatividad del conjunto de datos [24]. Para este estudio, se diseñó un proceso meticuloso de construcción de un conjunto de datos especializado, enfocado en las dos tipologías de nomenclatura vigentes en el municipio de Pasto: Barrio-Manzana y Malla Vial.

El conjunto consolidado consta de 748 registros, de los cuales 380 corresponden a muestras reales extraídas del RPCMP y 368 son muestras sintéticas generadas mediante el modelo Gemini 2.5 Pro para garantizar una cobertura exhaustiva de variaciones léxicas. Para asegurar una evaluación robusta, este conjunto fue dividido en subconjuntos de entrenamiento (60%), validación (20%) y prueba (20%) mediante una técnica de muestreo estratificado, asegurando que la distribución proporcional de ambos tipos de dirección se mantuviera consistente en todas las particiones, tal como se detalla en la Tabla 3.

TABLE III. PARTICIONAMIENTO ESTRATIFICADO DEL CONJUNTO DE DATOS ESPECIALIZADO.

Nomenclatura	**Entrenamiento**	**Validación**	**Prueba**
Barrio-Manzana	209	70	70
Malla-Vial	239	80	80
Total	448	150	150

D. Evaluación del Rendimiento de los LLMs (Zero-Shot vs. Fine-Tuning)

Previo a la fase de especialización, se evaluó el rendimiento de las arquitecturas en su estado original o Zero-Shot [25]. El objetivo fue cuantificar su capacidad innata para interpretar instrucciones complejas y adherirse a formatos técnicos (como JSON) sin exposición previa a datos locales. Evaluados mediante la métrica de coincidencia exacta o Exact Match [26], los resultados revelaron un desempeño limitado.

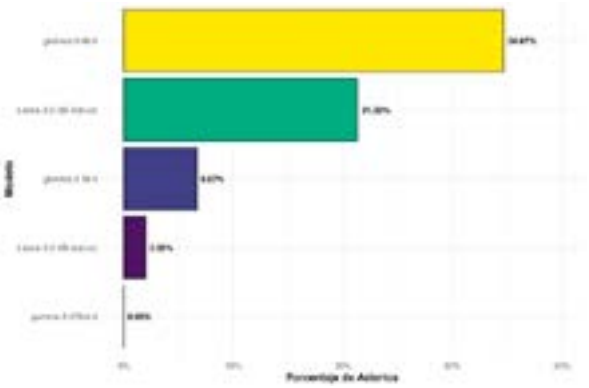


Fig. 4. Tasa de aciertos de los LLMs en su modelo base.

Como ilustra en la Figura 4, el modelo Gemma 3 4B IT alcanzó el mejor resultado inicial con apenas un 34.67% de aciertos, mientras que el modelo más pequeño (Gemma 3 270M IT) no logró ningún acierto perfecto (0%). Esto confirmó que la alta capacidad lingüística general de los modelos resulta insuficiente ante la complejidad de la toponimia de Pasto y la exigencia técnica del registro de cáncer.

Fig. 5. Tasa de aciertos de los LLMs ajustados.

TABLE IV. PARTICIONAMIENTO ESTRATIFICADO DEL CONJUNTO DE DATOS ESPECIALIZADO.

Modelo	Aciertos Zero-Shot	Aciertos Post Fine-Tuning
Gemma 3 270M IT	0.00%	93.33%
Gemma 3 1B IT	6.67%	94.00%
Gemma 3 4B IT	34.67%	98.67%
Llama 3.2 1B Instruct	2.00%	94.67%
Llama 3.2 3B Instruct	21.33%	96.67%

Tras la intervención de los modelos mediante el ajuste fino supervisado (LoRA), el impacto fue sustancial. Como se ilustra en la Figura 4 y se detalla en la Tabla 4, la exactitud global superó el 93% en todas las arquitecturas evaluadas, representando un salto cualitativo monumental respecto a la línea base. El modelo Gemma 3 4B IT lideró el rendimiento con una precisión del 98.67%, consolidándose como la arquitectura más robusta. Por su parte, Llama 3.2 3B Instruct registró una evolución notable al pasar de un 21.33% a un 96.67% de aciertos. Estos resultados validan la efectividad de la técnica para dotar a modelos de escala moderada de una fiabilidad industrial, permitiendo que el sistema YACHAY opere con estándares de alta calidad sobre servidores locales.

Para asegurar la comparabilidad de los resultados en ambas etapas del experimento, la tasa de aciertos (accuracy) se analizó sistemáticamente mediante matrices de confusión. En la fase Zero-Shot (Ver Figura 6), se identificó una alta concentración de valores fuera de la diagonal principal, reflejando cómo los modelos confundían frecuentemente las categorías de nomenclatura o generaban formatos inválidos.

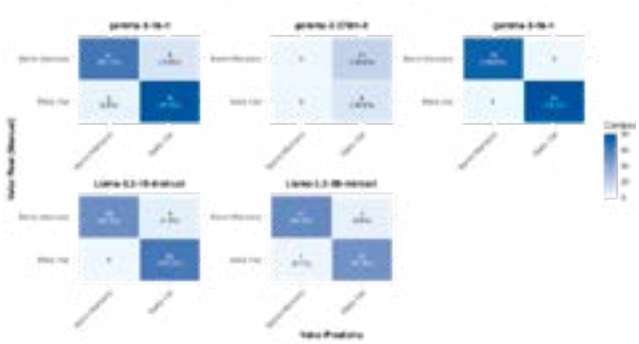
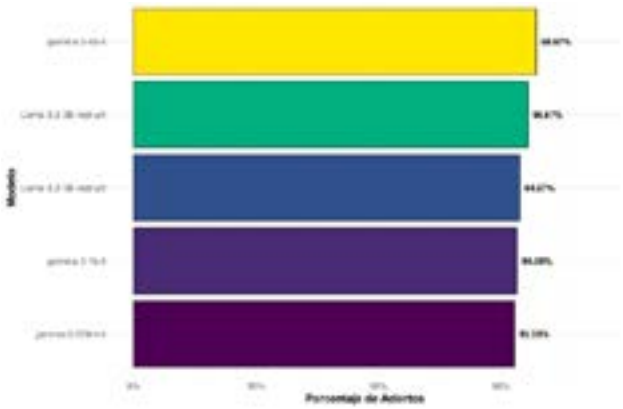


Fig. 6. Matrices de confusión para la clasificación de direcciones utilizando los modelos base (Zero-Shot).

Este enfoque de validación cruzada demostró que la especialización no solo incrementó el porcentaje de aciertos de forma drástica, sino que garantizó la estabilidad estructural de los modelos. Al comparar ambas matrices (Ver Figura 6 comparada con Figura 7), se evidenció que el ajuste fino eliminó prácticamente la totalidad de los falsos positivos en la identificación de la Malla Vial y los errores de interpretación



en la nomenclatura de Barrio-Manzana, consolidando así la fiabilidad de las predicciones desde el error hacia el acierto exacto.

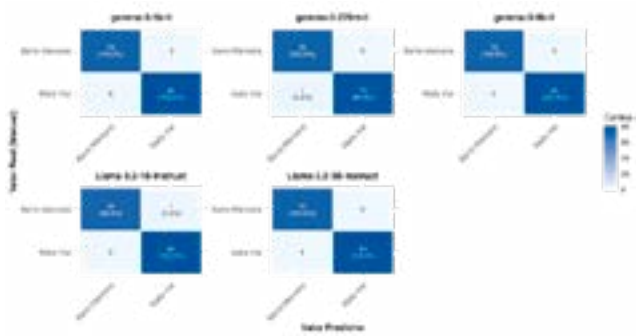


Fig. 7. Matrices de confusión tras el proceso de Ajuste Fino Supervisado (LoRA).

IV. Conclusiones

Este estudio valida la eficacia de las técnicas avanzadas de Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP) para la normalización de direcciones en el contexto de la salud pública. Las pruebas iniciales evidenciaron que métodos tradicionales basados en la frecuencia de términos (TF-IDF) resultan insuficientes para la normalización toponímica, al no capturar el contexto semántico ni las variaciones morfológicas. Aunque Word2Vec representó un avance en el cálculo de similitudes, su arquitectura de vectores estáticos mostró limitaciones críticas ante la ambigüedad de las abreviaturas locales y la estructura jerárquica de la nomenclatura en Pasto, donde el orden posicional de los elementos es determinante para la validez de la geocodificación.

La transición hacia Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLMs) marcó un cambio de paradigma en la precisión del sistema. Se comprobó que, si bien los modelos base en estado Zero-Shot presentan inconsistencias por su desconocimiento de la geografía local, la aplicación del Ajuste Fino Supervisado (SFT) mediante LoRA resuelve esta brecha. Este ajuste no solo corrige errores de formato, sino que actúa como un mecanismo de transferencia de conocimiento especializado, permitiendo que el modelo comprenda y estandarice la toponimia local con una fiabilidad equiparable a la de un experto humano.

Los resultados sobresalientes de los modelos Gemma 3 4B IT (98.67%) y Llama 3.2 3B Instruct (96.67%) demuestran que no es necesario depender de arquitecturas de hiperescala o servicios en la nube para obtener resultados de altísima precisión. La implementación de modelos de escala eficiente entrenados en infraestructura cloud segura, y luego desplegados localmente viabiliza el despliegue de inteligencia artificial de vanguardia utilizando recursos de hardware institucionales convencionales, garantizando al mismo tiempo la estricta soberanía y privacidad de los datos sensibles del registro de cáncer.

Finalmente, la integración de esta tecnología en el sistema YACHAY-SIG reduce drásticamente el margen de error en la geolocalización. Al consolidar una automatización con más del 96% de precisión en los modelos líderes, se fortalece de manera integral la capacidad de análisis espacial del Registro Poblacional de Cáncer del Municipio de Pasto (RPCMP). Esto facilita la identificación precisa de clústeres epidemiológicos y optimiza, en última instancia, la toma de decisiones estratégicas en salud pública.

V. Trabajos Futuros

El éxito en la normalización semántica de direcciones sienta las bases para una serie de expansiones operativas e investigativas en el ecosistema del Registro Poblacional de Cáncer del Municipio de Pasto (RPCMP).

Se proyecta escalar significativamente el volumen de datos en la evaluación del sistema. Si bien este estudio inicial validó la eficacia del ajuste fino (Fine-Tuning) utilizando un corpus curado de 748 registros (reales y sintéticos), el paso inmediato consiste en procesar la totalidad de la base de datos histórica del registro, la cual supera los 15,000 casos clínicos. Para esta validación a gran escala, se trascenderá la métrica de coincidencia exacta (Exact Match) mediante la incorporación de parámetros de evaluación de Machine Learning más robustos, tales como la Precisión (Precision), la Exhaustividad (Recall) y el F1-Score, lo que permitirá un análisis exhaustivo del comportamiento de los modelos en entornos de producción masiva y alta ambigüedad.

La investigación avanzará desde la corrección lingüística hacia la medición de su impacto cartográfico directo. Se implementará la Tasa de Recuperación Geoespacial (Geocoding Match Rate) como métrica definitiva para cuantificar el porcentaje real de registros clínicos que, tras ser normalizados por el LLM, logran intersecar exitosamente con las coordenadas del marco oficial. Esta evaluación permitirá contrastar la línea base del motor determinista frente al flujo integrado, logrando así aislar y diferenciar formalmente la "brecha semántica" (errores de escritura resueltos por la IA) de la "brecha cartográfica" (limitaciones derivadas de zonas de expansión urbana informal o rural que aún no existen en los mapas oficiales del municipio).

El objetivo culminante es la integración completa (end-to-end) de esta arquitectura en la plataforma YACHAY-SIG. Esto habilitará la proyección de las coordenadas recuperadas en herramientas de visualización espacial, permitiendo la generación de mapas dinámicos de puntos y mapas de calor. Trasladar el éxito de la corrección textual a evidencia gráfica real materializará el impacto del modelo, haciendo visible la distribución de casos en zonas periféricas previamente excluidas y consolidando un insumo estratégico invaluable para la vigilancia de clústeres epidemiológicos.

Agradecimientos

Este proyecto es financiado con recursos del Sistema de Investigaciones de la Universidad de Nariño (Colombia).

References

[1] F. Bray and D. M. Parkin, "Evaluation of data quality in the cancer registry: Principles and methods. Part I: Comparability, validity and timeliness," European Journal of Cancer, vol. 45, no. 5, pp. 747–755, 2009.

[2] A. Sayers, Y. Ben-Shlomo, A. W. Blom, and F. Steele, "Probabilistic record linkage," International Journal of Epidemiology, vol. 45, no. 3, pp. 954–964, 2016.

[3] R. Santos, P. Murrieta-Flores, and B. Martins, "Toponym matching through deep neural networks," International Journal of Geographical Information Science, vol. 32, no. 2, pp. 324–348, 2018.

[4] J. Devlin, M. W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, "BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding," arXiv preprint arXiv:1810.04805, 2019.

[5] L. Y. Jiang et al., "Health system-scale language models are all-purpose prediction engines," Nature, vol. 619, no. 7969, pp. 357–362, 2023.

[6] C. D. Manning, P. Raghavan, and H. Schütze, Introduction to Information Retrieval. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2008.

[7] T. Mikolov, K. Chen, G. Corrado, and J. Dean, "Efficient estimation of word representations in vector space," arXiv preprint arXiv:1301.3781, 2013.

[8] Gemma Team, "Gemma 3 technical report," arXiv preprint arXiv:2503.19786, 2025.

[9] Meta, "Llama 3.2 model cards and prompt formats," 2024. [Online]. Available: https://www.llama.com/docs/model-cards-and-prompt-formats/llama3_2/

[10] T. Mikolov, I. Sutskever, K. Chen, G. S. Corrado, and J. Dean, "Distributed Representations of Words and Phrases and their

Compositionality," in Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), vol. 26, 2013, pp. 3111–3119.

[11] L. Van der Maaten and G. Hinton, "Visualizing Data using t-SNE," Journal of Machine Learning Research, vol. 9, pp. 2579–2605, 2008.

[12] J. White et al., "A prompt pattern catalog to enhance prompt engineering with ChatGPT," arXiv preprint arXiv:2302.11382, 2023.

[13] E. J. Hu et al., "LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models," arXiv preprint arXiv:2106.09685, 2021.

[14] T. Chen, B. Xu, C. Zhang, and C. Guestrin, "Training deep nets with sublinear memory cost," arXiv preprint arXiv:1604.06174, 2016.

[15] T. Dao, D. Y. Fu, S. Ermon, A. Rudra, and C. Ré, "FlashAttention: Fast and memory-efficient exact attention with IO-awareness," in Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 35, 2022, pp. 32087–32100.

[16] R. Timarán-Pereira, G. Hernández-Garzón, and N. Quemá-Taimbud, "Identificación de lesiones no fatales en la cartografía del municipio de Pasto con la técnica de agrupamiento," Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación, vol. 8, no. 1, pp. 147–159, 2017.

[17] OpenAI, "GPT-4 technical report," arXiv preprint arXiv:2303.08774, 2023.

[18] Anthropic, “Claude Opus 4.5,” Nov. 24, 2025. [Online]. Available: https://www.anthropic.com/news/claude-opus-4-5. Accessed: May 8, 2026.

[19] Google, "Gemini: A family of highly capable multimodal models," Google DeepMind, 2023. [Online]. Available: https://storage.googleapis.com/deepmind-media/gemini/gemini_1_report.pdf

[20] Mistral AI, "Mistral 7B," Mistral AI Blog, 2023. [Online]. Available: https://mistral.ai/news/announcing-mistral-7b/

[21] Microsoft, "Phi-3 technical report: A highly capable language model locally on your phone," Microsoft Research, 2024. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2404.14219

[22] A. Dubey et al., "The Llama 3 herd of models," arXiv preprint arXiv:2407.21783, 2024.

[23] Alibaba Cloud, "Qwen 3 Technical Report," arXiv preprint arXiv:2505.09388, 2025.

[24] J. Ye et al., "Analyzing the Effects of Supervised Fine-Tuning on Model Knowledge from Token and Parameter Levels," arXiv preprint arXiv:2509.16596, 2025.

[25] T. Brown et al., "Language models are few-shot learners," in Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 33, 2020, pp. 1877–1901.

[26] P. Rajpurkar, J. Zhang, K. Lopyrev, and P. Liang, "SQuAD: 100,000+ Questions for Machine Comprehension of Text," in Proceedings of the 2016 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2016, pp. 2383–2392.

Diseño de un pipeline ETL para la estructuración de información científica sobre la caracterización de nanomateriales derivados de biomasa

1st Laura Gómez
Departamento de Física y Química
Universidad Nacional de Colombia
Manizales, Colombia
Gomezr.laum@gmail.com

2nd Edna Bernal
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Bogotá, Colombia
edna.bernal@unad.edu.co

3rd Sixto Campana
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Bogotá, Colombia
https://orcid.org/0000-0001-9937-2784

4th Paula Méndez
Departamento de Física y Química
Universidad Nacional de Colombia
Manizales, Colombia
https://orcid.org/0000-0002-7153-1787

***Resumen*—** Los residuos agroindustriales piscícolas provenientes de la región Pacífica como Tumaco, constituyen una fuente potencial para la obtención de bio y nanomateriales con aplicaciones en biomedicina, la industria alimentaria y la ingeniería de materiales; siendo esta una alternativa para incentivar la bioeconomía en los territorios nacionales y mitigar los impactos ambientales. Sin embargo, uno de los desafíos es la ausencia de bases de datos estructuradas que integren información relevante sobre las propiedades fisicoquímicas, métodos de síntesis y aplicaciones de los nanomateriales. Esta información se encuentra dispersa en literatura científica en formatos no estructurados, lo que dificulta su procesamiento y limita el uso de herramientas avanzadas como la inteligencia artificial.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar e implementar un pipeline ETL en Python, orientado a la construcción de una base de datos relacional para la estructuración automática de información científica sobre nanomateriales. Este sistema se plantea como un componente habilitador dentro de un macroproyecto, orientado al desarrollo de modelos de inteligencia artificial para la optimización de bioproductos en el marco del fortalecimiento de la bioeconomía de Tumaco. La metodología se desarrolló bajo un enfoque de ingeniería de datos aplicada, implementado de manera iterativa para permitir la validación progresiva de reglas heurísticas y estrategias de extracción. El proceso se estructuró en tres fases principales: (i) adquisición de datos desde fuentes bibliográficas, (ii) transformación y estructuración mediante técnicas de procesamiento de texto y reglas heurísticas, y (iii) almacenamiento en una base de datos relacional normalizada.

Los resultados preliminares evidenciaron un sistema capaz de procesar una muestra de veinte documentos científicos, logrando la estructuración de variables fisicoquímicas y de síntesis relevantes, tales como tipo de nanomaterial, tamaño de partícula, morfología, temperatura, técnicas de caracterización, cristalinidad, método de síntesis e índice de polidispersidad. El sistema alcanzó una completitud promedio cercana al setenta por ciento, en una implementación basada en reglas heurísticas utilizada como línea base para la evaluación del enfoque propuesto, con mayores tasas de extracción en variables como tamaño de partícula, tipo de nanomaterial y métodos de síntesis. En contraste, variables como el índice de polidispersidad y la cristalinidad presentaron menores niveles de detección, evidenciando las limitaciones del enfoque basado en reglas.

Adicionalmente, se diseñó un esquema de base de datos relacional orientado a la trazabilidad de mediciones experimentales y se implementó un módulo de evaluación que permite analizar el desempeño del sistema. Estos resultados permiten establecer un esquema reproducible para la estructuración y evaluación automática de información científica en el área de nanomateriales, y constituyen una base para la integración futura de técnicas en IA orientadas a la optimización de bioproductos. Se proyecta escalar el sistema mediante el incremento del corpus documental y la incorporación de modelos de lenguaje preentrenados, con el fin de mejorar la extracción y validación de variables complejas y superar las limitaciones del enfoque basado en reglas heurísticas.

***Palabras clave*—** *base de datos, bioeconomía, ETL, extracción de información, ingeniería de datos, pipeline, procesamiento de texto.*

I. Introducción

La valorización de residuos agroindustriales piscícolas se ha consolidado como una estrategia clave dentro de la bioeconomía [1], especialmente en regiones como el Pacífico colombiano, donde la actividad pesquera genera grandes volúmenes de desechos con potencial para la obtención de bioproductos de alto valor agregado. En particular, estos residuos pueden ser aprovechados en la síntesis de bio y nanomateriales con aplicaciones en campos como la biomedicina, la industria alimentaria y la ingeniería de materiales, lo que los posiciona como un recurso estratégico para el desarrollo sostenible [2], [3], [4], [5].

No obstante, el aprovechamiento de este potencial enfrenta desafíos asociados a la gestión del conocimiento científico. La información relacionada con propiedades fisicoquímicas, métodos de síntesis y técnicas de caracterización de nanomateriales se encuentra ampliamente distribuida en la literatura científica en formatos no estructurados [6], [7], [8], [9], [10]. Esta dispersión dificulta su análisis sistemático, comparación y reutilización, limitando la generación de conocimiento integrado y el desarrollo de procesos de investigación.

En este contexto, la ingeniería de datos ofrece herramientas para transformar información no estructurada en datos

organizados y reutilizables [11], [12], [13]. En trabajos previos, se ha propuesto el diseño de un pipeline ETL (Extract, Transform, Load), orientado a la extracción automática y estructuración de información científica sobre nanomateriales a partir de literatura especializada [14]. La integración secuencial y automatizada de estas etapas permite configurar un pipeline de datos, entendido como un flujo de procesamiento capaz de gestionar grandes volúmenes de información de forma eficiente y reproducible [15].

La disponibilidad de estos datasets estructurados constituye un elemento clave para facilitar la consulta, trazabilidad y análisis sistemático de la información científica. Asimismo, estos conjuntos de datos pueden servir como base para el desarrollo de herramientas computacionales en etapas posteriores, incluyendo enfoques basados en inteligencia artificial. Sin embargo, su construcción representa un reto en sí mismo debido a la heterogeneidad y complejidad de la información presente en la literatura científica [7], [16], [17], [18].

En este sentido, la implementación de pipelines de datos permite automatizar la extracción y estructuración de información científica, facilitando el análisis de grandes volúmenes de literatura. A través de estos procesos, es posible identificar variables relevantes como técnicas de caracterización (SEM, TEM), patrones de difracción de rayos X (XRD) y otros parámetros experimentales, contribuyendo a la organización del conocimiento en el área de nanomateriales [9], [10], [11], [12], [16], [19].

En respuesta a esta problemática, en este trabajo se presenta el diseño e implementación de un pipeline ETL orientado a la extracción automática y estructuración de información científica sobre nanomateriales a partir de literatura no estructurada. El sistema evidencia la construcción de una base de datos relacional y la evaluación del desempeño del proceso de extracción, constituyendo una base para el desarrollo de herramientas avanzadas de análisis en el área de nanomateriales derivados de biomasa.

II. METODOLOGÍA

El presente trabajo se enmarca en una investigación aplicada con enfoque de desarrollo tecnológico en el área de ingeniería de datos. Su alcance es descriptivo-exploratorio, dado que se orienta a la estructuración de información científica proveniente de literatura no estructurada, con el propósito de organizar y analizar variables relevantes en el ámbito de los nanomateriales.

El enfoque metodológico se centra en el diseño e implementación de un pipeline ETL (Extract, Transform, Load), el cual permite la extracción, transformación y almacenamiento de datos científicos en un entorno estructurado. Este proceso constituye la base para la construcción de un sistema de datos orientado a facilitar el análisis de información y su posible uso en aplicaciones computacionales futuras.

A continuación, se describen las fases desarrolladas en el proceso metodológico:

A. Fuente de datos

Las fuentes de datos empleadas corresponden a artículos científicos sobre síntesis y caracterización de nanomateriales, obtenidos de bases de datos académicas como Scopus y plataformas editoriales como ScienceDirect (Elsevier), en formato PDF. Estos documentos contienen información sobre propiedades fisicoquímicas, métodos de síntesis y técnicas de caracterización, la cual se encuentra en formato de texto no estructurado.

Para la construcción del conjunto de datos, se seleccionó una muestra inicial de veinte artículos, utilizada como prueba de concepto para la validación del pipeline propuesto, considerando la disponibilidad de variables de interés como tamaño de partícula, morfología, temperatura de síntesis y técnicas de caracterización.

La heterogeneidad en la estructura, formato y forma de reporte de los documentos constituye un escenario representativo para la evaluación de métodos de extracción y estructuración de información científica.

B. Arquitectura del sistema

El sistema propuesto se basa en una arquitectura de procesamiento de datos orientada a la implementación de un pipeline ETL para la extracción de información científica a partir de literatura no estructurada. Esta arquitectura integra técnicas de procesamiento de texto con enfoques basados en modelos de lenguaje, permitiendo transformar documentos científicos en datos estructurados para su almacenamiento y análisis.

Como se ilustra en la Figura 1, el pipeline inicia con la ingesta de documentos en formato PDF, seguida de su conversión a texto, segmentación en fragmentos y filtrado de relevancia. Posteriormente, la información es procesada mediante dos enfoques en paralelo: (i) un método heurístico basado en reglas y expresiones regulares, y (ii) un enfoque basado en modelos de lenguaje (LLM) [20], que permite la extracción de información en formato estructurado.

Los resultados de ambos enfoques son comparados y posteriormente agregados para construir un único registro por documento, el cual es finalmente almacenado en una base de datos relacional. Esta arquitectura permite evaluar diferentes estrategias de extracción y generar datos estructurados de forma reproducible, facilitando su uso en análisis posteriores.



Fig. 1. Arquitectura del pipeline ETL propuesto.

C. Proceso ETL

El sistema propuesto implementa un proceso ETL (Extract, Transform, Load) para la extracción, procesamiento y almacenamiento de información científica a partir de literatura no estructurada. Este proceso permite transformar documentos en formato PDF en un conjunto de datos estructurado, facilitando su análisis y posterior uso en aplicaciones computacionales [14].

1) Extracción

La fase de extracción consiste en la lectura automatizada de documentos científicos en formato PDF y la conversión de su contenido a texto plano mediante herramientas de procesamiento de documentos, específicamente la biblioteca PyMuPDF. Este proceso permite recuperar el contenido textual de los artículos, el cual es posteriormente utilizado como entrada para las etapas de análisis.

Debido a la heterogeneidad estructural de los documentos, el texto extraído puede contener elementos no relevantes como encabezados, referencias bibliográficas, caracteres especiales y fragmentos desorganizados, lo que introduce ruido en el proceso. Por esta razón, la extracción se orienta a preservar la mayor cantidad de contenido posible, delegando las tareas de depuración y estructuración a las etapas posteriores del pipeline.

Adicionalmente, el texto extraído es segmentado en fragmentos o chunks de aproximadamente 2000 caracteres, con un solapamiento de 200 caracteres entre segmentos consecutivos, con el fin de preservar el contexto semántico y facilitar su procesamiento en las etapas de transformación.

2) Transformación

La fase de transformación tiene como objetivo la identificación y estructuración de variables científicas a partir del texto no estructurado. Esta etapa se desarrolla mediante un enfoque híbrido que combina técnicas heurísticas con métodos basados en modelos de lenguaje.

En primer lugar, se aplica un proceso de filtrado de relevancia, en el cual se seleccionan únicamente aquellos fragmentos que contienen información potencialmente útil, utilizando palabras clave asociadas a variables fisicoquímicas, métodos de síntesis y técnicas de caracterización. Este paso permite reducir el ruido y mejorar la eficiencia de los procesos posteriores.

Posteriormente, la transformación se realiza mediante dos estrategias en paralelo:

a) Enfoque heurístico

Este enfoque se basa en reglas definidas mediante expresiones regulares y patrones textuales, orientadas a la identificación de variables específicas. El proceso incluye:

- Limpieza y normalización: se realiza la eliminación de caracteres irrelevantes, normalización del texto y unificación de unidades, con el fin de reducir la variabilidad introducida durante la extracción.
- Identificación de patrones: se aplican reglas heurísticas para detectar variables de interés, tales como tipo de nanomaterial, tamaño de partícula, temperatura, métodos de síntesis y morfología. Para ello, el sistema utiliza múltiples estrategias complementarias, incluyendo: (i) búsqueda prioritaria en secciones relevantes como título y resumen, (ii) detección basada en contexto dentro del contenido del documento, y, (iii) mecanismos de contingencia basados en frecuencia de aparición de términos.
- Clasificación y estructuración: para variables categóricas como el método de síntesis, se implementa un sistema de puntuación que asigna pesos a diferentes evidencias textuales, permitiendo clasificar los métodos en categorías como biológico, químico, físico o térmico. En el caso de variables continuas, como el tamaño de partícula, se emplea una estrategia multipatrón que considera diversas formas de reporte en la literatura, incluyendo valores promedio, rangos y desviaciones estándar.

b) Enfoque basado en modelos de lenguaje

En este enfoque, cada fragmento de texto es procesado mediante un modelo de lenguaje de gran escala (Gemma 4),

ejecutado localmente a través de Ollama. El modelo recibe como entrada un prompt diseñado para extraer información estructurada y generar como salida un objeto en formato JSON.

Este enfoque permite capturar relaciones semánticas complejas y mejorar la detección de variables que no siguen patrones explícitos, superando algunas de las limitaciones del enfoque heurístico.

3) Comparación y agregación

Una vez obtenidos los resultados de ambos enfoques, se realiza un proceso de comparación, en el cual se evalúa el desempeño de cada estrategia mediante métricas como completitud y capacidad de detección de variables.

Posteriormente, se lleva a cabo un proceso de agregación de resultados, mediante el cual se consolidan las salidas generadas a partir de los diferentes fragmentos de un mismo documento. Este proceso permite construir un único registro estructurado, priorizando valores válidos y consistentes, y resolviendo posibles redundancias o inconsistencias en la información extraída.

4) Carga

En la fase de carga, la información estructurada es almacenada en una base de datos relacional, permitiendo organizar los datos en entidades y atributos que facilitan su consulta y análisis. Cada registro se asocia con su documento de origen, garantizando la trazabilidad de la información.

La información, previamente estructurada en formato JSON, es transformada a un esquema relacional, asegurando la consistencia de los datos y su adecuada integración en la base de datos. Adicionalmente, cada registro se asocia con su documento de origen, garantizando la trazabilidad de la información extraída.

El proceso de carga consolida los resultados de la extracción en un conjunto de datos estructurado, el cual es posteriormente utilizado para la evaluación del desempeño del sistema y para su posible integración en aplicaciones de análisis avanzadas.

D. Extraccion de variables

Con el fin de estructurar la información científica contenida en la literatura analizada, se definió un conjunto de variables relevantes asociadas a la caracterización de nanomateriales. Estas variables fueron seleccionadas considerando su recurrencia en estudios experimentales y su importancia en la descripción de propiedades fisicoquímicas, métodos de síntesis y técnicas de caracterización.

La extracción de dichas variables se realizó mediante un enfoque heurístico basado en reglas, implementado en la fase de transformación. Este enfoque combina estrategias de detección por patrones, análisis contextual y mecanismos de decisión jerárquica, permitiendo identificar información relevante en textos no estructurados.

La Tabla I presenta las variables consideradas en el estudio, junto con una descripción de su significado y la estrategia general empleada para su identificación dentro del texto.

TABLA I. PROPIEDADES EXTRAÍDAS Y ESTRATEGIAS DE IDENTIFICACIÓN.

Propiedad	***Tipo de variable***	***Descripción***	***Estrategia de extracción***
Nanomaterial	Categórica	Tipo de material base	Búsqueda jerárquica en título/ resumen y análisis de frecuencia
Tamaño de partícula	Continua	Dimensión de nanopartículas (nm)	Expresiones regulares multipatrón (media, rango, desviación)
Temperatura	Continua	Condición térmica del proceso	Detección de valores numéricos asociados a °C
Método de síntesis	Categórica	Tipo de proceso (biológico, químico, etc.)	Sistema de puntuación basado en evidencia textual
Morfología	Categórica	Forma estructural	Búsqueda de términos descriptivos
Técnicas de caracterización	Categórica	Métodos de caracterización (SEM, TEM, etc.)	Coincidencia de palabras clave
Cristalinidad	Categórica	Estructura del material	Identificación de términos específicos
Polidispersidad	Continua	Índice de polidispersidad	Expresiones regulares específicas

El proceso de extracción consideró la variabilidad en la forma en que estas propiedades son reportadas en la literatura científica, incorporando múltiples patrones de detección para una misma propiedad. En particular, las variables continuas pueden presentarse como valores promedio, rangos o expresiones con desviación estándar, lo que requiere estrategias flexibles de identificación.

Adicionalmente, se implementaron mecanismos de validación contextual que permiten asegurar la coherencia de los pares propiedad–valor extraídos. Esto implica que los valores identificados no se almacenan de manera aislada, sino que son evaluados en función de su significado dentro del texto. Por ejemplo, un valor asociado al tamaño de partícula solo es considerado válido cuando previamente se ha identificado un nanomaterial, mientras que valores de temperatura se interpretan de acuerdo con el contexto del proceso de síntesis. Este enfoque permite reducir la inclusión de información irrelevante o mal interpretada, mejorando la calidad del conjunto de datos generado.

E. Base de datos

Con el fin de almacenar de manera estructurada la información extraída a partir de literatura científica no estructurada, se diseñó un modelo de base de datos relacional orientado a garantizar la flexibilidad, integridad y trazabilidad de los datos. Dado que las propiedades fisicoquímicas y condiciones experimentales pueden variar entre estudios, se adoptó un enfoque basado en el modelo entidad–atributo–valor (EAV).

Este modelo permite representar de forma flexible múltiples tipos de propiedades sin necesidad de modificar el esquema de la base de datos ante la incorporación de nuevas variables, lo cual resulta especialmente adecuado para dominios donde la información es heterogénea y no completamente estandarizada, como es el caso de la literatura científica sobre nanomateriales. La estructura propuesta se compone de las siguientes entidades principales:

- **Artículo**: representa la fuente documental de la cual se extrae la información, incluyendo atributos como título, año y revista.
- **Nanomaterial**: describe el material base analizado en cada estudio, incluyendo su nombre, tipo y origen.
- **Método de síntesis**: identifica el proceso mediante el cual se obtiene el nanomaterial.
- **Propiedad**: define el tipo de variable extraída (por ejemplo, tamaño de partícula, temperatura, morfología, entre otros).
- **Medición**: constituye la entidad central del modelo, en la cual se almacenan los valores asociados a cada propiedad.

La tabla de medición utilizada implementa el núcleo del modelo EAV, Figura 2; permitiendo representar cada dato extraído como una instancia que vincula un nanomaterial, una propiedad y un valor específico, junto con su unidad, el método de síntesis y el artículo de origen. Esta estructura permite almacenar de manera uniforme tanto variables continuas (por ejemplo, tamaño de partícula o temperatura) como variables categóricas (como morfología o técnicas de caracterización).

La Figura 2 presenta el esquema del modelo relacional propuesto, donde se evidencia la relación entre las diferentes entidades y el papel central de la tabla de medición en la integración de la información.

Este diseño permite mantener la trazabilidad completa de cada dato, facilitando la identificación de su fuente original y el contexto experimental en el que fue reportado. Asimismo, el modelo ofrece alta escalabilidad, ya que la incorporación de nuevas propiedades no requiere modificaciones estructurales, sino únicamente la adición de nuevos registros en la tabla de propiedades, Figura 2.

En conjunto, la implementación de este modelo relacional basado en EAV permite transformar información científica no estructurada en un sistema de datos organizado, flexible y apto para su uso en análisis posteriores y en el desarrollo de herramientas basadas en inteligencia artificial.

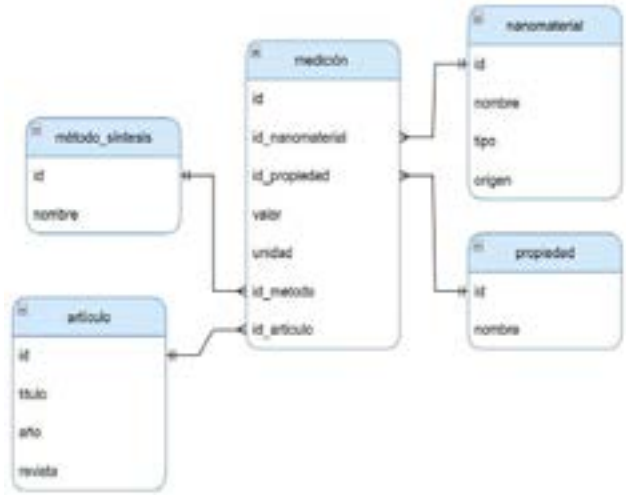


Fig. 2. Modelo Entidad Atributo Valor.

III. Resultados

Con el fin de evaluar el desempeño del pipeline ETL propuesto, se procesó un conjunto de veinte artículos científicos en formato PDF, seleccionados de acuerdo con su relevancia en la caracterización de nanomateriales. A partir de este conjunto, se extrajeron variables fisicoquímicas y de síntesis definidas en la Tabla I, generando un dataset estructurado para su análisis.

A. Metodología de evaluación

Con el fin de evaluar el desempeño de los enfoques implementados, se definió una métrica de completitud orientada a medir la cobertura en la extracción de información. Esta métrica se calcula como la proporción de variables para las cuales el sistema logra identificar un valor dentro del documento, por lo que evalúa capacidad de detección (coverage) y no precisión (accuracy).

Formalmente, la completitud corresponde al promedio de variables detectadas por documento, considerando únicamente aquellas variables válidas según el contexto del artículo, evitando penalizar la ausencia de información no reportada.

Adicionalmente, se calculó la completitud por variable, definida como la proporción de documentos en los cuales se detecta un valor para cada propiedad específica.

B. Resultados del enfoque heurístico

El enfoque basado en reglas heurísticas permitió la identificación de variables mediante patrones definidos y estrategias de análisis textual. Los resultados obtenidos evidencian una completitud promedio cercana al 70%, considerando el conjunto total de variables definidas.

Se observó un mejor desempeño en la extracción de variables con patrones explícitos en el texto, como el tamaño de partícula, el tipo de nanomaterial y el método de síntesis. Sin embargo, variables como el índice de polidispersidad y la cristalinidad presentaron menores tasas de detección, debido a la variabilidad en su representación y a la dependencia de contexto semántico.

C. *Resultados del enfoque basado en LLM*

Los resultados obtenidos muestran una completitud promedio de 81.7%, evidenciando una mejora significativa frente al enfoque heurístico. Este incremento se atribuye a la capacidad del modelo para interpretar información implícita y adaptarse a diferentes formas de reporte en la literatura científica.

En particular, se observó un alto desempeño en la detección de variables con estructuras más consistentes en el texto, como el tamaño de partícula, el método de síntesis y el tipo de nanomaterial, alcanzando valores cercanos o iguales al 100%. Asimismo, variables como temperatura, morfología y técnicas de caracterización presentaron niveles de detección superiores al 90%.

Por otro lado, variables de mayor complejidad semántica, como la cristalinidad y el índice de polidispersidad, presentaron menores niveles de completitud, con valores aproximados de 50% y 25% respectivamente. Estas diferencias evidencian que, aunque el modelo mejora la capacidad de extracción frente a enfoques basados en reglas, aún existen desafíos en la identificación de variables que dependen fuertemente del contexto o que presentan baja frecuencia en la literatura.

D. *Comparación de desempeño por variable*

La Tabla II presenta una comparación del desempeño de ambos enfoques en términos de completitud por variable.

TABLA II. COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO POR VARIABLE

Variable	***Heurístico (%)***	***LLM (%)***
Nanomaterial	85.0	95.0
Tamaño de partícula	88.2	100
Temperatura	75.0	90.0
Método de síntesis	80.0	100
Morfología	85.0	90.0
Técnicas de caracterización	85.0	95.0
Cristalinidad	55.0	50.0
Polidispersidad	5.0	25.0
Promedio	**70**	**81.7**

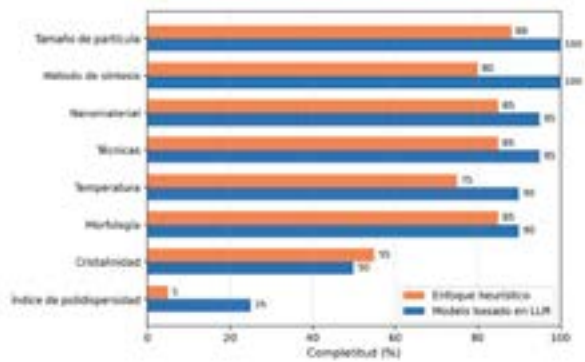


Fig. 3. Comparación del desempeño en términos de completitud entre el enfoque heurístico y el modelo basado en modelos de lenguaje.

Los resultados muestran que el modelo de lenguaje supera de manera consistente al enfoque heurístico en la mayoría de las variables evaluadas, especialmente en el tamaño de partícula, el método de síntesis y las técnicas de caracterización. En estos casos se alcanzan niveles de completitud del 100 %, y valores superiores al 90 % en la caracterización y la identificación del nanomaterial, como se resume en la Figura 3.

La investigación en ciencia de materiales ha evolucionado desde la extracción basada en reglas hacia el empleo de grandes modelos de lenguaje. Por ejemplo, se ha demostrado que modelos afinados de GPT-3 y Llama-2 extraen información general sobre composición, fase, morfología y aplicaciones; otros proyectos han combinado reglas heurísticas, NER y GPT-3.5 para extraer 24 propiedades de 681 000 artículos de polímeros [21], [22], o han utilizado sistemas multi-agente para extraer parámetros cinéticos y características superficiales de nanozimas con precisiones cercanas al 98 % [23]. Estas iniciativas reflejan el avance de las LLM en la extracción de datos experimentales, pero se enfocan en propiedades específicas y no abordan variables como la polidispersidad o la cristalinidad.

En nuestro caso, variables como la cristalinidad presentan un comportamiento particular: el enfoque heurístico logra un desempeño comparable o ligeramente superior, lo que sugiere que, cuando la información se expresa con patrones textuales claros, las reglas heurísticas pueden ser más eficaces. Por su parte, aunque el modelo basado en LLM mejora la detección del índice de polidispersidad, esta variable sigue mostrando bajos niveles de completitud en ambos enfoques, reflejando su alta complejidad semántica y escasa frecuencia en la literatura científica.

En conjunto, estos resultados confirman que el uso de modelos de lenguaje ofrece una mayor capacidad de generalización y adaptabilidad frente a la variabilidad del lenguaje científico. Sin embargo, persisten limitaciones en la identificación de variables altamente especializadas, lo que abre oportunidades para la integración de enfoques híbridos. Por último, conviene señalar que la métrica empleada evalúa la capacidad de detección (coverage) y no la exactitud semántica de los valores extraídos, aspecto que constituye una línea de trabajo futuro.

E. *Integración de resultados y construcción del dataset*

Con base en los resultados obtenidos, el enfoque basado en modelos de lenguaje fue seleccionado para la construcción del dataset final, debido a su mayor desempeño en términos de completitud.

Los datos se consolidaron mediante el proceso de agregación descrito en la metodología, fusionando la información extraída de los distintos fragmentos de cada documento. Durante esta etapa se aplicó un proceso de normalización semántica, apoyado en diccionarios curados y algoritmos de similitud léxica, para reducir la heterogeneidad en la nomenclatura de los nanomateriales. Así, se identificaron equivalencias entre términos como hydroxyapatite, HAp y nHAp y se eliminaron duplicados.

El dataset resultante presenta mayor consistencia y coherencia tras estas tareas de limpieza, lo que facilita su almacenamiento en la base de datos relacional y su uso en análisis posteriores. Como parte de la implementación, se desarrolló una interfaz gráfica en Python que integra las funciones del pipeline ETL. Esta interfaz permite cargar nuevos documentos, visualizar los resultados de la extracción, ejecutar consultas SQL sobre la base de datos y validar manualmente registros conflictivos, lo que demuestra su aplicabilidad para usuarios no técnicos. En las siguientes etapas del proyecto, este dataset servirá como base para entrenar modelos de predicción y validar experimentalmente las recomendaciones obtenidas.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que el enfoque basado en modelos de lenguaje supera al heurístico en términos de completitud para la mayoría de las variables evaluadas. Este comportamiento se explica por la capacidad de los LLM, como GPT-4, de extraer eficazmente información de extensas colecciones de artículos, analizando la información y recuperando detalles pertinentes cuando se les guía mediante técnicas de *prompt engineering* [24], [25] . En nuestra evaluación, esto se tradujo en niveles de completitud superiores al 90 % para el tamaño de partícula, el método de síntesis y las técnicas de caracterización, mientras que el enfoque heurístico alcanzó entre 70 y 88 % en las mismas variables.

Pese a ello, variables como la cristalinidad y el índice de polidispersidad siguen siendo difíciles de capturar. Su aparición escasa en los documentos y su fuerte dependencia del contexto experimental exigen modelos que comprendan secuencias continuas de acciones y condiciones variables; de hecho, se ha señalado que las descripciones de síntesis y procesamiento aparecen como eventos encadenados, con expresiones flexibles y entremezcladas con discusiones experimentales, lo que dificulta la extracción de acciones y parámetros [26]. La literatura sobre materiales también destaca que la variedad de los datos es un reto para la estandarización y que la veracidad (fiabilidad de los datos) es aún más problemática, ya que influye directamente en la confianza sobre los conjuntos de datos [27]. Estas limitaciones justifican la necesidad de incorporar estrategias adicionales de validación semántica, enriquecimiento del contexto o integración de conocimiento experto, especialmente para variables poco frecuentes.

Desde la perspectiva de la **ingeniería de datos**, nuestros resultados confirman la importancia de combinar técnicas de procesamiento estructurado con enfoques basados en modelos pre entrenados. La incorporación de procesos de normalización semántica y validación contextual en pipelines contribuye a mejorar la consistencia y calidad del dataset. Además, diversos trabajos en ciencia de materiales coinciden en que la escasez y heterogeneidad de los datos, así como la presencia de valores inconsistentes o mal etiquetados, son obstáculos importantes para entrenar modelos fiables [27].

En este contexto, la elección de un modelo de datos flexible resulta crucial. El **modelo entidad-atributo-valor (EAV)** facilita la integración de información heterogénea proveniente de diferentes fuentes, lo cual resulta fundamental en escenarios donde las variables no están completamente estandarizadas. Esta flexibilidad responde a la falta de estandarización señalada en la literatura y facilita la inclusión de variables de baja frecuencia, como el índice de polidispersidad, sin comprometer la integridad del modelo de datos [24], [25].

Aunque el presente estudio se basó en un conjunto limitado de documentos, el diseño modular del pipeline sugiere un alto potencial de escalabilidad. Otros trabajos han aplicado filtros heurísticos y modelos de lenguaje a corpora de millones de artículos [22]. Estos precedentes demuestran que los enfoques híbridos pueden escalar y que las bases de datos generadas pueden integrarse con sistemas de análisis avanzados y modelos de inteligencia artificial para el descubrimiento de materiales. Por lo tanto, nuestro pipeline no solo mejora la cobertura de extracción actual, sino que sienta las bases para una ampliación futura y el desarrollo de modelos predictivos sustentados en datos más completos y fiables.

V. CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió el diseño e implementación de un pipeline ETL orientado a la estructuración automática de información científica sobre nanomateriales a partir de literatura no estructurada. La arquitectura propuesta demostró ser efectiva para transformar datos dispersos y heterogéneos en un dataset organizado, facilitando su almacenamiento, consulta y análisis.

Los resultados obtenidos evidenciaron que el enfoque basado en modelos de lenguaje presenta un mejor desempeño global en términos de completitud frente al enfoque heurístico, destacándose por su capacidad de adaptación a la variabilidad en la forma de reporte de la información científica. No obstante, ambos enfoques presentan limitaciones en la extracción de variables altamente dependientes del contexto o con baja frecuencia en la literatura, lo cual señala oportunidades de mejora en futuras investigaciones.

Desde la perspectiva de la ingeniería de datos, este trabajo demuestra la viabilidad de integrar técnicas tradicionales de procesamiento de datos con modelos de inteligencia artificial para la construcción de datasets científicos estructurados. Asimismo, el uso de un modelo de base de datos flexible basado en el enfoque entidad–atributo–valor (EAV) permitió garantizar la escalabilidad y adaptabilidad del sistema frente a la incorporación de nuevas variables.

En conjunto, el sistema desarrollado constituye una base sólida para el desarrollo de herramientas avanzadas de análisis y optimización en el campo de los nanomateriales derivados de biomasa. Como trabajo futuro, se plantea la ampliación del corpus documental, la incorporación de métricas de evaluación semántica más robustas y el uso de modelos de lenguaje más avanzados que permitan mejorar la precisión en la extracción de información.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la convocatoria No. 963:- Convocatoria Orquídeas: Mujeres en Inteligencia Artificial, Ciencias y Tecnologías Cuánticas 2025 por la financiación de estas iniciativas interdisciplinarias para el fortalecimiento de los territorios.

REFERENCIAS

[1] D. Coppola, C. Lauritano, F. P. Esposito, G. Riccio, C. Rizzo, and D. de Pascale, 'Fish Waste: From Problem to Valuable Resource', *Mar. Drugs*, vol. 19, no. 2, Feb. 2021, doi: 10.3390/MD19020116.

[2] P. C. Nath *et al.*, 'Biogeneration of Valuable Nanomaterials from Agro-Wastes: A Comprehensive Review', *Agronomy*, vol. 13, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/agronomy13020561.

[3] G. Guru and G. Digvijay, 'Biopolymer Derived from Local Fish Waste', doi: 10.13140/RG.2.2.30189.29923.

[4] I. L. , V. D. Y. Ortiz, 'Desarrollo en Tumaco desde la Perspectiva de la Pesca Artesanal', Universidad de Nariño, San Andrés de Tumaco, 2007.

[5] P. Fernández-Izquierdo *et al.*, 'Isolation and characterization of polyhydroxyalkanoate-producing bacteria from seawater samples (Tumaco)', *Univ. Sci. (Bogota).*, vol. 28, no. 2, pp. 141–163, 2023, doi: 10.11144/Javeriana.SC282.iaco.

[6] L. Chen, P. He, H. Zhang, W. Peng, J. Qiu, and F. Lü, 'Applications of machine learning tools for biological treatment of organic wastes: Perspectives and challenges', Jun. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cec.2024.100088.

[7] J. J. Mim *et al.*, 'The emerging role of machine learning in nanomaterials research: applications, challenges, and future directions', Nov. 01, 2025, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s11051-025-06472-2.

[8] B. Lee *et al.*, 'Statistical Characterization of the Morphologies of Nanoparticles through Machine Learning Based Electron Microscopy Image Analysis', *ACS Nano*, vol. 14, no. 12, pp. 17125–17133, Dec. 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c06809.

[9] A. M. Hiszpanski *et al.*, 'Nanomaterial Synthesis Insights from Machine Learning of Scientific Articles by Extracting, Structuring, and Visualizing Knowledge', *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 60, no. 6, pp. 2876–2887, Jun. 2020, doi: 10.1021/acs.jcim.0c00199.

[10] B. R. Jany, 'Machine Learning techniques in microscopic characterisation of nanomaterials', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1324, no. 1, p. 012007, Feb. 2025, doi: 10.1088/1757-899x/1324/1/012007.

[11] G. Konstantopoulos, E. P. Koumoulos, and C. A. Charitidis, 'Digital Innovation Enabled Nanomaterial Manufacturing; Machine Learning Strategies and Green Perspectives', Aug. 01, 2022, *MDPI.* doi: 10.3390/nano12152646.

[12] J. J. Scott-Fordsmand and M. J. B. Amorim, 'Using Machine Learning to make nanomaterials sustainable', Feb. 10, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160303.

[13] B. Fang *et al.*, 'Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review', Aug. 01, 2023, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.* doi: 10.1007/s10311-023-01604-3.

[14] R. Kimball and J. Caserta, *The Data Warehouse Etl Toolkit: Practical Techniques for Extracting, Cleaning, Conforming, and Delivering Data*, 1st ed. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc., 2004.

[15] M. Zaharia *et al.*, 'Apache spark: A unified engine for big data processing', *Commun. ACM*, vol. 59, no. 11, pp. 56–65, Nov. 2016, doi: 10.1145/2934664.

[16] N. Noori and I. Moghim, 'Artificial Intelligence in Nanomaterials: A Mini Review on Characterization and Biomedical Implications', *Advances in Applied NanoBio-Technologies*, vol. 4, no. 4, pp. 31–36, 2023.

[17] R. O. Zuluaga Gallego *et al.*, 'Nanomateriales de celulosa obtenidos a partir de residuos agroindustriales y agroalimentarios de origen colombiano: un mundo de posibilidades', in *Nanocelia. Producción de celulosa nanofibrilada y microfibrilada en Iberoamérica*, Astra Ediciones, 2024, pp. 151–190. doi: 10.61728/ae20246075.

[18] M. I. Jordan and T. M. Mitchell, 'Machine learning: Trends, perspectives, and prospects', *Science (1979).*, vol. 349, no. 6245, pp. 255–260, Jul. 2015, doi: 10.1126/science.aaa8415.

[19] A. del Bosque, P. Fernández-Arias, and D. Vergara, 'Machine Learning for Nanomaterial Discovery and Design', *Mach. Learn. Knowl. Extr.*, vol. 8, no. 1, p. 10, Jan. 2026, doi: 10.3390/make8010010.

[20] T. B. Brown *et al.*, 'Language Models are Few-Shot Learners', *Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, pp. 1877–1901, Jul. 2020, doi: https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.14165.

[21] S. Gupta, A. Mahmood, P. Shetty, A. Adeboye, and R. Ramprasad, 'Data extraction from polymer literature using large language models', *Commun. Mater.*, vol. 5, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s43246-024-00708-9.

[22] J. Dagdelen *et al.*, 'Structured information extraction from scientific text with large language models', *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-45563-x.

[23] R. Odobesku *et al.*, 'Agent-based multimodal information extraction for nanomaterials', *NPJ Comput. Mater.*, vol. 11, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41524-025-01674-7.

[24] S. Batra, S. Sachdeva, and S. Bhalla, 'Entity Attribute Value style modeling approach for archetype based data', *Information (Switzerland)*, vol. 9, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.3390/info9010002.

[25] S. Karcher *et al.*, 'Integration among databases and data sets to support productive nanotechnology: Challenges and recommendations', *NanoImpact*, vol. 9, pp. 85–101, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.impact.2017.11.002.

[26] X. Jiang, W. Wang, S. Tian, H. Wang, T. Lookman, and Y. Su, 'Applications of natural language processing and large language models in materials discovery', Dec. 01, 2025, *Nature Research*. doi: 10.1038/s41524-025-01554-0.

[27] L. Himanen, A. Geurts, A. S. Foster, and P. Rinke, 'Data-Driven Materials Science: Status, Challenges, and Perspectives', Nov. 01, 2019, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/advs.201900808.

Localización de Fuentes Cerebrales a Partir de la Descomposición Multivariada de Modos en Señales Sintéticas de EEG

Claudia Milena Gonzalez Arbelaez
Tecnología en Instrumentación Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
cmgonzalez@uniquindio.edu.co

Pablo Andres Munoz Gutierrez
Tecnología en Instrumentación Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
pamunoz@uniquindio.edu.co

Diego Fernando Ramirez Jimenez
Ingenieria Electronica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
dframirez@uniquindio.edu.co

***Abstract*— Los métodos de descomposición por modos frecuenciales, como descomposición empírica de modos (EMD – de sus siglas en inglés) y la descomposición variacional de modos (VMD – de sus siglas en Inglés), son técnicas para el procesamiento de señales que permiten obtener los diferentes modos frecuenciales de una señal, sin establecer un conjunto de señales ortogonales o una forma de onda específica para obtener las componentes frecuenciales de la señal. La localización de fuentes cerebrales es un método que busca inferir la distribución de las fuentes de corriente a partir de las medidas, en este caso, de electroencefalografía (EEG). Esta estimación se logra a través de la solución del problema inverso neuromagnético y un modelo de cabeza que permiten buscar la solución más aproximada para esta distribución de fuentes. Esta localización de fuentes cerebrales requiere del análisis de múltiples canales de información, provenientes de un EEG, para poder estimar la distribución de las mismas o la ubicación de una fuente específica si es necesario; para tal fin se tiene el método multivariado de los métodos de descomposición de modos, el cual permite analizar todos los canales simultáneamente y mejorar la localización de las fuentes específicas. En este trabajo se presentan algunos resultados que comparan, la localización de fuentes cerebrales simuladas a partir de un modelo de cabeza estándar y señales con diferentes frecuencias (dentro de las bandas de frecuencia de las señales cerebrales), usando las técnicas de descomposición de modos multivariados y sin aplicar esta técnica de preprocesamiento de las señales. Los resultados obtenidos muestran como la localización de las fuentes mejora al usar las técnicas de preprocesamiento basadas en la descomposición de modos frecuencias, para tal fin se utilizó como técnica para la solución del problema inverso neuromagnético, el método de *multiple sparse prior (MSP)* y como medida de comparación se utilizó la medida de Wasserstein.**

Keywords: Descomposición empírica de modos multivariada, Descomposición variacional de modos multivariada, localización de fuentes cerebrales.

I. Introducción

Un Electroencefalograma (EEG) permiten localizar la actividad eléctrica neuronal mediante mediciones no invasivas de señales electromagnéticas externas. Entre las técnicas de imagen funcional disponibles, el EEG tiene resoluciones temporales inferiores a 100 ms (Una gran resolución temporal). Esta precisión temporal permite explorar la sincronización de los procesos neuronales básicos a nivel de ensamblajes celulares [7].

Uno de esos beneficios en el área de la medicina, es el apoyo que se le presta a los médicos en tareas que normalmente son complejas y requieren del análisis de una gran cantidad de datos para la clasificación de señales de un EEG y la localización de fuentes cerebrales que, incluso hasta el día de hoy, siguen siendo uno de los principales problemas abordados a través del análisis de un EEG [3], para poder estudiar los desórdenes neuronales como en personas que padecen de Epilepsia u otras enfermedades neurológicas. La localización de fuentes usando EEG ha sido un área activa de investigación, ya que proporciona información útil para el estudio de diferentes enfermedades neuronales [8][9].

A lo largo de este trabajo, a partir de señales cerebrales sintéticas que simulan un EEG con una actividad determinada, se lleva a cabo un análisis de dichas señales por medio de métodos de descomposición de modos variacionales, como el método de descomposición empírica de modos multivariada (MEMD) y el método de descomposición variacional de modos multivariada (MVMD) [1][10], estas técnicas permiten descomponer las señales cerebrales en diferentes modos frecuenciales [2][11] para llevar a cabo la reconstrucción de la actividad cerebral a través de técnicas de solución al problema neuromagnético inverso para obtener la ubicación de las fuentes cerebrales de forma selectiva a partir de sus componentes frecuenciales [5][3][12].

II. MARCO TEÓRICO

La magnetoencefalografía (MEG) y la electroencefalografía (EEG) son técnicas de imagen cerebral no invasivas que proporcionan mediciones de alta resolución temporal de campos magnéticos y eléctricos en el cuero cabelludo

generados por la activación sincrónica de poblaciones neuronales. La localización de regiones activas en el cerebro a partir de datos MEG y EEG requiere resolver el problema inverso neuromagnético [13][14], que consiste en estimar la distribución de corriente cerebral subyacente a una serie temporal de mediciones en el cuero cabelludo. La mayoría de los métodos de localización de fuentes asumen que las mediciones del cuero cabelludo y sus fuentes subyacentes son independientes a lo largo del tiempo, y se imponen restricciones previas probabilísticas o computacionales convenientes para obtener soluciones únicas [13][14]. Los métodos recientes para la localización de fuentes han incorporado restricciones de suavidad temporal como parte de un marco bayesiano general. El enfoque adoptado en estos métodos es especificar una distribución previa arbitraria para las fuentes dipolares en el espacio y el tiempo, a veces en términos de funciones básicas, con interacciones limitadas o separables en el espacio-tiempo para obtener algoritmos de estimación simplificados. En general, si bien estos métodos incorporan la estructura temporal en sus modelos, especifican interacciones espaciotemporales altamente restringidas, como la separabilidad del espacio-tiempo o la independencia espacial, que pueden no reflejar con precisión las relaciones dinámicas entre las diferentes áreas del cerebro [14].

A. Modelo de la actividad cerebral.

Luego de los métodos bajo los que se analizaron las señales sintéticas, está el tema de la reconstrucción de la actividad cerebral y para ello entender el campo electromagnético medido por señales de EEG, para lo cual se considera el siguiente modelo lineal que evoluciona a través del eje del tiempo:

$$Y_k = Mx_k + \varepsilon_k \quad (1)$$

Donde $Y_k \in \mathbb{R}^{d\times 1}$ es el regsitro EEG medido colocando $d \times 1$ electrodos en la superficie del cuero cabelludo en el instante $k \in \mathbb{R}^+; M \in \mathbb{R}^{d\times n}$ es la matriz de campo que interpreta la relación entre el número $n \in I$ de las fuentes distribuidas dentro del cerebro y a la actividad del EEG del sensor; $X_k \in \mathbb{R}^{d\times 1}$ es la actividad de la fuente cortical y $\varepsilon_k \in \mathbb{R}^{d\times 1}$ es el ruido de observación medido con la covarianza espacial $\Sigma_\varepsilon \in \mathbb{R}^{d\times d}$ [16][17].

Algunos métodos proponen mapeos que promueven soluciones focales (es decir, suaves, pero focales al mismo tiempo), producen una mejor reconstrucción de la fuente que otros, que son puramente suavizados o basados en una representación escasa. Es por esto que se incorporan ciertas restricciones tanto espaciales como temporales las cuales son [16]:

$$X_k = \Phi_s C_k \quad (2)$$
$$Y_k = M\Phi_s C_k + \varepsilon_k \quad (3)$$
$$C_k = F(C_{k-1}, \dots, C_{k-m}, W_k) + \eta_k \quad (4)$$
$$W_k = g(W_{k-1}) + \varepsilon_k \quad (5)$$

Donde la función F es una función vectorial que configura y muestra el cambio en el tiempo de las muestras temporales de la actividad neuronal C_k, W_k contiene unos parámetros de la función F y ηk es un ruido aditivo. Para obtener una representación significativa en la Ec. (4), se desarrolló un modelo no lineal discreto, lo que implica que el comportamiento dinámico de cada fuente varía en el tiempo y evoluciona independientemente de los demás. También se usa este modelo para reproducir la actividad neuronal a través de la función vectorial variable en el tiempo F que incorpora la conectividad corticotalámica y la no linealidad talámica en cada fuente [16], de la siguiente manera:

$$F(C_{k-1}, C_{k-2}, C_{k-\tau}, W_k) = A_1 C_{k-1} + A_2 C_{k-2} + A_3 C_{k-\tau} + A_4 C_{k-1}^2 + A_5 C_{k-1}^3 \quad (6)$$

donde A_i es cada matriz de parámetros correspondiente que contiene la dinámica de la actividad neuronal. El valor A_1 denota la retroalimentación instantánea debido a las neuronas cercanas, A_2 es la velocidad de decaimiento de la actividad del campo, A_3 es la retroalimentación retardada a través del bucle extracortical, τ es el tiempo de retardo de la retroalimentación a través del bucle A_4 y A_5 son las no linealidades asociadas con la velocidad de activación de las neuronas excitatorias e inhibidoras, respectivamente [16].

B. Estimación de la actividad neuronal dentro del marco del problema inverso.

Teniendo en cuenta la formulación iterativa del problema inverso , se reformula la estimación de la actividad neuronal X_k en (1) y los parámetros del modelo W_k en (5) para un modelo de espacio de estado restringido con (1), (2), (4) y (5), dentro del siguiente marco de optimización en donde dichas ecuaciones quedaron de la siguiente manera:

Minimizando C_k y W_k

$$\|C_k - \hat{C}_{k-1}\|_{2,\Sigma_\varepsilon}^2 \quad (7)$$

Sujeto a:

$$\|C_k\|_l^l \quad (8)$$
$$\|C_k - \hat{C}_{k-1}\|_{2,\Sigma_\eta}^2 \quad (9)$$

Donde $\hat{C}_k$ es la estimación de C en instantes de tiempo k. Al combinar estas ecuaciones surge un funcional regularizado como se verá a continuación:

$$J_l(C_k, \rho_k, \lambda_k) = \|Y_k - M\Phi_s C_k\|_{2,\Sigma_\varepsilon}^2 + \rho_k^2 \|C_k\|_l^l + \lambda_k^2 \|C_k - \hat{C}_{k-1}\|_{2,\Sigma_\varepsilon}^2 \quad (10)$$

Donde ρ_k y λ_k son los parámetros de regularización que rigen la minimización del término funcional correspondiente y cuando la actividad neurológica es estimada, $\hat{C}_k$ es la solución para dicho funcional mostrado en la ecuación (10) y

optimizando la ecuación número (1) para dar solución a la (10), se obtiene:

$$\hat{C}_k = (\Phi_s^T M^T M \Phi_s + \rho_k^2 \mathrm{I}_s + \lambda_k^2 \mathrm{I}_s)^{-1} * \left(\Phi_s^T M^T \mathrm{Y}_k + \lambda_k^2 \hat{C}_{k-1}\right) \quad (11)$$

Donde I_s es la matriz identidad [16][6].

C. Múltiples antecedentes dispersos (MSP de sus siglas en ingles).

En el enfoque MSP, el espacio fuente del dipolo está restringido a los nodos de una malla de superficie cortical. Sobre la base de esta malla de superficie, se construyen los componentes de covarianza $\{Q_1, Q_2, \ldots, Q_{Np}\}$ cada uno de los cuales corresponde a un parche focal localmente de la corteza. Los componentes de covarianza se construyen utilizando las columnas de una función de Green, $Q_G \in \mathbb{R}^{N_d \times N_d}$ definida como:

$$Q_G = e^{\sigma G_l} \quad (12)$$

Donde N_d es la amplitud de los dipolos con orientaciones espaciales fijas y N_p son fuentes cerebrales ya predefinidas [19].

Y calculado el Laplaciano $G_L \in \mathbb{R}^{N_d \times N_d}$, con información de conectividad entre dipolos que contiene los dipolos vecinos, y σ, un valor constante positivo que determina la suavidad de la distribución actual o la extensión espacial de las regiones activadas del cerebro [19]. El Laplaciano G_L se calcula utilizando una matriz de adyacencia correspondiente a los vértices y caras proporcionados por la malla de la superficie cortical. Como tal, cada columna de Q_G se corresponde con un parche cortical, con un ancho completo de la mitad del máximo dependiendo de los dipolos vecinos y el factor de suavizado σ que es igual a 0,6 en el software implementado. Los centros de estos parches corresponden al conjunto original de dipolos utilizados para formar la matriz del campo general de la actividad cerebral [19][20][21].

D. Componentes frecuenciales como restricciones.

La localización de fuentes MEG/EEG se basa en una amplia gama de técnicas de procesamiento de señales [7]. Para este trabajo, las técnicas que se usaron para analizar las señales cerebrales una vez reconstruida la actividad cerebral y generadas ya las señales sintéticas, fueron el MEMD y la MVMD.

Descomposición de modo empírica multivariante (Proviene de las siglas en inglés de MEMD). Con este método se tomaron proyecciones de señales en múltiples direcciones que se distribuyeron de manera uniforme dentro de un espacio n-dimensional para obtener múltiples envolventes que se promediaron y luego interpolaron sus extremos para estimar la media n-dimensional local. El algoritmo para MEMD se describe en [4].

Descomposición de modo variacional (Proviene de las siglas en inglés de MVMD). Este método utiliza técnicas variacionales, y el objetivo principal es descomponer la señal original en su número discreto de modos principales o submodos que tienen propiedades dispersas específicas, teniendo en cuenta también la reconstrucción de la señal original a partir de estos modos. En pocas palabras, el objetivo final es descomponer la señal en sus respectivos modos, que oscilan alrededor de una frecuencia llamada frecuencia central que debemos calcular. Esto significa que cada uno de los submodos tendrá una frecuencia central ω_k que se calcula durante la descomposición. El cálculo del ancho de banda (frecuencia central) para cada modo describe en [8].

E. Medida o métrica de Wasserstein.

La distancia de Wasserstein, más conocida con el término inglés de "*Earth Mover's Distance*" (EMD), es una medida de distancia entre distribuciones que mide el coste mínimo necesario para transformar una distribución en otra. Imaginando las distribuciones como dos montones de tierra, y de ahí el nombre de la distancia, el coste de transformar un montón de tierra en otro es igual a la cantidad de tierra a mover multiplicada por la distancia que hay que moverla [18]. El cálculo de esta medida, se llega en resumen a la siguiente expresión:

$$EMD(A,B) = \left|\tilde{A}\right| + \left|\tilde{B}\right| - 2\left|\tilde{A} \cap \tilde{B}\right| \quad (13)$$

En donde A y B son las respectivas distribuciones [18], que en este caso se compararon, las cuales son las fuentes simuladas originalmente con las obtenidas mediante el método respectivo de reconstrucción de la actividad cerebral.

F. Generación de las señales sintéticas de la actividad cerebral.

En este caso, se seleccionan tres fuentes ubicadas aleatoriamente en el cerebro, para lo cual la actividad en cada fuente se genera de acuerdo a la siguiente expresión:

$$X_i(t_k) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t_k - C_i}{\sigma}\right)^2} * \sin(2\pi f_i t_k) \quad (14)$$

Siendo C_i el centro de la señal enventanada en segundos (1s, 2s y 3s) con el fin de observar las 3 señales en diferentes tiempos, y fi la frecuencia de la señal (de la cual se tomaron valores entre las bandas ya establecidas, banda alfa, delta, beta, teta y gama), con i tomando valores enteros y σ en números reales. La actividad en ventana se selecciona para obtener señales de EEG que contienen frecuencias específicas solo para tiempos finitos, lo que facilita el análisis de rendimiento de los métodos de pre-procesamiento que se prueban. El EEG se simula de acuerdo a (1). El comportamiento de la actividad de la fuente descrito en (3) puede verse en señales EEG reales,

como potenciales evocados resultantes de estímulos visuales o imágenes mentales [4].

III. MARCO EXPERIMENTAL

A. Actividad cerebral simulada.

La actividad cerebral que fue simulada se generó a partir de una función gaussiana mezclada con una señal senoidal que permite manejar y variar la frecuencia de la actividad que se genera y cambiar su desplazamiento en el tiempo. Esto que se describe, lo define (14), expresión que muestra cómo se determina $X_i(t_k)$, variable expresada en (1) y que al ser multiplicada por el modelo de cabeza M (Modelo de cabeza implementado), además del ruido ε_k, para generar Y_k que representa el EEG simulado [4][16][17].



Fig. 1. Actividad simulada.

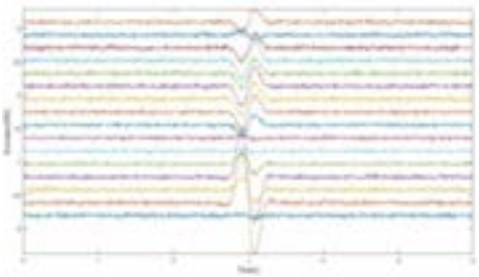


Fig. 2. EEG generado.

La Fig. 1 muestra la señal o pulso que genera la actividad cerebral obtenido con la ecuación (14) y en este caso, como se puede evidenciar, se generó actividad en el instante de tiempo t=3s con una frecuencia de 2Hz. Por otro lado, en la Fig. 2 se puede observar el EEG generado usando (1).

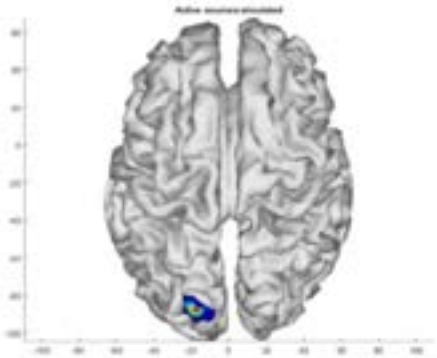


Fig. 3. Ubicación de la fuente activa.

La Fig. 3, muestra la ubicación de la fuente activa en el modelo de cabeza utilizado.

B. Funciones de modo intrínseco (IMF).

La descomposición empírica de modos (de las siglas en inglés EMD *Empirical Mode Decomposition*) modelos una señal a través de la suma de componentes oscilatorios llamados funciones de modo intrínseco (de sus siglas en inglés IMF *Intrinsic Mode Function*). Las IMFs representan los modos intrínsecos temporales que caracterizan los datos.

Una señal de actividad simulada en el instante de tiempo de 1 s y con una frecuencia de 2Hz, es procesada usando MEMD y se obtuvieron 10 IMFs, la Fig. 4, la Fig. 5 y la Fig. 6, muestran las IMFs 1, 4 y 6 respectivamente. Como se puede ver en estos modos frecuenciales, las componentes temporales aportan elementos de frecuencia alta asociadas a ruido u otros elementos temporales que no describen la señal simulada.

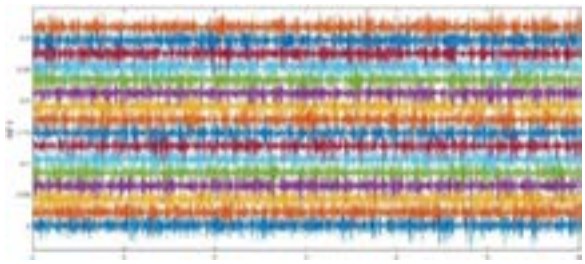


Fig. 4. IMF 1.

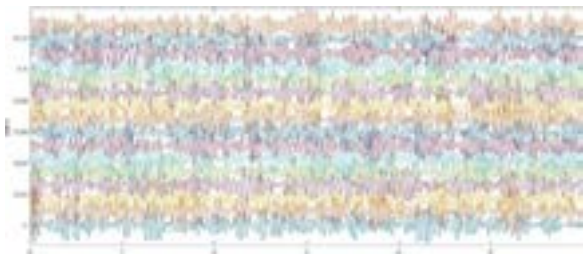


Fig. 5. IMF 4.

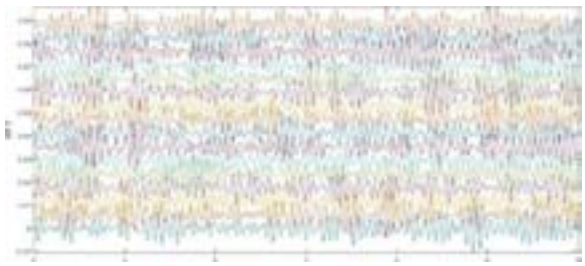


Fig. 6. IMF 5.

Ahora, en la Fig. 7, la Fig. 8 y la Fig. 9, se pueden ver las funciones de modo IMFs 7, 8 y 10 respectivamente; en estas figuras se puede observar el componente temporal que describe la señal simulada.

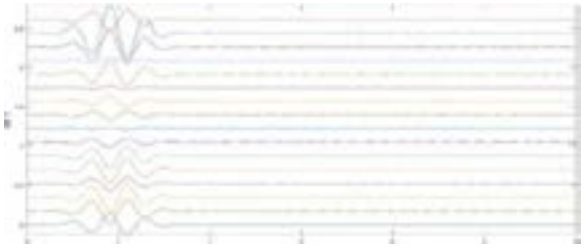


Fig. 7. IMF 7.

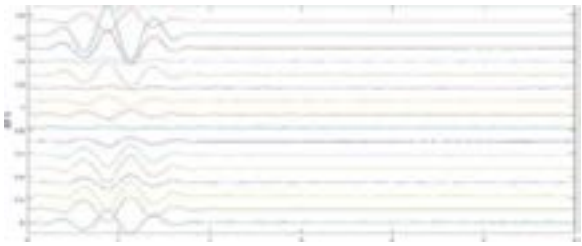


Fig. 8. IMF 8.

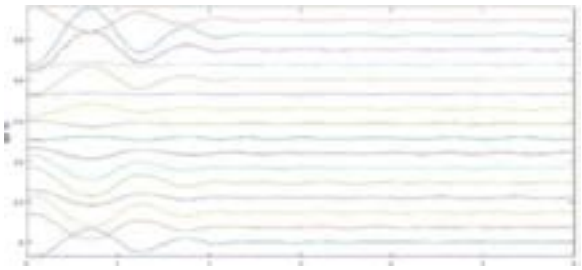


Fig. 9. IMF 10.

Para determinar cuales componentes usar para la reconstrucción de la actividad cerebral, se analiza la energía total y la entropía de cada IMF, y se selecciona aquella que arroje los mayores valores para estos dos modos estadísticos.

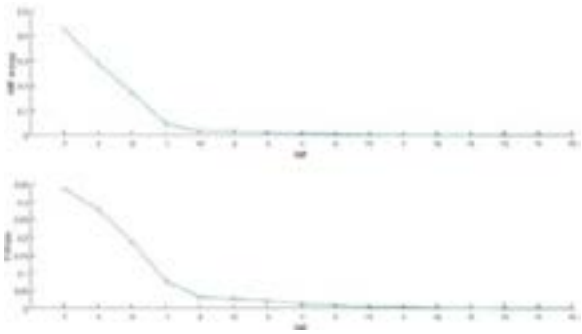


Fig. 10. Energía vs IMFs (Arriba) y Entropia vs IMFs (Abajo).

La Fig. 10, en la parte de arriba, se pueden ver los valores de energía de cada IMF, con la IMF 7 con información desde el punto de vista energético; y en la parte de abajo, igualmente, la IMF 7 contiene mayor información estocástica de la señal.

IV. Localización de fuentes cerebrales.

Establecido este marco experimental la actividad cerebral simulada fue con base y teniendo en cuenta las bandas frecuenciales en las que se perciben los cambios en actividades cognitivas y perceptivas en el cerebro. Dichas bandas frecuenciales son: **Banda delta** (Oscila entre los 1-4 Hz), **banda teta** (Oscila entre los 4-7 Hz), **banda alfa** (Oscila entre los 7-13 Hz), **banda beta** (Oscila entre los 13-30 Hz) y la **banda gama** (Oscila entre los 30-150 Hz) [24]

A. EEG de 16 canales y una fuente activa.

Una de las pruebas realizadas fue en la banda DELTA de frecuencias cerebrales, con una señal de 2Hz. La Fig. 11 muestra la ubicación de fuente cerebral activa y la Fig. 12 la actividad cerebral simulada en un EEG de 16 canales en 1s.

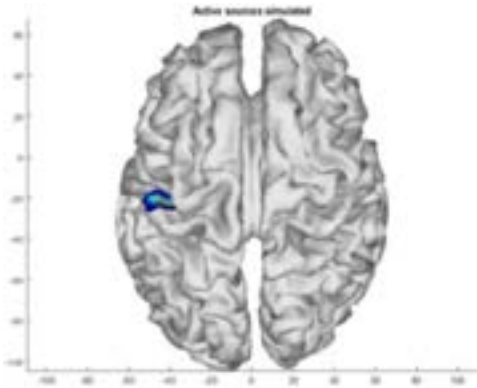


Fig. 11. Ubicación original de la fuente activa de 2Hz.

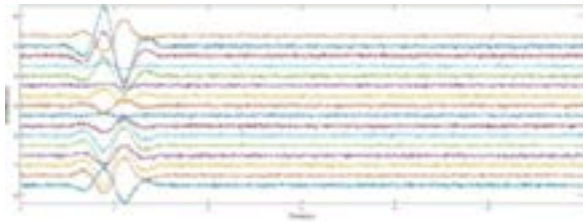


Fig. 12. Actividad cerebral simulada con frecuencia de 2Hz.

La Fig. 13 muestra la energía (arriba) y la entropía (abajo) de las IMFs obtenidas usando MEMD y la Fig. 14 muestra la IMF 7 donde se concentra la mayor energía y la mayor entropía del EEG simulado.

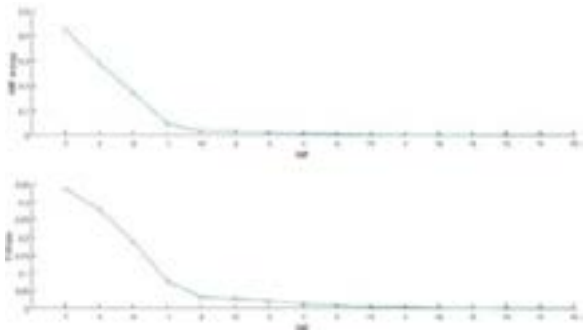


Fig. 13. Energía (Arriba) y Entropia (Abajo) vs IMFs (MEMD), EEG 2Hz.

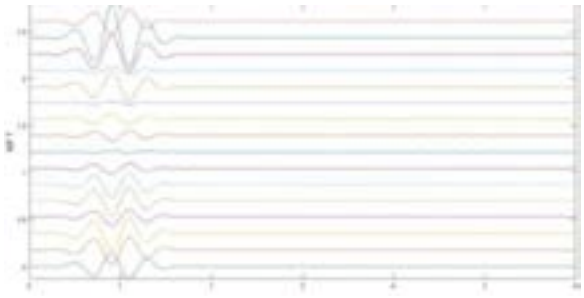


Fig. 14. IMF 7 (MEMD) EEG 2Hz.

En la Fig. 15 se observa la reconstrucción completa de la actividad cerebral con MSP y haciendo uso del método MEMD; esta reconstrucción se realizó usando solo la IMF 7 y como se puede observar, la ubicación de la fuente es similar a la de la actividad original (Fig. 11) y con una medida de Wasserstein de 1.7539. La Fig. 16 muestra la reconstrucción de la actividad cerebral con MSP y sin procesar el EEG usando MEMD, se puede observar que la ubicación de la fuente es similar a la de la actividad original (Fig. 11), sin embargo, la medida de Wasserstein fue de 1.8027, superior a la obtenida con la reconstrucción usando MEMD.

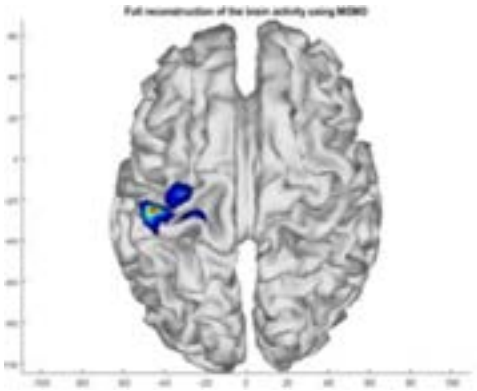


Fig. 15. Actividad cerebral reconstruida usando MEMD y MSP.

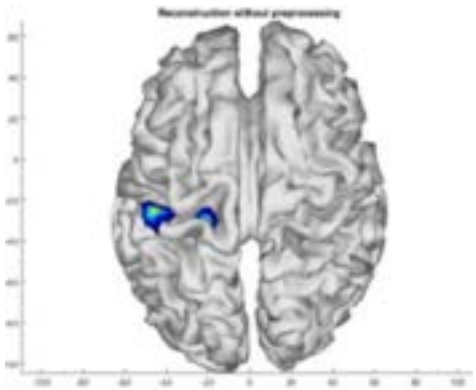


Fig. 16. Actividad cerebral reconstruida usando MSP sin MEMD.

La Fig. 17 muestra la energía (arriba) y la entropía (abajo) de las IMFs obtenidas usando MVMD y la Fig. 18 muestra la IMF 2 donde se concentra la mayor energía y la mayor entropía del EEG simulado.

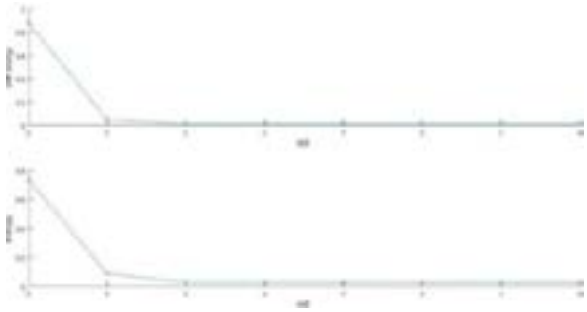


Fig. 17. Energía (Arriba) y Entropia (Abajo) vs IMFs (MVMD), EEG 2Hz.

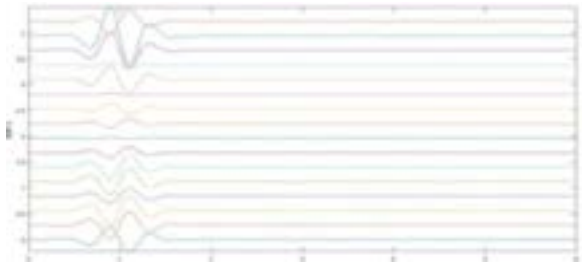


Fig. 18. IMF 2 (MVMD) EEG 2Hz.

En la Fig. 19 se observa la reconstrucción completa de la actividad cerebral con MSP y haciendo uso del método MVMD; esta reconstrucción se realizó usando solo la IMF 2 y como se puede observar, la ubicación de la fuente es similar a la de la actividad original (Fig. 11) y con una medida de Wasserstein de 1.5128. La Fig. 20 muestra la reconstrucción de la actividad cerebral con MSP y sin procesar el EEG usando MVMD, se puede observar que la ubicación de la fuente es similar a la de la actividad original (Fig. 11), sin embargo, la medida de Wasserstein fue de 1.7539, superior a la obtenida con la reconstrucción usando MVMD.

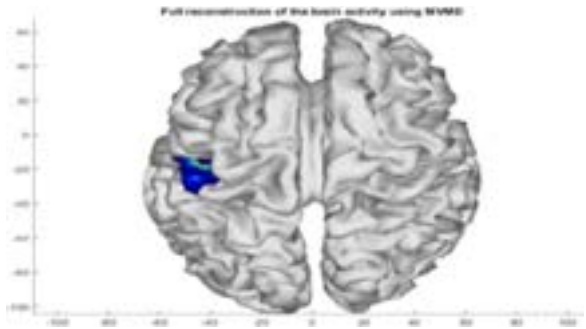


Fig. 19. Actividad cerebral reconstruida usando MVMD y MSP.

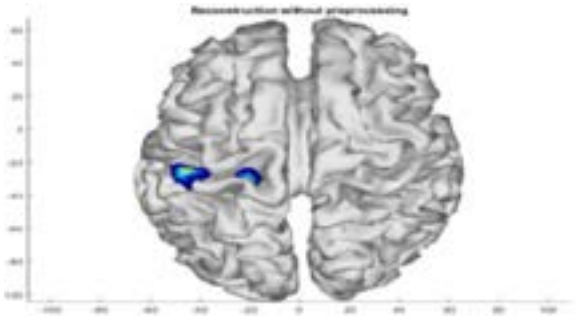


Fig. 20. Actividad cerebral reconstruida usando MSP sin MVMD.

B. EEG de 16 canales y dos fuentes activas.

Esta prueba se realizó mezclando las bandas DELTA y GAMA de frecuencias cerebrales, con una señal de 2Hz y otra de 45Hz. La Fig. 21 muestra la ubicación de las fuentes cerebrales activas y la Fig. 22 la actividad cerebral simulada en un EEG de 16 canales en 1s y 3s.

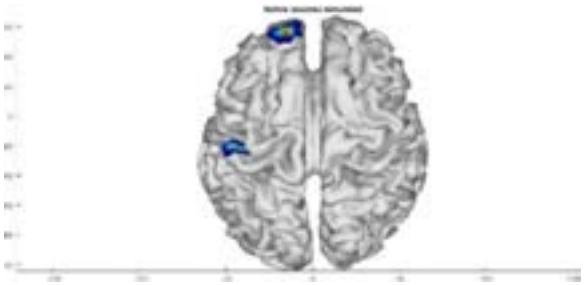


Fig. 21. Ubicación original de las fuentes activas de 2Hz y 45Hz.

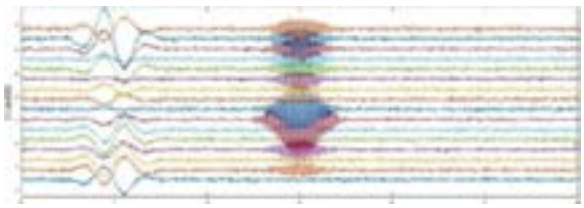


Fig. 22. Actividad cerebral simulada con frecuencias de 2Hz y 45Hz.

La Fig. 23 muestra la energía (arriba) y la entropía (abajo) de las IMFs obtenidas usando MEMD, la Fig. 24 muestra la IMF 8 donde se concentra la mayor energía y la mayor entropía del EEG simulado para la fuente activa de 2Hz y la Fig. 25 muestra el IMF 2 donde se concentra la mayor energía y la mayor entropía del EEG simulado para la fuente activa de 45Hz.

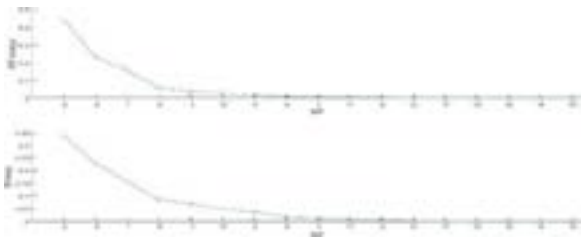


Fig. 23. Energía (Arriba) y Entropia (Abajo) vs IMFs (MEMD), EEG 2 y 45Hz.

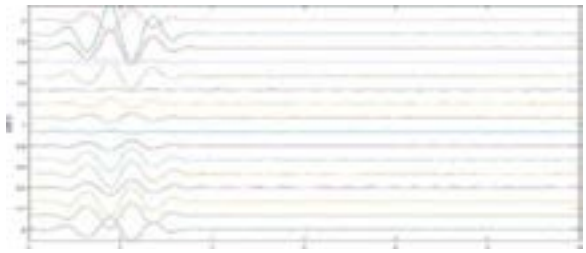


Fig. 24. IMF 2 (MEMD) EEG 2Hz.

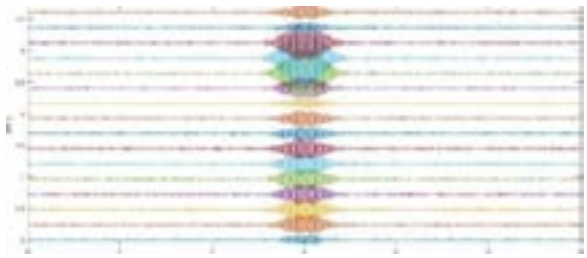


Fig. 25. IMF 8 (MEMD) EEG 45Hz.

En la Fig. 26 se observa la reconstrucción completa de la actividad cerebral con MSP y haciendo uso del método MEMD; esta reconstrucción se realizó usando las IMF 2 y 8 y como se puede observar, la ubicación de la fuente es similar a la de la actividad original (Fig. 21) y con una medida de Wasserstein de 2.1800. La Fig. 27 muestra la reconstrucción de la actividad cerebral con MSP y sin procesar el EEG usando MEMD, se puede observar que la ubicación de la fuente no es tan similar a la de la actividad original (Fig. 21), además, la medida de Wasserstein fue de 3.3112, superior al obtenido con la reconstrucción usando MEMD.

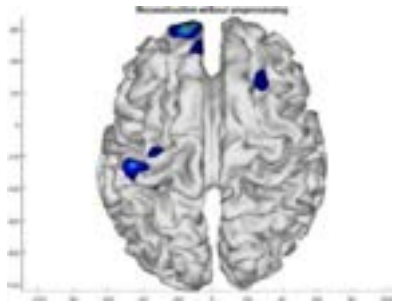


Fig. 26. Actividad cerebral reconstruida usando MEMD y MSP.

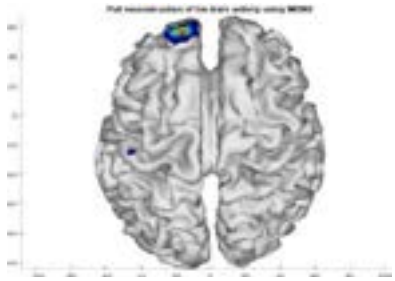


Fig. 27. Actividad cerebral reconstruida usando MSP sin MEMD.

V. CONCLUSIONES

Al momento de realizar la reconstrucción de la actividad cerebral, siempre se obtuvo un mejor resultado cuando hubo procesos previos de descomposición de las señales cerebrales a comparación de la reconstrucción sin procesamiento previo. Por ende, de obtiene un mayor acercamiento al modelo original realizando los procesos de descomposición de las señales (MEMD y MVMD).

Los métodos por descomposición de modos muestran una gran cualidad para separar las señales con diferentes frecuencias. Esto puede ser de gran utilidad a la hora de identificar actividad cerebral en diferentes bandas de frecuencia sin requerir un conjunto de funciones ortogonales como en el análisis de Fourier o determinar alguna función madre que permite separa estas frecuencias.

Según la medida de Wasserstein, se mostró como la reconstrucción de la actividad cerebral es más cercana al modelo original en los casos cuando se llevó a cabo una descomposición de las señales cerebrales mediante el método MEMD en comparación con el método MVMD, por lo que el método MEMD es más preciso y genera IMF que permiten una reconstrucción más cercana a la real. Con esto, se concluye que el mejor proceso para llevar a cabo una reconstrucción completa de la actividad cerebral es realzar la descomposición de las señales mediante el método MEMD ya que genera unas IMF con una información más rica para la reconstrucción y llevar a cabo dicha reconstrucción mediante el método MSP.

ACKNOWLEDGMENT *(Heading 5)*

Este trabajo hizo parte del proyecto de investigación 1054 “Solución del problema inverso dinámico con restricciones en frecuencia para la reconstrucción selectiva de la actividad cerebral usando señales simuladas de electroencefalografía” financiado por la Universidad del Quindío.

REFERENCIAS

[1] N. Rehman and D. P. Mandic, "Multivariate empirical mode decomposition," *Proc. R. Soc. A*, vol. 466, no. 2117, pp. 1291–1302, May 2010, doi: 10.1098/rspa.2009.0502

[2] D. P. Mandic, N. u. Rehman, Z. Wu and N. E. Huang, "Empirical Mode Decomposition-Based Time-Frequency Analysis of Multivariate Signals: The Power of Adaptive Data Analysis," in IEEE Signal Processing Magazine, vol. 30, no. 6, pp. 74-86, Nov. 2013, doi: 10.1109/MSP.2013.2267931.

[3] K. Al-Subari, «A Study of Biomedical Time Series Using Empirical Mode Decomposition : Extracting event-related modes from EEG signals recorded during visual processing of contour stimuli,» *University of Regensburg Publication Server,* vol. 1, nº 10, pp. 1-151, 2017

[4] P. A. Muñoz-Gutiérrez, M. Bueno-López, E. Giraldo, and M. Molinas, "Localization of Active Brain Sources From EEG Signals Using Empirical Mode Decomposition: A Comparative Study," *Frontiers in Integrative Neuroscience*, vol. 12, p. 55, Oct. 2018, doi: 10.3389/fnint.2018.00055

[5] Al-Subari K, Al-Baddai S, Tomé AM, Volberg G, Ludwig B, Lang EW. Combined EMD-sLORETA Analysis of EEG Data Collected during a Contour Integration Task. *PLoS One*. 2016;11(12):e0167957. Published 2016 Dec 9. doi:10.1371/journal.pone.0167957

[6] V. E. Montes-Restrepo, "Localización de fuentes electroencefalográficas empleando modelos inversos distribuidos basados en norma mínima", Tesis doctoral, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2009.

[7] S. Baillet, J. C. Mosher, and R. M. Leahy, "Electromagnetic brain mapping," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 18, no. 6, pp. 14-30, Nov. 2001.

[8] A. Ullal y R. B. Pachori., «Deep Learning, Machine Learning and IoT in Biomedical and Health Informatics.,» *CRC Press,* vol. I, nº 17, pp. 88-113, 2021

[9] Jatoi, M. A., Kamel, N., Malik, A. S., Faye, I., & Begum, T. (2014). A survey of methods used for source localization using EEG signals. *Biomedical Signal Processing and Control*, 11, 42-52.

[10] Mingai Li, Yuanyuan Zhang, An improved MAMA-EMD for the automatic removal of EOG artifacts, Biocybernetics and Biomedical Engineering, Volume 41, Issue 3, 2021, Pages 1182-1196, ISSN 0208-5216, https://doi.org/10.1016/j.bbe.2021.08.003.

[11] K. Dragomiretskiy and D. Zosso, "Variational Mode Decomposition," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 62, no. 3, pp. 531-544, Feb. 1, 2014, doi: 10.1109/TSP.2013.22886775

[12] N. u. Rehman and H. Aftab, "Multivariate Variational Mode Decomposition," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 67, no. 23, pp. 6039-6052, 1 Dec.1, 2019, doi: 10.1109/TSP.2019.2951223.

[13] Kaur, Chaman & Singh, Preeti & Bisht, Amandeep & Joshi, Garima & Agrawal, Sunil. (2022). Recent Developments in Spatio-Temporal EEG Source Reconstruction Techniques. Wireless Personal Communications. 122. 10.1007/s11277-021-08960-9.

[14] Lamus, C., Hämäläinen, M. S., Temereanca, S., Brown, E. N., & Purdon, P. L. (2012, Nov.). A spatiotemporal dynamic distributed solution to the MEG inverse problem. *NeuroImage*, vol. 63, no. 2, pp. 894–909. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.11.020

[15] Giraldo-Suárez, E, Padilla-Buriticá, J, Castellanos-Domínguez, C Dynamic inverse problem solution using a kalman filter smoother for neuronal activity estimation. [Internet]. Institución Universitaria ITM; 2011 [citado: 2026, mayo]

[16] Giraldo-Suarez E, Martinez-Vargas JD, Castellanos-Dominguez G. Reconstruction of Neural Activity from EEG Data Using Dynamic Spatiotemporal Constraints. Int J Neural Syst. 2016 Nov;26(7):1650026. doi: 10.1142/S012906571650026X. Epub 2016 Mar 29. PMID: 27354190.

[17] Padilla-Buritica, J.I., Giraldo-Suárez, E., Castellanos-Dominguez, G. (2015). Weighted Filtering for Neural Activity Reconstruction Under Time Varying Constraints. In: Ferrández Vicente, J., et al. *Artificial Computation in Biology and Medicine*. IWINAC 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9107. Springer, Cham.

[18] A. Blanco-Justicia y J. Domingo-Ferrer., «Calculo privado de la distancia de Wasserstein (Earth Mover).,» *RECSI,* vol. XVI, nº 20, 2021.

[19] Strobbe G, van Mierlo P, De Vos M, Mijović B, Hallez H, Van Huffel S, López JD, Vandenberghe S. Multiple sparse volumetric priors for distributed EEG source reconstruction. Neuroimage. 2014 Oct 15;100:715-24. doi: 10.1016/j.neuroimage.2014.06.076. Epub 2014 Jul 8. PMID: 25014435.

[20] Fernandez-Corazza M, Feng R, Ma C, Hu J, Pan L, Luu P, Tucker D. Source localization of epileptic spikes using Multiple Sparse Priors. Clin Neurophysiol. 2021 Feb;132(2):586-597. doi: 10.1016/j.clinph.2020.10.030. Epub 2020 Dec 3. PMID: 33477100; PMCID: PMC7971150.

[21] Henson RN, Wakeman DG, Litvak V, Friston KJ. A Parametric Empirical Bayesian Framework for the EEG/MEG Inverse Problem: Generative Models for Multi-Subject and Multi-Modal Integration. Front Hum Neurosci. 2011 Aug 24;5:76. doi: 10.3389/fnhum.2011.00076. PMID: 21904527; PMCID: PMC3160752.

Evolución de las Tecnologías de Detección de Malware y su Impacto en la Seguridad de la Información: Un Análisis Histórico y Bibliográfico

Mejía Pineda Maria Camila
Tecnológico de Antioquia
Medellín Antioquia Colombia

maria.mejia51@correo.tdea.edu.co

Cano Velázquez Tulio Enrique;
Tecnológico de Antioquia
Medellín Antioquia Colombia
tulio.cano@tdea.edu.co

Ramirez Echavarría José Leonardo
Tecnológico de Antioquia
Medellín Antioquia Colombia

jose.ramirez3@tdea.edu.co

Cifuentes Wchima Ximena
Universidad La Gran Colombia
Armenia Quindío Colombia
defingenieria@ugca.edu.co

Resumen

El proyecto presenta un análisis histórico y bibliográfico sobre la evolución de las tecnologías de detección de Malware y su impacto en la seguridad de la información. En el contexto actual de creciente digitalización, la información se ha convertido en un activo crítico, lo que ha incrementado la exposición a amenazas cibernéticas cada vez más sofisticadas. En este escenario, el estudio examina cómo han evolucionado los métodos de detección, desde enfoques tradicionales hasta soluciones avanzadas basadas en inteligencia artificial.

Inicialmente, la detección de Malware se fundamentaba en técnicas estáticas, como el uso de firmas o huellas digitales. Aunque estas fueron efectivas en sus inicios, su capacidad de respuesta ante amenazas nuevas o modificadas es limitada. Posteriormente, surgieron los métodos dinámicos, que analizan el comportamiento del código en ejecución, permitiendo identificar amenazas más complejas. Sin embargo, estos también presentan desafíos, como el alto consumo de recursos y la posibilidad de evasión por parte de Malware avanzado.

Ante estas limitaciones, se han desarrollado enfoques más sofisticados, como la incorporación de técnicas heurísticas y modelos probabilísticos, que permiten detectar patrones anómalos sin depender exclusivamente de firmas conocidas. Asimismo, el uso de inteligencia artificial y aprendizaje automático ha marcado un avance significativo, al facilitar el análisis de grandes volúmenes de datos y mejorar la capacidad de detección predictiva.

En este sentido, tecnologías modernas como EDR (Endpoint Detection and Response) y XDR (Extended Detection and Response) representan un salto cualitativo en la ciberseguridad. Estas plataformas integran múltiples fuentes de información y permiten una respuesta automatizada en diferentes niveles (endpoint, red y nube), reduciendo considerablemente los tiempos de detección y mitigación de amenazas.

El objetivo principal del estudio es analizar la evolución de estas técnicas y su impacto en la efectividad de la seguridad informática. Para ello, se identifican hitos relevantes, se evalúan avances tecnológicos y se examina el papel de la inteligencia artificial en la detección y respuesta frente a amenazas cibernéticas.

Como conclusión, la investigación evidencia una transición desde métodos reactivos hacia sistemas inteligentes, automatizados y proactivos. La adopción de tecnologías como EDR y XDR, junto con el uso de modelos basados en datos, permite anticipar ataques y adaptarse a entornos digitales dinámicos. En consecuencia, la ciberseguridad moderna requiere enfoques integrales que combinen innovación tecnológica, análisis predictivo y capacidad de respuesta en tiempo real para enfrentar eficazmente los desafíos actuales.

Palabras clave

Ciberseguridad - Detección de Malware - Inteligencia artificial

1. Introducción

En la era digital actual, la información se ha consolidado como un activo de alto valor para individuos y un pilar fundamental para las organizaciones. La creciente dependencia de las infraestructuras de red y plataformas de computación en la nube para el almacenamiento y gestión de datos ha transformado la manera en que operan las empresas.

En efecto se han abierto nuevas brechas de seguridad, problemas a los que debido a esta digitalización masiva se han expuesto a las organizaciones y/o individuos a un panorama de amenazas cibernéticas cada vez más sofisticadas. La lucha por proteger los sistemas y datos, ha impulsado a una constante carrera entre los desarrolladores de Malware y las tecnologías de ciberseguridad.

2. Antecedentes del estudio

Las investigaciones revisadas evidencian la evolución de los métodos de detección de Malware desde enfoques tradicionales hasta soluciones avanzadas de monitoreo integral. En primer lugar, (Álvarez, 2018) analiza la historia y clasificación del Malware, así como el uso de emuladores de CPU para su detección, concluyendo que las técnicas de análisis estático y dinámico han perdido efectividad frente a amenazas cada vez más complejas, especialmente en dispositivos móviles e IoT.

Por otra parte, (Moreno, 2023) estudia las técnicas de evasión empleadas contra antivirus y sistemas EDR, demostrando que la detección basada en firmas resulta insuficiente frente a ataques de día cero. El autor destaca que las soluciones EDR representan una evolución significativa, al incorporar monitoreo continuo y análisis del comportamiento de los dispositivos para mejorar la capacidad de detección y respuesta.

Finalmente, (Loachamín, 2023) aborda las soluciones XDR como una de las tecnologías más avanzadas de ciberseguridad, capaces de integrar la detección y respuesta en múltiples capas de la infraestructura tecnológica. El estudio resalta las ventajas del modelo SaaS, incluyendo escalabilidad, almacenamiento en la nube y mantenimiento simplificado, además de su capacidad para correlacionar amenazas en endpoints, redes, nube y correo electrónico.

En conjunto, estos antecedentes muestran que la creciente sofisticación del Malware ha impulsado la transición desde mecanismos tradicionales de análisis hacia plataformas de seguridad más integrales, automatizadas y orientadas al monitoreo holístico.

3. Justificación

Con el paso del tiempo, las tecnologías de detección de Malware han ido evolucionando de forma continua y bidireccional gracias a la naturaleza cambiante de las amenazas; este ciclo de acción y reacción se ha evidenciado desde los inicios de la seguridad informática, aunque el desarrollo de las tecnologías de ciberseguridad ha sido objeto de estudio, la bibliografía existente ha abordado estos avances en gran medida desde la perspectiva de las tecnologías individuales, así mismo se ha identificado una oportunidad para realizar una síntesis exhaustiva que no solo identifique las innovaciones más importantes, sino que también analice de forma crítica la transición de los enfoques tradicionales de análisis estático y dinámico hacia las soluciones avanzadas como EDR y XDR. En este sentido, el trabajo brinda un marco conceptual a ingenieros y analistas de ciberseguridad o relacionados en el área de la computación, al documentar que la falta de visibilidad en silos y las limitaciones de los métodos tradicionales han generado una deficiencia sistémica.

La investigación establece la necesidad técnica de evaluar la adopción de XDR para proteger la cadena de valor digitalizada de la Industria 4.0 (CEPAL, 2024) presentando las razones técnicas detrás de esta recomendación. En el ámbito empresarial y financiero es importante recalcar el uso de estas tecnologías de ciberseguridad y evidenciar el riesgo de la no contención de estas amenazas cibernéticas. (Delgado, 2017) destaca que “el 94 % de las empresas que pierden su información terminan por desaparecer”, esta cifra resalta la importante conexión entre la pérdida de activos digitales y el riesgo que enfrenta una organización. Por eso, este trabajo ofrece información clave que respalda la necesidad de invertir en sistemas de detección avanzados como EDR y XDR. Estos sistemas, que utilizan inteligencia artificial, permiten una evaluación continua de la gestión del riesgo y aseguran la protección de los datos frente a las amenazas cibernéticas más disruptivas. Esta noción se respalda con datos actuales que señalan que el uso extensivo de IA y automatización en la seguridad puede reducir el costo promedio de una brecha de datos en hasta USD 2.2 millones (IBM, 2024). De esta manera, el estudio no solo identifica las innovaciones, sino que analiza y determina los enfoques más importantes y sus razones, proveyendo a la academia y al sector empresarial información clave para fundamentar sus decisiones respecto a la adopción de tecnologías de ciberseguridad de detección predictiva.

4. Objetivos

4.1 General

Contrastar la evolución de las técnicas de detección de amenazas, analizando la transición de los métodos tradicionales hacia las plataformas avanzadas (EDR y XDR). Con el fin de determinar el mayor nivel de eficacia y sus repercusiones en la gestión del riesgo y la protección de los activos organizacionales.

4.2 Específicos

- Identificar los hitos y las innovaciones fundamentales en las tecnologías de detección de Malware, siguiendo su progreso desde los métodos de análisis estático y dinámico hasta las soluciones integrales contemporáneas.
- Examinar el efecto de cada progreso tecnológico en la eficacia de la ciberseguridad, valorando cómo cada nueva generación de instrumentos reaccionó ante las amenazas que surgieron.
- Analizar los desafíos y las tendencias futuras en la detección de amenazas, identificando el rol de la Inteligencia Artificial (IA) en la mitigación de riesgos y su influencia en la toma de decisiones estratégicas de las organizaciones.

5. Metodología

La revisión inició con un examen sistemático de la literatura, concentrándose principalmente en las bases de datos científicas de alto impacto. La base de datos Scopus fue utilizada como base de datos principal, respaldada por otras bases de datos como IEEE Xplore y Google Scholar para garantizar la relevancia y validez de los artículos seleccionados.

Se utilizaron los factores de revisión por pares globales para mejorar la recuperación de información en esta revisión. La consulta se realizó utilizando los términos «Evolución del descubrimiento de Malware», «análisis estático y dinámico», «impacto de la seguridad de la tecnología de la información EDR» y «XDR en el ámbito global», y restringiendo los

resultados al rango de fecha [2012 - 2025] como base para incrementar la generación del nuevo conocimiento.

6. Estado del Arte

El objetivo de este capítulo es proporcionar el contexto y la base de desarrollo para los objetivos de la investigación mediante una revisión sistemática de la literatura: evaluar el desarrollo evolutivo y el impacto comparativo de las tecnologías de detección de Malware. La necesidad de esta revisión se deriva por la dinámica bidireccional de los creadores de Malware y los sistemas de defensa cibernética.

En este contexto, el objetivo principal es evaluar diferentes métodos de detección de ataques de Malware, analizando su estructura, funcionalidad y procedimientos operativos. Este análisis respalda la transición fundamental que hemos identificado: un cambio de los métodos de detección tradicionales (basados en el análisis estático por firmas y el análisis dinámico heurístico) a soluciones avanzadas de monitoreo holístico (EDR/XDR). El impacto comparativo de estos enfoques en la mitigación y prevención de amenazas es el foco central de esta investigación.

6.1 Hitos de la detección tradicional del Malware

Con la base de los fundamentos conceptuales descritos, este apartado se centra en analizar la base histórica, el time-line de las dinámicas bidireccionales de acción y reacción de las tecnologías de detección de Malware. El origen de esta trayectoria se transporta hasta el surgimiento del primer código malicioso, lo cual marco el inicio de esta carrera armamentista en la era digital. Todo comienza en 1971, con el primer virus de la historia llamado Creeper dejó huella porque infectó los computadores PDP-11, los cuales estaban conectados a una de las redes precursoras del internet: Arpanet. El virus mostraba un mensaje que infectaba el sistema y decía “Soy el más aterrador (creeper); atrápame si puedes”. (Delgado, 2017) como respuesta directa, nació la primera herramienta de software diseñada para contrarrestar y eliminar un virus, llamada Reaper desarrollada por Ray Tomlinson, su única misión era moverse de manera controlada para encontrar instancias de Creeper, detener su ejecución y eliminarlo del sistema. Esta interacción fundacional marcó el nacimiento de la defensa informática.

6.2 Técnica de evasión

6.2.1 Análisis Estático (Detección por Firmas)

La detección por análisis estático fue la primera técnica usada por los primeros antivirus para evitar la evasión de Malware. El análisis estático revisa el código de un archivo sin ejecutarlo, cuando este se encuentra en reposo. (Moreno, 2023). El antivirus usa una base de datos de firmas o huellas digitales, que son secuencias de código únicas de cada virus, el antivirus compara su código con las firmas antes registradas de su base de datos y verifica su autenticidad, es muy eficiente para detectar Malware ya conocidos, pero se vuelve completamente inútil en Malwares más modernos que modifican su código o firma constantemente para no ser detectados (lo que se conoce como Malware Zero-Days), este método es totalmente reactivo y no funciona contra el Malware polimórfico o los ataques de día cero. Por eso fue necesario evolucionar (Delgado, 2017).

6.2.2 Análisis dinámico (detección conductual)

El Análisis Dinámico surgió como una respuesta evolutiva directa a el método de detección por firmas, principalmente surgió por el nacimiento del Malware polimórfico capaz de realizar mutaciones a sí mismo. Dicho método se traslada de la inspección del código a la observación del comportamiento. El proceso fundamental del análisis dinámico consiste en ejecutar el archivo en un entorno virtual aislado (como una sandbox o un emulador de CPU) para observar sus acciones en tiempo real (González, 2025).

6.2.3 Mecanismo Heurístico

Este método se centra en el análisis heurístico, que busca identificar comportamientos o patrones de código sospechosos en lugar de depender de firmas predefinidas, es decir se basa en anticiparse al descubrimiento del Malware, capaz de bloquearlo sin necesidad de tener en su base de datos registros del programa malicioso. “Esta técnica analiza todo lo que ejecuta un programa y con base a las acciones que realiza, determina si se trata de un comportamiento no deseado o si, en caso de que detecte un Malware, el antivirus prohibirá la ejecución de este.” (Alvarez, 2018)

Esta metodología es más efectiva que la detección basada en firmas y permite identificar Malware de Día Cero (Zero-Day), debido a que no necesita un conocimiento previo de la amenaza. Sin embargo, esta técnica también cuenta con algunos limitantes. (Moreno, 2023) indica que “algunos tipos de Malware pueden detectar si se están ejecutando en un entorno virtual y pueden modificar su comportamiento para evadir la detección”. Esta vulnerabilidad a la evasión, junto con la posibilidad de generar falsos positivos, ha llevado al desarrollo de modelos probabilísticos más avanzados para mejorar la fiabilidad de las alertas.

6.3 Plataformas de detección y respuesta avanzada: Edr Y Xdr

La falta de efectividad del análisis dinámico para enfrentar las técnicas de evasión, junto con la dificultad de correlacionar eventos en distintos sistemas, ha llevado a que la seguridad informática evolucione hacia plataformas que ofrecen monitoreo continuo y respuestas automatizadas.

6.3.1 Detección y Respuesta En Puntos Finales (EDR)

Se establece como una evolución directa y necesaria de los sistemas antivirus tradicionales. Se enfoca en un método más avanzado y proactivo que los sistemas convencionales, utilizando técnicas de detección basadas en comportamientos

y análisis de datos en tiempo real (Moreno, 2023). La adopción de EDR fue impulsada por la necesidad de identificar amenazas avanzadas y desconocidas, incluyendo Malware, ransomware y ataques de Día Cero (Zero-Days), que el análisis por firmas y la heurística simple ya no podían contener.

El mecanismo de detección del EDR consiste en la recolección de telemetría de todos los puntos finales de la red. Se utiliza algoritmos avanzados de Inteligencia Artificial (IA) y aprendizaje automático (Machine Learning) para detectar patrones de ataque sutiles, superando el enfoque tradicional de la simple identificación de archivos por su hash. Además de la detección, las plataformas EDR proporcionan capacidad de respuesta que permite mitigar la amenaza mediante acciones automatizadas, como la cuarentena del dispositivo infectado o la eliminación del Malware (Moreno, 2023).

6.3.2 Detección y Respuesta Extendida (XDR)

Es una de las tecnologías más avanzadas de ciberseguridad en la actualidad, “el XDR permite la detección y respuesta a incidentes de seguridad informática en múltiples capas de la infraestructura de TI” (Loachamín, 2023). Es una plataforma que unifica y relaciona datos de seguridad de múltiples áreas (endpoint, red, correo, nube y aplicaciones) para tener una visión completa del ataque.

La plataforma XDR se distingue por emplear el aprendizaje automático (Machine Learning) para mejorar la identificación avanzada de amenazas. Su principal mecanismo se basa en correlacionar datos que provienen de diferentes fuentes de seguridad para descubrir amenazas que, si no, aparecerían como registros independientes. La tecnología XDR tiene la capacidad holística de análisis, lo que le permite disminuir notablemente el tiempo que toma tomar decisiones frente a un incidente. Asimismo, la plataforma ofrece procedimientos de respuesta automatizada a amenazas, particularmente las que surgen en registros individuales, lo que agiliza la contención de los ataques y mejora la eficiencia operativa. (Chaparro, 2023).

6.4 Integración de la inteligencia artificial: fundamento probabilístico y Deep Learning

La afirmación de que los sistemas EDR y XDR se han establecido como la solución de ciberseguridad moderna, se basa en la integración de la Inteligencia Artificial, la cual proporciona la adaptabilidad y precisión necesarias para el panorama de amenazas.

El fundamento de esta IA reside en las Redes Neuronales Artificiales (RNA), un conjunto de modelos computacionales que son especialmente efectivos en la ciberseguridad, donde las relaciones entre variables son complejas, facilitando el procesamiento de grandes volúmenes de datos con un alto nivel de abstracción (Domínguez Mellado, 2025).

El enfoque de la IA en EDR/XDR opera sobre dos pilares funcionales que abordan directamente las limitaciones de los sistemas heurísticos: la gestión de la incertidumbre y la detección profunda de patrones.

6.5 Gestión de la incertidumbre (Modelos Probabilísticos)

La superación de las restricciones del análisis dinámico y la elusión de los entornos controlados en sistemas EDR como se mencionó anteriormente, ha requerido la adopción de modelos probabilísticos avanzados que gestionen la incertidumbre que existe inherentemente en la detección de conductas y comportamientos del Malware. Actualmente las Redes Bayesianas (RB) se han establecido como la base matemática de estas soluciones avanzadas. Las RB permiten modelar la causalidad en la cadena de ataque, utilizando el Teorema de Bayes para calcular la probabilidad de que un evento anormal se convierta en amenaza. Un ejemplo de esto lo podemos evidenciar en la investigación sobre la Mezcla Gaussiana Bayesiana demuestra cómo estos modelos se utilizan para establecer un perfil de comportamiento normal del sistema; cualquier desviación se evalúa probabilísticamente, lo que permite al XDR transformar una alerta de baja fiabilidad en una alerta de alta confianza (CSIRT Académico UNAD, 2025).

6.6 Aplicación del aprendizaje profundo (Deep Learning) en detección avanzada

El Aprendizaje Profundo es la rama que utiliza redes con múltiples capas para potenciar estas capacidades. La aplicación de estos modelos en EDR/XDR proporciona tres beneficios operacionales cruciales:

1. Detección de amenazas desconocidas y abstracción de características

La IA permite a los sistemas superar la ofuscación del código para detectar variantes de Malware que no tienen firma conocida. (Letón Molina, 2023). Los modelos más utilizados en esta función son:

- Redes Neuronales Convolucionales (CNN)

Se aplican en la técnica del análisis por imagen, que consiste en tratar los ficheros binarios como imágenes para extraer patrones complejos. Esto permite a las CNN detectar Malware con base en su topología interna, más allá de su comportamiento o firma.

- Autoencoders (AE)

Los auto codificadores se utilizan en el aprendizaje no supervisado para la normalización de Malware y la extracción de características más relevantes. Al codificar y luego intentar reconstruir los datos originales, el AE puede identificar anomalías en la estructura del código (Letón Molina, 2023), son muy útiles porque permiten detectar patrones anómalos sin necesidad de etiquetas previas esencial para el filtrado de Malware con código polimórfico y prevención de ataques Zero-Day.

2 Modelado de la causalidad y seguimiento secuencial

Para rastrear ataques persistentes que se mueven lateralmente, el XDR requiere memoria y capacidad de análisis secuencial:

Rastreo Secuencial (RNN/LSTM)

Las Redes Neuronales Recurrentes (RNN), en particular la variante LSTM (Long Short Term Memory), se enfocan en el manejo de datos secuenciales, como las series temporales de actividad en el endpoint. Su arquitectura con retroalimentación les proporciona una "memoria" que les recuerdasu contexto anterior, fundamental para analizar y modelar secuencias de comandos maliciosos que ocurren a lo largo del tiempo, trazando la ruta completa de un atacante en la red (Domínguez Mellado, 2025; Letón Molina, 2023).

3 Gestión de la incertidumbre y fiabilidad de la alerta

La integración de las Redes Bayesianas (RB) con Aprendizaje automático en sistemas XDR/EDR es un acto que se vuelve indispensable: las RB, al modelar la causalidad de los eventos y utilizar el Teorema de Bayes, permiten a los sistemas establecer un perfil de comportamiento normal del entorno. Cualquier desviación se evalúa probabilísticamente. Esta aplicación, demostrada en investigaciones como la de Mezcla Gaussiana Bayesiana para detección de intrusiones, permite al XDR transformar una alerta ambigua en una alerta de alta confianza (CSIRT Académico UNAD, 2025), obteniendo como resultado probabilidades de que un evento sea malicioso aun sin evidencia total.

7. Análisis y Discusiones.

7.1 El cambio de paradigma: de la reacción a la inteligencia artificial

En esta investigación a través de una revisión sistemática de la literatura se ha logrado determinar los hitos fundamentales y las innovaciones en la detección de Malware, demostrando que la evolución tecnológica no es lineal, sino una dinámica bidireccional de acción y reacción entre los atacantes y los analistas de ciberseguridad (Delgado, 2017). El análisis bibliográfico permite validar la hipótesis de la presente investigación: la ciberseguridad se ha movido obligatoriamente de los métodos de detección reactiva basados en métodos holísticos (análisis estático por firmas) hacia soluciones de monitoreo proactivo e inteligente (EDR/XDR)

Este progreso tecnológico se examinó a través de tres fases evolutivas, donde cada nueva generación de sistemas reaccionó directamente a las amenazas surgidas (Moreno, 2023). La fase inicial de detección por firmas resultó ser eficaz en la contención de amenazas conocidas, pero se volvió obsoleta ante la aparición del Malware polimórfico y de Día Cero. La segunda fase, marcada por el análisis dinámico y heurístico, aunque más proactiva, quedó limitada por la evasión del sandbox y la consecuente generación de incertidumbre y falsos positivos (González, 2025).

De esta manera el surgimiento de las plataformas EDR y XDR representa la respuesta definitiva a la incapacidad de los sistemas tradicionales holísticos en la detección de la totalidad de un ataque que se mueve lateralmente sobre la red. La integración de la Inteligencia Artificial y el Deep Learning ha sido clave mediante la recolección y previsión de comportamientos, obteniendo como resultado mayor mitigación de amenazas y alta fiabilidad de las alertas.

7.2 La brecha de visibilidad: EDR vs. XDR

La digitalización exige la transformación de los modelos de negocio a través de la integración de sistemas inteligentes y cadenas virtuales de valor (CEPAL, 2024). Esta reconfiguración implica que los activos de fabricación, distribución y desarrollo de productos están integrados mediante flujos de datos continuos. En este marco, la restricción de visibilidad de los sistemas de seguridad pasó a ser un déficit inaceptable. El EDR logró enfrentar el reto del Malware en el endpoint, aunque su alcance fue limitado porque solo actúa en un dispositivo (punto final) teniendo visibilidad y control sobre lo que sucede dentro de ese dispositivo específico (procesos, llamadas al sistema, archivos, memoria) haciendo que su respuesta sea meramente local y vertical. Esta vulnerabilidad se presenta cuando un ataque se desplaza lateralmente desde un punto final hasta la nube, la red o el correo electrónico, lo cual provoca que el EDR lo detecte como eventos dispares y no pueda generar una alerta fiable.

El XDR cierra esta brecha al unificar los datos de seguridad de diferentes áreas. Esta correlación completa es importante en el marco de la Industria 4.0 (CEPAL, 2024). ya que ayuda a seguir el camino del atacante a través de toda la cadena de producción digital. La capacidad de responder rápidamente con XDR no solo es una ventaja técnica, sino también una protección estratégica que guarda el flujo de dinero, la rentabilidad y la buena imagen de la organización, que son activos organizacionales críticos. (Delgado, 2017).

7.3 Impacto operacional de la IA en la eficacia

La seguridad de la información es un activo estratégico cuya pérdida puede representar un riesgo existencial para la organización. La historia ha mostrado claramente lo grave que puede ser esta amenaza, señalando que el 94 % de las empresas que sufren una pérdida catastrófica de información terminan por desaparecer (Delgado, 2017). Aunque esta cifra es antigua, destaca lo importante que es protegerse. Además, en 2024, el costo promedio global de una brecha de datos fue de USD 4.88 millones (IBM, 2024). Por eso, los sistemas de detección modernos deben centrarse en reducir el tiempo de respuesta, ya que esto afecta directamente el costo financiero. La Inteligencia Artificial (IA) no es solo una ventaja teórica, sino una herramienta económica que ayuda a responder más rápido y con mayor eficacia.

El informe Cost of a Data Breach 2024 de IBM mostró que las organizaciones que usaron mucho IA y automatización en seguridad lograron reducir el costo de las brechas en promedio hasta USD 2.2 millones, siendo el factor de ahorro

más significativo del estudio. Esta reducción se basa en dos aspectos clave de la IA que justifican su uso:

7.3.1. Menos falsos positivos

Las redes Bayesianas y otros modelos probabilísticos ayudan a convertir alertas poco fiables en alertas confiables. Esto reduce la fatiga del analista y ayuda a concentrarse solo en incidentes reales.

7.3.2. Detección rápida y profunda

El uso de las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) para el análisis de Malware por imagen y las RNN/LSTM para el rastreo de movimientos laterales aceleran la detección de amenazas Zero-Day. Esto reduce el tiempo que un atacante permanece en la red, lo cual es es la variable principal que eleva los costos en una brecha o filtración de datos (IBM, 2024). Este enfoque basado en la IA concluye la evolución tecnológica, demostrando que la mayor eficacia de EDR y XDR reside en su adaptabilidad, precisión y capacidad predictiva que trascienden los límites de la detección tradicional.

8. Conclusiones.

Se identificaron tres etapas clave en la detección de Malware: la detección por firmas (análisis estático), el análisis de comportamiento (sandboxing y análisis dinámico) y la detección completa con Inteligencia Artificial (IA). Esto muestra una evolución desde la búsqueda reactiva de archivos conocidos hacia la predicción y el monitoreo en tiempo real basado en el contexto.

El estudio mostró que cada nuevo avance tecnológico fue una respuesta a las deficiencias del sistema anterior. En concreto, el EDR se estableció como una solución directa a la falta de capacidad de los antivirus tradicionales para detectar el movimiento lateral y las amenazas fileless. La evolución hacia plataformas más avanzadas indica que ahora entendemos que la defensa debe enfocarse en la actividad completa del atacante, y no solo en el Malware en un único punto.

El papel de la Inteligencia Artificial (IA), especialmente a través del XDR, se ha señalado como la tendencia más importante para el futuro. La IA no solo disminuye considerablemente el número de falsos positivos, sino que su habilidad para correlacionar datos de diferentes silos (red, endpoint, correo y nube) permite una rápida mitigación de riesgos y apoya la toma de decisiones estratégicas. Esto transforma la ciberseguridad de un aspecto puramente técnico a un elemento clave para la continuidad operativa en la alta dirección.

La efectividad de diferentes técnicas de detección mostró que las plataformas avanzadas (XDR) basadas en inteligencia artificial eran las más efectivas. La característica destacada de esta tecnología es su capacidad de correlación holística, que rompe la "visibilidad en silos" que hacía que los enfoques tradicionales fueran ineficientes. La consecuencia más significativa de esta superioridad técnica dentro de las organizaciones es la reducción cuantificable de los riesgos financieros y la eficaz protección de los activos. Esto transforma la ciberseguridad de ser un centro de costos a un nivel de gestión de riesgos existenciales.

Bibliografía

Alvarez, R. H. (2018). Seguridad en redes y aplicaciones distribuidas. Programas maliciosos, antivirus y uso de emuladores de CPU en técnicas de analisis de Malware. Universidad Oberta de Catalunya.

CEPAL. (2024). Un camino digital para el desarrollo sostenible de América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

Chaparro, A. R. (2023). Capacidades técnicas, legales y de gestión para equipos blueteam y red team. Bucaramanga.

Delgado, C. A. (2017). Fundamentos de seguridad informática. Fundación Universitaria del Área Andina. Bogota: Fondo editorial Areandino.

Fuentes, J. E. (2021). Análisis de herramientas EDR de software libre. Universidad nacional abierta y a distancia, Bogota.

González, H. T. (2025). Análisis de técnicas de evasión de antivirus y soluciones. Universitat Pompeu Fabra.

IBM. (2024). Cost of a data breach report.

Loachamín, P. F. (2023). Análisis comparativo de plataformas de SIEM y las soluciones de detección y respuesta extendida. Proyecto titulacion Magister, Universidad israel, Quito.

Microsoft. (2025, 10 15). ¿Qué es XDR? (Detección y respuesta extendidas) | Seguridad de Microsoft. From https://www.microsoft.com/es-mx/security/business/security-101/what-is-xdr

Moreno, A. J. (2023, Julio). Técnicas de Evasión de Antivirus y EDR. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Salazar, G. W., Jumbo, J. C., & PhD. (2021). Análisis comparativo de diversas metodologías de detección de Malware y nivel de eficiencia en su detección. Universidad internacional SEK , Quito.

Oncological Reportability Classification in Spanish: A Comparative Analysis of NLP Algorithms on Pathology Reports

[1st] Santiago García Herrera
Departamento de Sistemas e Informática
Universidad de Caldas
Manizales, Caldas
santiago.garcia72514@ucaldas.edu.co

[2nd] Santiago Murillo Rendón
Departamento de Sistemas e Informática
Universidad de Caldas
Manizales, Caldas
santiago.murillo@ucaldas.edu. co

[3rd] Mario Alejandro Bravo Ortiz
Departamento de Sistemas e Informática
Universidad de Caldas
Manizales, Caldas
mario.bravo@ucaldas.edu.co

[4th] Nelson Arias-Ortiz
Departamento de Salud Pública
Universidad de Caldas
Manizales, Caldas
nelson.arias@ucaldas.edu.co

[5th] Alexandra Giraldo-Osorio
Departamento de Salud Pública
Universidad de Caldas
Manizales, Caldas
alexandra.giraldo@ucaldas.edu.co

[6th] Juan Pájaro
Depto. de Epidemiología y Bioestadística
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C., Colombia
juanpajaro@javeriana.edu.co

[7th] Esther De Vries
Depto. de Epidemiología y Bioestadística
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C., Colombia
estherdevries@javeriana.edu.c o

[8th] María Fernanda Del Corral
Departamento de Ciencia de Datos
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C., Colombia
delcorralmariaf@javeriana.edu.co

***Abstract*—Population-based cancer registries (PCRs) are essential–for oncological epidemiological surveillance; however, their operation faces a structural bottleneck derived from the manual processing of pathology reports generated as unstructured free text. In the Population-Based Cancer Registry of Manizales (RPCa-M), processing one year of data from a single laboratory can take approximately six months, compromising the timeliness of epidemiological analysis and public health decision-making. This study presents a comparative analysis of three Natural Language Processing (NLP) approaches for the automatic classification of oncological reportability from Spanish-language pathology reports: a rule-based system, a fine-tuned biomedical transformer model (RoBERTa Biomedical Clinical ES), and a large-scale generative model (MedGemma 4B) in a few-shot inference setting. All approaches were evaluated on a labeled corpus of 31,296 pathology reports using accuracy, precision, recall, and F1-score. RoBERTa achieved the highest performance (accuracy 97.76%, F1 included class 92.00%, 20 false negatives), with statistically significant superiority over both the rule-based system and MedGemma 4B confirmed by McNemar's test with Bonferroni correction ($p < 0.001$). These findings support the feasibility of NLP-assisted automation in population-based cancer registry operations in Spanish-speaking contexts.**

Keywords—Natural language processing, oncological reportability, pathology reports

I. Introduction

Cancer represents one of the most pressing public health challenges of the 21st century. According to the Global Burden of Disease Study 2021, there were 23.57 million new cancer cases and 9.83 million deaths worldwide in 2021, with a global age-standardized incidence rate of 275.2 per 100,000 population, representing a 2.3-fold increase in incidence since 1990. Projections estimate that by 2050 cancer incidence will exceed 26 million cases globally, with prevalence surpassing 100 million people living with the disease [1]. This burden falls disproportionately on low- and middle-income countries, where health systems simultaneously face residual infectious disease loads and the expanding weight of chronic non-communicable conditions. In Colombia specifically, approximately 54,090 new cancer cases were recorded annually in women and 47,393 in men during the 2017–2021 period, with breast and prostate cancers as the leading incidence sites [2].

Population-based cancer registries (PCRs) constitute the essential infrastructure for oncological epidemiological surveillance. They systematically collect, store, analyze, and interpret data on newly diagnosed cancer cases within geographically defined populations, providing the evidence base for incidence monitoring, survival estimation, health policy planning, and evaluation of cancer control strategies [3, 4]. Their utility depends critically on the quality, completeness, and timeliness of the data they produce.

However, PCR operations face a structural bottleneck inherent to the nature of their primary information sources: the majority of clinically relevant information for tumor characterization is contained in pathology reports generated as unstructured free text, whose processing requires expert interpretation and consumes a significant proportion of available human resources. At the Population-Based Cancer Registry of Manizales (RPCa-M), processing one year of data from a single pathology laboratory can take approximately six months, a delay

that directly compromises the capacity of the surveillance system to produce timely epidemiological estimates. This is not a challenge exclusive to regional registries: even internationally recognized reference programs such as the NCI's Surveillance, Epidemiology, and End Results (SEER) program report a standard data submission lag of 22 months after the diagnostic year closes [5].

Natural Language Processing (NLP) has emerged as the most promising technological response to this challenge. NLP combines linguistic, statistical, and computational techniques to analyze and represent human language in machine-processable formats, with growing applications in health spanning clinical record screening, automated data extraction, and decision-support systems [6]. Its evolution from rule-based approaches toward deep learning architectures and large pretrained language models has fundamentally transformed the capacity of systems to understand complex clinical text, reaching performance levels that were unimaginable a decade ago [7].

Despite this progress, the majority of NLP developments for oncological pathology processing have concentrated on English-language corpora, leaving a significant methodological gap in the Spanish-speaking context. In Colombia, Mendoza-Urbano et al. reported a mean fuzzy matching score of 68.3% for oncological topography extraction using regular expressions over Spanish-language reports [8], while Portilla et al. achieved an F1-score of 88% for reportability classification through machine learning, still exhibiting a false negative rate of 17% [9]. These antecedents reflect both the recent methodological progress and the persistent technical gap with respect to the precision demands of a population-based cancer registry.

This paper presents a systematic comparative analysis of NLP approaches for automatic oncological reportability classification from Spanish-language pathology reports, evaluating methods ranging from rule-based systems to pretrained transformer models including RoBERTa, and few-shot generative inference. All models were evaluated on a fully labeled corpus of 31,296 reports from a regional laboratory corresponding to the year 2018, benchmarked against human coder performance. The results provide empirical evidence on the feasibility of automating oncological reportability determination in Spanish and offer a replicable methodological framework for population-based cancer registries in Spanish-speaking settings.

II. Related Work

A. Rule-Based and Classical Machine Learning Approaches

The automation of oncological pathology report processing through NLP has followed a progressive trajectory from deterministic systems toward deep learning architectures and pretrained language models. Hammami et al. developed a rule-based linguistic classifier for the automated assignment of ICD-O-3 morphology codes from Italian-language pathology reports, integrating tokenization, stemming, Levenshtein-distance spelling correction, and ad hoc negation detection. Evaluated over 27,239 reports from the Istituto Nazionale dei Tumori in Milan, the system achieved a micro-F1 of 98.14%, with failures concentrated in rare morphologies and syntactically complex negations [10]. This work demonstrated that rule-based approaches built on locally adapted ontologies can achieve outstanding performance in restricted domains, though their sensitivity to linguistic variation limits scalability.

In the Colombian context, Mendoza-Urbano et al. developed a regular expression and fuzzy matching algorithm to extract oncological descriptors from 22,322 Spanish-language pathology reports at the hospital registry of the Fundación Valle del Lili in Cali, achieving a mean fuzzy matching score of 68.3 for topography and 89.5 for morphology [8]. Subsequently, Portilla et al. applied a machine learning approach over 10,299 reports from the Population-Based Cancer Registry of Cali, implementing a two-stage pipeline combining UMLS oncological concept annotation, negation detection, and classifiers including decision trees, SVM, and multilayer perceptron. The best model achieved an F1-score of 88% for reportability classification, with a residual false negative rate of 17% that the authors themselves identified as a critical operational limitation [9]. These two Colombian antecedents illustrate both the methodological progress achieved in the Spanish-speaking context and the persistent technical gap with respect to the precision demands of a population-based cancer registry.

B. Deep Learning Architectures

Alawad et al. introduced MTCNN, a multitask convolutional neural network for the simultaneous extraction of five reportable oncological variables from free-text pathology reports within the NCI SEER program. Trained on 95,231 reports from the Louisiana Tumor Registry, the hard parameter sharing model correctly classified 59.04% of reports across all five tasks simultaneously, outperforming single-task CNN, SVM, and Random Forest baselines, demonstrating that multitask learning enables scalable NLP systems for cancer registries with computational efficiency equivalent to a single network [11]. Gao et al. proposed HiSAN, a two-level hierarchical self-attention architecture at word and line levels, designed specifically for multi-page pathology documents with long-range linguistic dependencies. Evaluated on 374,899 SEER reports, HiSAN outperformed all comparators across five simultaneous classification tasks, achieving 90.37% accuracy for primary tumor topography and completing inference more than ten times faster than equivalent RNN architectures [12].

C. Transformer Models and Large Language Models

Gondara et al. developed and operationally deployed a transformer ensemble pipeline for automatic reportable tumor detection in the British Columbia Cancer Registry, combining GatorTron and BlueBERT fine-tuned on 40,000 registry reports, sustaining a 98% accuracy threshold on reportable tumors across three consecutive retrospective years. In production since January 2024, the system reduced 900 annual hours of manual review, representing one of the first documented cases of an operationally deployed transformer-based pipeline in a population-based cancer registry [13].

III. Materials and Methods

A. Data Source

The corpus used in this study originates from the Population-based Cancer Registry of Manizales (*Registro Poblacional de Cáncer de Manizales*, RPCa-M. The RPCa-M systematically

collects pathological reports generated by pathology laboratories serving the population of Manizales. These documents constitute the primary source of oncological case notification to the registry and are written in Spanish by certified pathologists following the terminological conventions of Colombian clinical practice.

For this study, the RPCa-M provided a set of reports manually annotated by expert registry staff with a binary label indicating whether each report should be included or excluded from the population-based cancer registry, in accordance with established oncological reportability criteria. Prior to delivery, personally identifiable information specifically patient national ID numbers (cédula) and full names was anonymized using AES-256 encryption to safeguard patient privacy and comply with data protection regulations.

B. Corpus Characterization and Class Distribution

The labeled corpus comprises 31,296 pathology reports. The class distribution is markedly imbalanced, an intrinsic characteristic of the clinical phenomenon being modeled: 27,325 reports (87.3%) belong to the excluded class and 3,971 reports (12.7%) to the included class. This natural distribution was preserved in its entirety during training and evaluation, without applying artificial balancing techniques (oversampling, undersampling, or synthetic data generation), since the goal of the system is to replicate the behavior expected under real operational conditions of the registry.

C. Text Preprocessing

The pathology reports exhibit linguistic features characteristic of clinical discourse in Spanish: frequent use of abbreviations, specialized histological terminology, spelling variations, and elliptical syntactic structures. Each report contains three text fields that are used as input: microscopic description, macroscopic description, and clinical notes. The preprocessing strategy was adapted to each approach.

For the rule-based system, preprocessing included lowercase conversion, diacritic removal via Unicode normalization (unicodedata), and whitespace collapsing. For the transformer-based model (RoBERTa), encoding detection with chardet and mojibake correction with ftfy were applied, followed by field concatenation using separator tokens (DescripcionMicroscopica [SEP] DescripcionMacroscopica [SEP] Notas) and tokenization with truncation to 512 tokens. For MedGemma, fields were stripped of leading and trailing whitespace without additional normalization, and concatenated into a structured prompt truncated to 2,048 tokens.

D. Evaluated Methodological Approaches

With the objective of identifying the most suitable strategy for automating oncological reportability determination from pathology reports, this study compares three natural language processing approaches with complementary technical characteristics: a rule-based system, a biomedical Spanish transformer model (RoBERTa), and a large-scale medical language model (MedGemma 4B). This comparison allows for the establishment of an interpretable baseline, the determination of the viability of fine-tuned discriminative models for operational deployment, and the evaluation of the potential of large generative models in the clinical Spanish-language domain without fine-tuning.

a) Rule-Based System

The rule-based system constitutes the interpretable baseline of this study, formalizing the reportability determination process currently performed by RPCa-M staff through a set of logical rules applied to the textual fields of each report. Its design requires no training data, no GPU, and no external model dependencies.

The system architecture comprises three main components applied sequentially according to a defined order of precedence. First, a lexical normalization module converts the input text to lowercase, removes diacritics through Unicode normalization, and collapses redundant whitespace. Second, a pattern detection module applies regular expression matching over three hierarchically ordered lists: priority exclusion patterns, which take precedence over all other results; inclusion patterns, evaluated through a negation-aware matching function that inspects a contextual window comprising the full sentence together with 100 preceding characters and 80 following characters; and general exclusion patterns. Third, a decision module applies the classification logic in the following order of precedence: priority exclusion, valid inclusion, general exclusion, and finally the default assignment to excluded. As illustrated in Fig. 1, the system processes each report through these five sequential stages, emitting the classification label alongside the activated rule and matched patterns, thereby guaranteeing full traceability of each decision.



Fig. 1. Rule-based system classification pipeline.

b) RoBERTa

The second approach employs RoBERTa Biomedical Clinical ES [14], a transformer-based language model with 126M parameters pretrained on biomedical and clinical text in Spanish, fine-tuned as a binary sequence classifier for reportability determination.

The dataset was split into training (80%, 25,036 reports), validation (10%, 3,130 reports), and test (10%, 3,130 reports) partitions using stratified sampling to preserve the original class distribution. Fine-tuning was performed for 12 epochs, a batch size of 8 (gradient accumulation over 4 steps), a learning rate of 2×10^{-5} with a cosine scheduler. To address class imbalance, a class-weighted Focal Loss function was used (see Section III-D for parameters). As illustrated in Fig. 2, each pathology report is processed through a sequential pipeline: the three available text fields (microscopic description, macroscopic description, and clinical notes) are concatenated into a single input sequence, tokenized with the model's WordPiece tokenizer (max_length = 512 tokens, truncated right), passed through the pretrained RoBERTa encoder, and the resulting [CLS] token representation is fed to the binary classification head to produce the final reportability label.

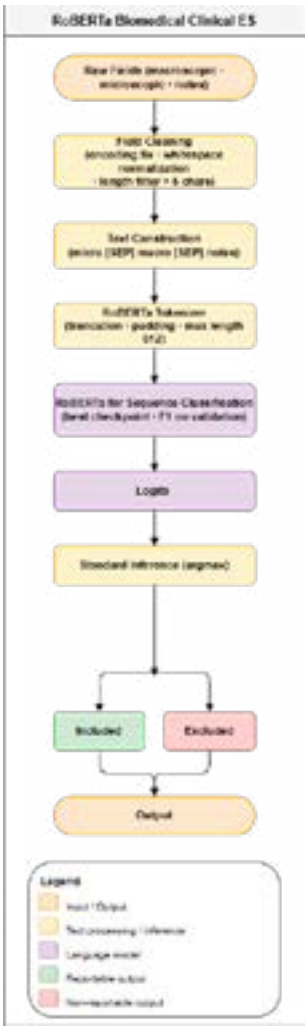


Fig. 2. RoBERTa Biomedical Clinical ES classification pipeline.

c) MedGemma 4B

The third approach evaluates MedGemma 4B [15], a 4-billion parameter causal language model from Google's Health AI Developer Foundations collection, built on the Gemma 3 architecture and specialized for medical text and image comprehension. The model was used in inference mode only, without fine-tuning or additional training.

A structured few-shot prompting strategy with chain-of-thought reasoning was applied; the full prompt structure and generation parameters are detailed in Section III-D. Due to the high inference time per report, MedGemma was evaluated on the same 3,130-report test set used for the other approaches, of which 2,184 yielded unambiguous predictions; the remaining 946 (30.2%) produced ambiguous outputs and were excluded from metric computation. As illustrated in Fig. 3, the inference pipeline constructs a structured few-shot prompt, generates a chain-of-thought response via greedy decoding, and applies a structured parser with a keyword-based fallback to extract the final classification label.

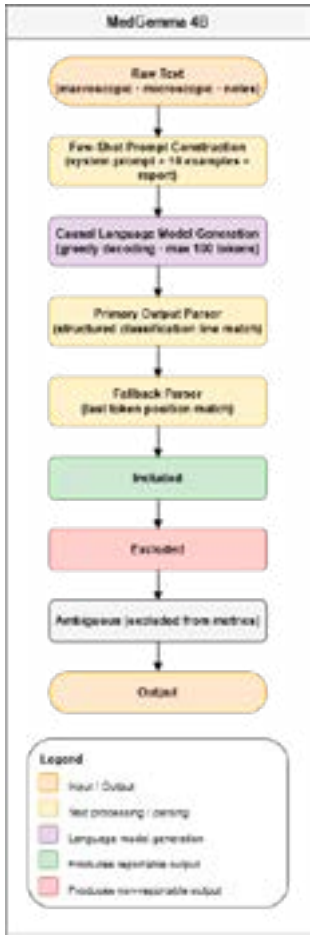


Fig. 3. MedGemma 4B inference pipeline.

d) Model Architecture Details

- RoBERTa Biomedical Clinical ES

The classification head maps the contextual representation of the [CLS] token, h_CLS ∈ ℝ^d (d = 768), to a two-dimensional logit vector through a linear transformation followed by a softmax activation:

$$\hat{y} = \text{softmax}(W \cdot h\_CLS + b),\ W \in \mathbb{R}^{(2\times768)},\ b \in \mathbb{R}^2 \quad (1)$$

where $\hat{y} \in \mathbb{R}^2$ represents the predicted class probability distribution over the two classes.

To address the marked class imbalance without altering the natural data distribution, the model was optimized using a class-weighted Focal Loss function [17]:

$$FL(p_t) = -\alpha_t (1 - p_t)^{\gamma} \log(p_t) \quad (2)$$

where p_t denotes the model's estimated probability for the ground-truth class, $\gamma = 2.0$ is the focusing parameter that down-weights well-classified examples, and α_t is the class-specific weight ($\alpha_0 = 0.5727$ for the majority class, $\alpha_1 = 3.9402$ for the minority class). This formulation concentrates the training signal on difficult, misclassified instances, particularly those belonging to the minority included class.

To mitigate catastrophic forgetting during fine-tuning, layer-wise learning rate decay (LLRD) was applied following the discriminative fine-tuning strategy of Howard and Ruder [18]:

$$lr\_k = lr\_base \times \rho^{(K-k)},\ \rho = 0.9,\ K = 28 \quad (3)$$

where $lr\_base = 2\times10^{-5}$ and deeper layers (smaller k) receive progressively lower learning rates, preserving the general linguistic representations acquired during pretraining while allowing the upper layers to specialize for the classification task.

At inference time, a default classification threshold of $\tau = 0.5$ was applied to the softmax probability of the included class. A report is classified as included if $\hat{y}_1 \geqslant \tau$, and as excluded otherwise.

- MedGemma 4B

The few-shot prompting strategy structures the input context as a concatenation of three components [15]:

$$P = [\ S\ ;\ E_1, E_2, \ldots, E_{10}\ ;\ R\ ] \quad (4)$$

where S is the system prompt defining the role of an expert pathologist and the RPCa-M reportability criteria; {E_i}^10_(i=1) are ten labeled demonstrations (five included, five excluded), each containing the macroscopic description, microscopic description, clinical notes, chain-of-thought reasoning, and classification label; and R is the target report whose reportability is to be determined.

Generation uses greedy decoding (temperature = 0, max_new_tokens = 100) to ensure deterministic and reproducible outputs. A primary structured parser extracts the classification label from the generated text; when the primary parser fails, a secondary keyword-based fallback is applied. Responses from which neither parser yields an unambiguous label are excluded from metric computation.

E. Evaluation Metrics

Following the recommendations of Tabares-Soto et al. [16] regarding the selection and interpretation of performance metrics for deep learning classification models, this study employs the following metrics, computed from the confusion matrix elements, true positives (TP), false positives (FP), true negatives (TN), and false negatives (FN).

Accuracy measures the proportion of correct predictions over the total number of evaluated instances:

$$Accuracy = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN) \quad (5)$$

Precision measures the proportion of truly reportable cases among all cases predicted as reportable, estimating the reliability of the system when issuing a reportability alert:

$$Precision = TP / (TP + FP) \quad (6)$$

Recall measures the proportion of truly reportable cases correctly detected by the system. In the context of a cancer registry, low recall implies underregistration of oncological cases:

$$Recall = TP / (TP + FN) \quad (7)$$

The F1-Score is the harmonic mean of precision and recall, particularly informative in the presence of imbalanced class distributions:

$$F1 = 2 \cdot (Precision \times Recall) / (Precision + Recall) \quad (8)$$

The Confusion Matrix summarizes the correspondence between actual and predicted labels for both classes, enabling analysis of error types and their operational implications. In this study, false negatives included cases incorrectly classified as excluded—are of primary operational concern, as they directly cause underregistration.

Given the class imbalance in the corpus (~87.3% excluded / ~12.7% included), the primary comparison metric is the F1-Score on the minority class, as defined in (8), complemented by confusion matrix analysis, particularly the false negative count. Overall accuracy, as defined in (5), is reported as a reference but is not used as the primary model selection criterion.

F. Statistical Comparison of Approach Performance

To determine whether the observed performance differences among the three approaches are statistically significant, McNemar's test [19] was applied to each pair of classifiers. This test is appropriate when comparing two classifiers evaluated on a fixed test set without cross-validation, as is the case for the rule-based system and MedGemma 4B, which require no iterative training. McNemar's test operates on the disagreement cells of a 2×2 contingency table constructed from the paired predictions of two models on the same evaluation instances, specifically the counts of cases where model A is correct and model B is incorrect (n_{01}) and vice versa (n_{10}):

$$\chi^2 = (|n_{01} - n_{10}| - 1)^2 / (n_{01} + n_{10}) \quad (9)$$

Under the null hypothesis that both classifiers have the same error rate, this statistic follows a chi-squared distribution with one degree of freedom. Edwards' continuity correction is applied to reduce the risk of Type I error with small disagreement counts. Three pairwise comparisons are performed: rule-based

system versus RoBERTa, rule-based system versus MedGemma 4B, and RoBERTa versus MedGemma 4B. To control the family-wise error rate arising from multiple simultaneous comparisons, the Bonferroni correction is applied, adjusting the significance threshold to $\alpha = 0.05 / 3 = 0.017$.

IV. Results

A. Rule-Based System

The rule-based system achieved an accuracy of 95.62% and a macro F1-Score of 90.32% on the 3,130-report evaluation set. For the included class, precision reached 81.25%, recall 85.14%, and F1-Score 83.00%. The confusion matrix (Fig. 4) shows that the system correctly classified 2,655 excluded reports and 338 included reports, producing 78 false positives and 59 false negatives. The false negatives represent included cases that would have been missed by the registry. The high performance on the excluded class (F1 = 97.50%) confirms the system's effectiveness as a filtering mechanism, though its false negative rate on the minority class reflects the inherent limitations of lexicon-based approaches in the presence of linguistic variability not covered by the rule set.

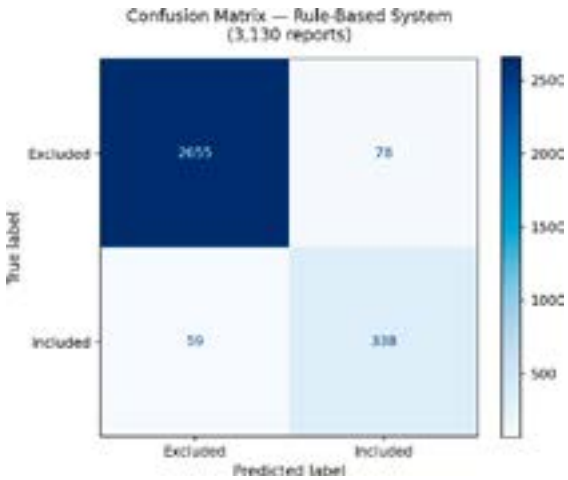


Fig. 4. Confusion matrix of Rule-Based System.

B. RoBERTa Biomedical Clinical ES

The fine-tuned RoBERTa model achieved the highest overall performance among the three evaluated approaches, with an accuracy of 97.76% and a macro F1-Score of 95.30%. For the included class, precision was 89.00%, recall 95.00%, and F1-Score 92.00%. The confusion matrix (Fig. 5) shows that the model correctly classified 2,686 excluded reports and 377 included reports, producing only 47 false positives and 8 false negatives. The reduction in false negatives relative to the rule-based system from 59 to 8 represents an 86.4% decrease in missed reportable cases, with direct operational implications for registry completeness.

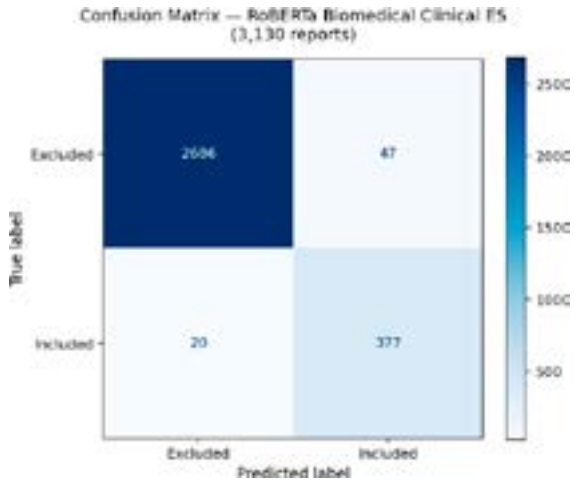


Fig. 5. Confusion matrix of RoBERTa Biomedical Clinical ES.

C. MedGemma 4B

MedGemma 4B was evaluated on the same 3,130-report test set; however, 946 reports (30.2%) produced ambiguous outputs and were excluded from metric computation, yielding 2,184 valid predictions. The model achieved an accuracy of 89.38% and a macro F1-Score of 79.14%. The confusion matrix (Fig. 6) shows that the model correctly classified 1,741 excluded reports and 211 included reports, producing 207 false positives and 25 false negatives. The precision on the included class was 50%, indicating a high rate of over-prediction of reportability, while the recall on the included class reached 89%, the highest among the three evaluated approaches. The ambiguous prediction rate of 30.2% represents a significant operational limitation, as nearly one in three reports on this partition required no classification decision from the model.

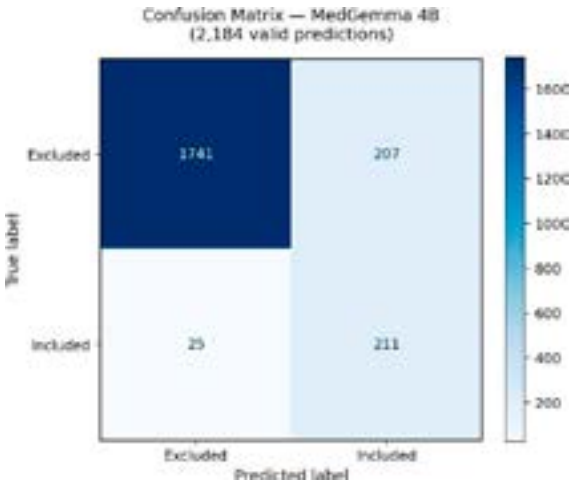


Fig. 6. Confusion matrix of MedGemma 4B.

D. Statistical Significance

McNemar's test with Bonferroni correction ($\alpha = 0.017$) revealed statistically significant differences in two of the three pairwise comparisons (Table I). RoBERTa achieved significantly better performance than both the rule-based system ($\chi^2 = 23.34$, $p < 0.001$) and MedGemma 4B ($\chi^2 = 80.90$, $p <$

0.001), confirming that the observed performance advantage of the fine-tuned model is not attributable to chance. The comparison between the rule-based system and MedGemma 4B yielded $\chi^2 = 6.56$ ($p = 0.010$), which does not reach significance after Bonferroni correction ($p > 0.017$), indicating that the difference in classification performance between these two approaches is not conclusive under the adjusted threshold. This result is consistent with the operational limitations of both models: the rule-based system is constrained by lexicon coverage, while MedGemma 4B produced ambiguous predictions for 30.2% of the test set, reducing the effective sample for this comparison.

TABLE I. PAIRWISE MCNEMAR'S TEST RESULTS WITH BONFERRONI CORRECTION (A = 0.017).

Comparison	*χ^2*	*p-value*	*Significant*
Rule-Based vs RoBERTa	23.34	< 0.001	Yes
Rule-Based vs MedGemma 4B	6.56	0.010	No
RoBERTa vs MedGemma 4B	80.90	< 0.001	Yes

V. CONCLUSIONS

This study presented the development and evaluation of three natural language processing approaches for automating oncological reportability determination from Spanish-language pathology reports in the context of the Population-based Cancer Registry of Manizales (RPCa-M). The comparison of a rule-based system, a fine-tuned biomedical transformer model (RoBERTa Biomedical Clinical ES), and a large-scale generative model (MedGemma 4B) provides a comprehensive assessment of the trade-offs between interpretability and classification performance in a real-world registry setting.

RoBERTa Biomedical Clinical ES achieved the highest performance across all primary metrics, with an accuracy of 97.76%, a macro F1-Score of 95.30%, and an F1-Score of 92.00% on the included class, producing only 8 false negatives on the test set. McNemar's test with Bonferroni correction confirmed that this advantage is statistically significant relative to both the rule-based system ($p < 0.001$) and MedGemma 4B ($p < 0.001$).These results demonstrate that fine-tuning a domain-specific transformer model on a labeled corpus of pathology reports in Spanish constitutes a viable and effective strategy for automating reportability determination at the registry level.

The rule-based system, while inferior in classification performance, offers complete decision traceability and requires no model training, making it a practical complement to the transformer-based approach for auditing and quality control purposes. Its F1-Score of 83.00% on the included class and 59 false negatives on the test set indicate that, as a standalone system, it does not meet the accuracy requirements for operational deployment without human supervision.

MedGemma 4B demonstrated the highest recall on the included class (89%) without any task-specific training, confirming the potential of large generative models for few-shot clinical classification in Spanish. However, its precision of 50% on the included class and its ambiguous prediction rate of 30.2% on the test partition represent significant barriers to routine operational use in the current configuration.

The marked class imbalance of the corpus (87.3% excluded / 12.7% included) was addressed through class-weighted Focal Loss and stratified evaluation across all approaches, ensuring that the reported metrics reflect performance under realistic registry conditions.

Several limitations of this study should be acknowledged. First, the statistical comparisons involving MedGemma 4B were computed on 2,184 valid predictions rather than the full test set due to the model's ambiguous output rate, which introduces uncertainty in the corresponding McNemar estimates. Second, external validation on reports from an independent pathology laboratory remains pending and constitutes a necessary step before operational deployment of the prototype at the RPCa-M. Third, the generalization of the fine-tuned RoBERTa model to pathology reports from laboratories with different terminological conventions has not yet been established.

Future work will focus on the external validation of the RoBERTa-based prototype on reports from an independent laboratory, the optimization of MedGemma 4B through quantization and batched inference to reduce ambiguous outputs, and the progressive integration of the system into the RPCa-M's operational workflow as a decision-support tool for registry staff.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Population-Based Cancer Registry of Manizales (RPCa-M) for providing the labeled corpus of pathology reports that made this study possible, and for their continuous collaboration and expert guidance throughout the development of this work.

REFERENCES

[1] GBD 2021 Cancer Collaborators, "Global, regional, and national burden of 34 cancer groups across 204 countries and territories, 1990–2021, and projections to 2050: a systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2021," Frontiers in Oncology, vol. 15, 2025, doi: 10.3389/fonc.2025.1660125.

[2] C. Pardo, "Innovación en la recolección de datos en los registros de cáncer de base poblacional de Colombia: implementación y desafíos," Revista Colombiana de Cancerología, vol. 30, no. 1, pp. 90–101, Mar. 2026, doi: 10.35509/01239015.1136.

[3] D. M. Parkin, "The role of cancer registries in cancer control," *International Journal of Clinical Oncology*, vol. 13, pp. 102–111, 2008, doi: 10.1007/s10147-008-0762-6.

[4] T. C. Tucker, E. B. Durbin, J. K. McDowell, and B. Huang, "Unlocking the potential of population-based cancer registries," *Cancer*, vol. 125, no. 21, pp. 3729–3737, 2019, doi: 10.1002/cncr.32355.

[5] H.-S. Chen, S. Negoita, S. Schwartz, E. Hsu, J. Hafterson, L. Coyle, J. Stevens, A. Fernandez, M. Potts, and E. J. Feuer, "Toward real-time reporting of cancer incidence: methodology, pilot study, and SEER Program implementation," *JNCI Monographs*, vol. 2024, no. 65, pp. 123–131, Aug. 2024, doi: 10.1093/jncimonographs/lgae024.

[6] A. Jerfy, O. Selden, and R. Balkrishnan, "The growing impact of natural language processing in healthcare and public health," *INQUIRY: The Journal of Health Care Organization, Provision, and Financing*, vol. 61, Art. no. 00469580241290095, 2024.

[7] I. Li, J. Pan, J. Goldwasser, N. Verma, W. P. Wong, M. Y. Nuzumlalı, B. Rosand, Y. Li, M. Zhang, D. Chang, R. A. Taylor, H. M. Krumholz, and D. Radev, "Neural natural language processing for unstructured data in electronic health records: A review," *Computer Science Review*, vol. 46, Art. no. 100511, 2022, doi: 10.1016/j.cosrev.2022.100511.

[8] D. M. Mendoza-Urbano, J. F. Garcia, J. S. Moreno, J. C. Bravo-Ocaña, A. J. Riascos, A. Zambrano Harvey, and S. I. Prada, "Automated extraction of information from free text of Spanish oncology pathology reports," *Colombia Médica*, vol. 54, no. 1, 2023.

[9] N. A. Portilla, O. Solarte-Pabón, and L. E. Bravo, "Automatic classification of cancer pathology reports written in Spanish: a machine-learning approach," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 33, no. 68, 2024.

[10] L. Hammami, A. Paglialonga, G. Pruneri, M. Torresani, M. Sant, C. Bono, E. G. Caiani, and P. Baili, "Automated classification of cancer morphology from Italian pathology reports using natural language processing techniques: A rule-based approach," *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 116, Art. no. 103712, 2021, doi: 10.1016/j.jbi.2021.103712.

[11] M. Alawad, S. Gao, J. X. Qiu, H. J. Yoon, J. B. Christian, L. Penberthy, B. Mumphrey, X.-C. Wu, L. Coyle, and G. Tourassi, "Automatic extraction of cancer registry reportable information from free-text pathology reports using multitask convolutional neural networks," *Journal of the American Medical Informatics Association*, vol. 27, no. 1, pp. 89–98, Jan. 2020, doi: 10.1093/jamia/ocz153.

[12] S. Gao, J. X. Qiu, M. Alawad, J. D. Hinkle, N. Schaefferkoetter, H.-J. Yoon, B. Christian, P. A. Fearn, L. Penberthy, X.-C. Wu, L. Coyle, G. Tourassi, and A. Ramanathan, "Classifying cancer pathology reports with hierarchical self-attention networks," *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 101, Art. no. 101726, 2019, doi: 10.1016/j.artmed.2019.101726.

[13] L. Gondara, J. Simkin, G. Arbour, S. Devji, and R. Ng, "Classifying tumor reportability status from unstructured electronic pathology reports using language models in a population-based cancer registry setting," *JCO Clinical Cancer Informatics*, no. 8, Art. no. e2400110, 2024, doi: 10.1200/CCI.24.00110.

[14] C. P. Carrino et al., "Pretrained Biomedical Language Models for Clinical NLP in Spanish," in Proc. 21st Workshop on Biomedical Language Processing, Dublin, Ireland, May 2022, pp. 193–199, doi: 10.18653/v1/2022.bionlp-1.19.

[15] Google, "google/medgemma-4b-it," *Hugging Face*, 2025. Available: https://huggingface.co/google/medgemma-4b-it.

[16] R. Tabares-Soto, H. B. Arteaga-Arteaga, A. Mora-Rubio, M. A. Bravo-Ortíz, D. Arias-Garzón, J. A. Alzate-Grisales, S. Orozco-Arias, G. Isaza, and R. Ramos-Pollán, "Sensitivity of deep learning applied to spatial image steganalysis," *PeerJ Computer Science*, vol. 7, Art. no. e616, 2021, doi: 10.7717/peerj-cs.616.

[17] T.-Y. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, and P. Dollár, "Focal loss for dense object detection," in Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision (ICCV), Venice, Italy, Oct. 2017, pp. 2980–2988, doi: 10.1109/ICCV.2017.324.

[18] J. Howard and S. Ruder, "Universal language model fine-tuning for text classification," in Proc. 56th Annu. Meeting Assoc. Computational Linguistics (ACL), Melbourne, Australia, Jul. 2018, pp. 328–339, doi: 10.18653/v1/P18-1031.

[19] T. G. Dietterich, "Approximate statistical tests for comparing supervised classification learning algorithms," Neural Computation, vol. 10, no. 7, pp. 1895–1923, 1998, doi: 10.1162/089976698300017197.

Desarrollo de una interfaz gestual para control vehicular simulado basada en sensores de profundidad y LabVIEW

Frank A.Ruiz
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas SIV-2R
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
frank.ruiz@pascualbravo.edu.co

Hader N. Gómez
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas SIV-2R
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
hader.gomez@pascualbravo.edu.co

Mateo Serna Ruda
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas SIV-2R
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
mateo.serna174@pascualbravo.edu.co

Juan Esteban Madrid
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas SIV-2R
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
j.madrid804@pascualbravo.edu.co

Santiago Gil Maldonado
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas SIV-2R
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
santiago.gil526@pascualbravo.edu.co

Daniel Gómez Cardona
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas SIV-2R
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
daniel.gomez623@pascualbravo.edu.co

Resumen*— Este trabajo presenta el diseño e implementación de una interfaz gestual computacional para el control de un vehículo simulado basado en el reconocimiento de gestos corporales, orientado al desarrollo de interfaces hombre-máquina aplicadas a sistemas físicos. La propuesta integra un sensor de profundidad 3D con el entorno de programación gráfica LabVIEW para capturar y procesar en tiempo real los movimientos del usuario y traducirlos en comandos de control de un sistema de automoción. El sistema emplea técnicas de visión artificial para la detección de regiones de interés (ROI) y seguimiento de la posición de las extremidades superiores del operador. A partir de la detección de la posición estas extremidades, se generan señales digitales que son interpretadas por el software para gobernar el desplazamiento y la dirección de un vehículo virtual. La arquitectura desarrollada integra procesamiento visual y comunicación TCP para la transmisión de las señales, permitiendo la interacción gestual sin contacto físico con la interfaz. La interfaz fue evaluada en diferentes escenarios de operación, con distintas intensidades de luz, y a distancias entre 1 a 5 metros del sensor, para analizar la estabilidad y precisión del reconocimiento de gestos y la respuesta del vehículo ante los comandos generados. Los resultados evidencian que la plataforma permite una interacción natural e intuitiva con el sistema simulado, mostrando un desempeño adecuado para futuras aplicaciones experimentales en control gestual físico. La propuesta contribuye al desarrollo de interfaces hombre-máquina basadas en visión artificial y sensores de profundidad, demostrando el potencial de estas tecnologías para el control de dispositivos físicos en entornos de investigación y desarrollo de sistemas interactivos.

Palabras Clave*— *Reconocimiento de gestos, Interfaces hombre-máquina, Visión artificial, Control vehicular

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de interfaces hombre–máquina HMI (Human–Machine Interfaces por sus siglas en inglés) ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas debido al avance de las tecnologías de visión artificial, sensores de profundidad y sistemas de procesamiento en tiempo real. En particular, la interacción gestual se ha consolidado como un enfoque prometedor para permitir la comunicación natural entre humanos y sistemas computacionales sin necesidad de dispositivos físicos convencionales como teclados, joysticks o pantallas táctiles. Este tipo de interacción resulta especialmente relevante en contextos donde se busca mejorar la accesibilidad, la ergonomía o la eficiencia de los procesos de control remoto de sistemas físicos. El reconocimiento de gestos se fundamenta en la detección, interpretación y clasificación de movimientos humanos mediante técnicas de visión por computador. Tradicionalmente, estos sistemas se implementaban mediante dispositivos como guantes sensorizados o sistemas de captura con marcadores ópticos; sin embargo, el desarrollo de sensores RGB-D ha permitido realizar la captura de movimiento sin contacto físico directo, reduciendo la complejidad del sistema y mejorando la experiencia del usuario. Entre estos sensores, el dispositivo Kinect ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones de captura de movimiento, reconocimiento de posturas y control gestual, debido a su capacidad para generar mapas de profundidad y realizar seguimiento esquelético en tiempo real. En la actualidad, la evolución de los sensores de profundidad ha permitido transitar desde dispositivos estándar como el Microsoft Kinect hacia alternativas más recientes y versátiles.

Diversos estudios han explorado el uso de sensores de profundidad para el reconocimiento de gestos aplicados a sistemas robóticos o interfaces de control. Por ejemplo, Ruiz et al., [1] desarrollaron un sistema basado en Kinect y LabVIEW

para capturar movimientos corporales y controlar remotamente un brazo robótico de cinco grados de libertad, demostrando la viabilidad de utilizar regiones de interés (ROI) para activar comandos específicos. De forma similar, Ababneh et al., [2] implementaron un sistema de control gestual para manipular un brazo robótico móvil destinado a la asistencia de personas mayores o con movilidad reducida. Así mismo, Abdallah & Bouteraa, [3] evaluaron diferentes estrategias de control para la tele operación de un brazo robótico utilizando Kinect como dispositivo de captura de movimiento. En el ámbito de investigación actual, los avances en visión artificial han permitido mejorar significativamente la interpretación de gestos mediante técnicas de aprendizaje automático y análisis de datos de profundidad. Gao et al., [4] presentaron una revisión sobre los desafíos y soluciones en la interpretación de gestos basada en visión artificial, destacando la importancia de sensores RGB-D para aplicaciones de interacción natural. De igual manera, Rahman et al., [5] analizaron los avances tecnológicos en sistemas de reconocimiento de gestos, resaltando su potencial en robótica, realidad virtual y sistemas interactivos.

En aplicaciones de robótica móvil, la fusión de datos entre sensores Lidar y cámaras Orbbec Astra, bajo el ecosistema ROS (Robot Operating System), ha demostrado mejorar significativamente el mapeo 3D y la detección de obstáculos no uniformes que el Lidar por sí solo suele omitir. El procedimiento se basó en la fusión de datos de ambos sensores: mientras el Lidar detectaba límites y obstáculos a una altura específica, la cámara Orbbec Astra identificaba objetos por encima y por debajo de esa línea de escaneo. El principal hallazgo fue que la fusión de datos produce mapas más claros y detallados, permitiendo una navegación sin colisiones [6]. Por otro lado, Janzon et al., desarrollaron una solución para identificar, rastrear y seguir a una persona específica en entornos comunes, con la capacidad de reidentificar al objetivo si la línea de visión se obstruye temporalmente. El estudio se llevó a cabo mediante la implementación de algoritmos de reconocimiento facial y corporal aplicados a datos obtenidos de cámaras RGB-D. Los hallazgos destacan que la precisión en la reidentificación depende significativamente tanto del tipo de sensor empleado como de las características del entorno donde se desplaza el individuo [7].

En otros campos de aplicación como la medicina deportiva y de rehabilitación, se evaluó cómo influyen los ángulos de visión de la cámara en el seguimiento de los patrones cinemáticos de la marcha. Se realizaron pruebas con 10 sujetos caminando en una cinta rodante, utilizando tres sensores: Azure Kinect, Kinect v2 y Orbbec Astra en cinco ángulos diferentes (0° a 90°). Los datos se compararon con un sistema de captura de movimiento Vicon (estándar de oro) mediante el error cuadrático medio (RMSE). Los hallazgos principales indicaron que la Azure Kinect tiene un mejor rendimiento en ángulos no frontales debido a su mayor resolución, mientras que la Kinect v2 funciona mejor en ángulos frontales (0°) [8]; en la misma línea de investigación, Navarro et al., realizaron un estudio comparativo de concordancia entre variables espaciotemporales obtenidas por dos sensores distintos para determinar si son intercambiables en aplicaciones clínicas. Se trabajó con las cámaras Microsoft Kinect v2 y Orbbec Astra Pro, evaluando el balanceo de brazos y el movimiento de tobillos mediante métodos de procesamiento digital de señales (DSP) y pruebas estadísticas. Los resultados sugieren que la cámara Orbbec Astra Pro puede ser un reemplazo viable para la Kinect v2 en la medición de variables de rehabilitación, aunque presenta desventajas en cuanto a la distancia de medición efectiva [9]. Respecto al análisis de movimientos clínicos, recientemente Bailon et al. desarrollaron un método de alta precisión para calcular los ángulos del brazo humano (pitch, yaw y roll). Para ello, se utilizó una cámara Orbbec Astra Pro Plus junto con el SDK Nuitrack para capturar coordenadas de las articulaciones en 3D en tiempo real, las cuales se procesaron mediante un enfoque basado en vectores y un Sistema de Coordenadas de Rotación Esférica (SRCS). Este sistema ha demostrado errores mínimos en comparación con sensores inerciales, consolidándose como una solución robusta y accesible para la captura de movimiento en tiempo real [10].

La precisión en la interpretación de los gestos técnicos, fundamentales para el control vehicular, se logra mediante métodos avanzados de procesamiento de coordenadas y la integración de hardware con algoritmos de seguimiento cinemático, fundamentándose el desarrollo de interfaces gestuales para el control de sistemas de automoción. En paralelo al uso de cámaras de profundidad, plataformas de desarrollo como LabVIEW han permitido integrar sensores, algoritmos de procesamiento y sistemas de control dentro de entornos de programación gráfica orientados a instrumentación virtual y adquisición de datos. Esta integración facilita el desarrollo de sistemas ciber físicos en los que los movimientos del usuario pueden traducirse en acciones de control sobre dispositivos físicos o virtuales en tiempo real. En el ámbito automotriz, estas tecnologías han comenzado a utilizarse para desarrollar nuevos mecanismos de interacción humano–máquina, especialmente en aplicaciones de tele operación, simulación y control remoto. A pesar de los avances antes mencionados, aún existe una necesidad de desarrollar plataformas accesibles que permitan validar arquitecturas de control gestual aplicadas a sistemas físicos.

En particular, el control de vehículos mediante interacción gestual representa un escenario de interés para el desarrollo de sistemas ciber físicos y la experimentación en interfaces hombre–máquina. En este contexto, el presente trabajo propone el diseño e implementación de una interfaz gestual basada en cámaras de profundidad y LabVIEW para el control de un vehículo simulado, en la cual los movimientos del usuario son capturados mediante visión artificial y transformados en comandos digitales que gobiernan el desplazamiento y la dirección del vehículo.

En la Tabla 1, se presenta un resumen de los trabajos consultados para la construcción del estado del arte relacionando anteriormente, el equipo usado y el aporte realizado en dicho trabajo.

TABLA 1. ESTADO DEL ARTE EN RECONOCIMIENTO DE GESTOS APLICADO A CONTROL DE SISTEMAS

Año	Autores	Artículo	Técnica/ Equipos	Aporte/ Hallazgo
2018	Ababneh et al.	Gesture Controlled Mobile Robotic Arm for Elderly Assistance	Kinect + brazo robótico móvil	Control gestual para asistencia a personas con movilidad reducida
2019	Abdallah & Bouteraa	Gesture control of robotic arm teleoperated by Kinect	Kinect + control dinámico	Comparación de estrategias de control para manipulación robótica
2020	Ruiz et al.	Sistema de captura de movimiento con Kinect y LabVIEW	Kinect + LabVIEW + servomotores	Control de servomecanismos mediante reconocimiento corporal
2020	Janzon et al.	Person Re-Identification in Human Following Scenarios: An Experience with RGB-D Cameras	Cámara RGB-D+ algoritmos de reconocimiento facial y corporal	Se diseñó una solución robusta para identificar y seguir personas, con capacidad de reidentificación tras obstrucciones temporales de la línea de visión
2021	Basavanna et al.	ROS Based 3D Mapping of an Indoor Environment Using Fusion of Orbbec Astra Camera and Lidar on Turtlebot Mobile Robot	Robot móvil + sensor Lidar+ cámara Orbbec Astra + ecosistema ROS	La fusión de datos mejoró la percepción del entorno, permitiendo detectar obstáculos no uniformes (como sillas) que el Lidar omite, logrando una navegación sin colisiones
2021	Yeung et al.	Effects of camera viewing angles on tracking kinematic gait patterns using Azure Kinect, Kinect v2 and Orbbec Astra Pro	Azure Kinect + Kinect v2 + Orbbec Astra + sistema Vicon (estándar de oro) + análisis ANOVA	La Azure Kinect: mejor rendimiento en ángulos de visión no frontales (22.5° a 90°). Kinect v2: más precisa en el ángulo frontal (0°)
2023	Navarro et al.	Kinect v2 and Orbbec Astra Pro Cameras for Gait Analysis a Preliminary Comparison	Kinect v2 + Orbbec Astra Pro + métodos DSP	Se validó la Astra como un reemplazo viable para el Kinect v2 en aplicaciones clínicas, aunque con una distancia de medición menor.
2024	Gao et al.	Challenges and solutions for vision-based hand gesture interpretation	Revisión de visión artificial	Identificación de desafíos en reconocimiento gestual
2025	Rahman et al.	Comparative study of hand gesture recognition systems	Técnicas avanzadas de reconocimiento gestual	Comparación de algoritmos y tecnologías emergentes
2025	Bailon et al.	Human Arm Angle Calculation Using Spherical Rotation Coordinate System and Vector-Based Approach Through Orbbec Astra Pro Plus Camera	Cámara Orbbec Astra Pro Plus + SDK Nuitrack + Coordenadas (SRCS) + sensores MPU6050	El sistema alcanzó una alta precisión en el cálculo de ángulos del brazo con errores mínimos (±0.69° a ±1.39°), siendo una alternativa económica para análisis biomecánico

II. METODOLOGÍA

La metodología adoptada en este trabajo se fundamenta en un enfoque experimental orientado al diseño, implementación e integración de un sistema de control gestual aplicado a un vehículo simulado. El proceso metodológico se estructuró en cuatro fases principales: Adquisición (Sensor), Procesamiento (Python), Comunicación (TCP/IP), Visualización y control /Interfaz (LabVIEW). La Fig. 1 muestra las fases metodológicas llevadas a cabo.

En la Fig. 2, se puede ver el detalle de la arquitectura concebida en este trabajo, diseñada para traducir los movimientos corporales del usuario en comandos de control precisos para un vehículo simulado. La interacción sigue un flujo de datos continuo y en tiempo real:

Capa 1 - Adquisición: Esta capa constituye la base física del sistema. El sensor de profundidad 3D Orbbec Astra captura de manera sincronizada flujos de video RGB y mapas de profundidad. Esta información es transmitida al equipo de cómputo a través de una conexión USB, proporcionando la materia prima para todo el análisis posterior. El sensor de profundidad captura la información de profundidad y el seguimiento esquelético del usuario, permitiendo identificar la posición de diferentes articulaciones del cuerpo humano en tiempo real.



Fig. 1. Esquema de la arquitectura conceptual del sistema

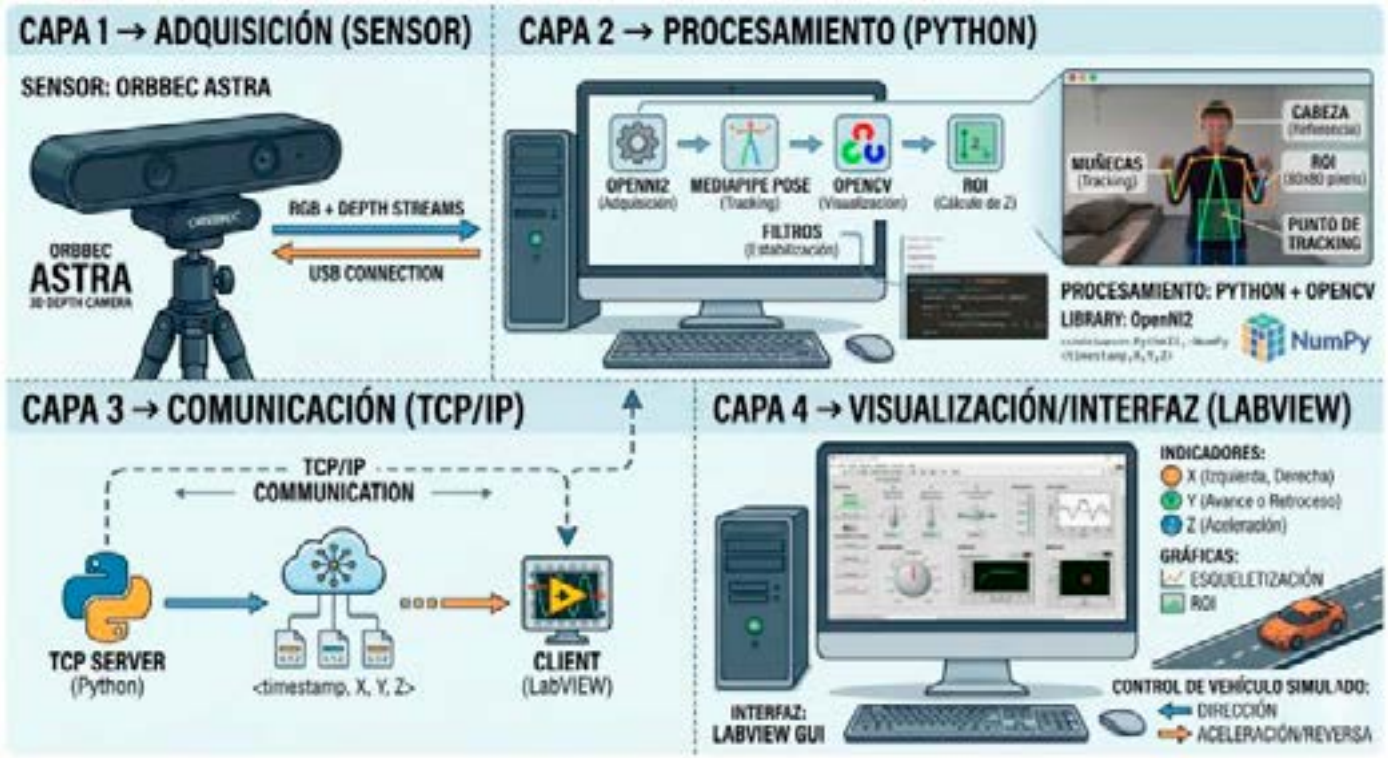


Fig. 2. Arquitectura detallada del sistema

Capa 2 - Procesamiento (Python): En esta etapa, se utiliza la librería OpenNI2 para la gestión de dispositivos, MediaPipe Pose realiza el seguimiento (tracking) del esqueleto del usuario, identificando puntos clave como la cabeza (referencia estática) y las muñecas (referencia móvil). A partir de esto, se calcula una Región de Interés (ROI) dinámica sobre la mano del operador. El sistema aplica filtros digitales para la estabilización de la señal, calculando las coordenadas espaciales (X, Y, Z) necesarias para definir el comando gestual.

Capa 3 - Comunicación (TCP/IP): Para asegurar la interoperabilidad entre el entorno de procesamiento (Python) y el entorno de control (LabVIEW), se implementa un servidor TCP. Este protocolo garantiza la transmisión robusta de los datos, empaquetando las variables calculadas en un formato específico (<timestamp, X, Y, Z>). Esta capa actúa como un puente de comunicación, permitiendo que la información fluya desde el motor de visión hacia la interfaz de usuario con baja latencia.

Capa 4 - Visualización/Interfaz (LabVIEW): Finalmente, la GUI desarrollada en LabVIEW actúa como cliente TCP, recibiendo y visualizando los datos entrantes. Además de mostrar gráficamente el estado del tracking (esqueletización y ROI), esta interfaz traduce las coordenadas recibidas en comandos de control para el vehículo simulado, donde los ejes X, Y y Z determinan la dirección, la aceleración y la reversa. De esta manera, se cierra el ciclo de interacción hombre-máquina, permitiendo un control intuitivo y sin contacto físico.

A. Secuencia de implementación metodológica

Los pasos para la implementación de la metodología se describen en la Fig. 3.

Paso 1: Integración del hardware
Conexión de la cámara Orbbec Astra al PC vía USB. Verificación de reconocimiento del dispositivo
Paso 2: Instalación del entorno de desarrollo
Instalación de drivers OpenNI2, configuración de variables de entorno (ruta OPENNI_PATH), instalación de librerías Python: OpenNI2, OpenCV, MediaPipe, NumPy.
Paso 3: Adquisición de datos de profundidad
Inicialización del stream de profundidad, lectura de frames en formato matriz (depth map), conversión a arreglo NumPy.
Paso 4: Adquisición de imagen RGB
Uso del stream de color de la cámara, conversión de formato (RGB → BGR para OpenCV).
Paso 5: Detección y tracking del usuario
Implementación de MediaPipe Pose, identificación de puntos clave: Cabeza (referencia), Muñecas (tracking de manos).
Paso 6: Definición de región de interés (ROI)
Centrado dinámico en la mano detectada, tamaño fijo del ROI (ej. 80×80 píxeles)
Paso 7: Cálculo de la distancia (Z)
Filtrado de valores válidos de profundidad
Selección del punto más cercano
Promedio de valores cercanos al mínimo
Filtro de mediana (buffer temporal)
Limitador de pendiente (variación máxima)
Filtro adaptativo (suavizado dinámico)

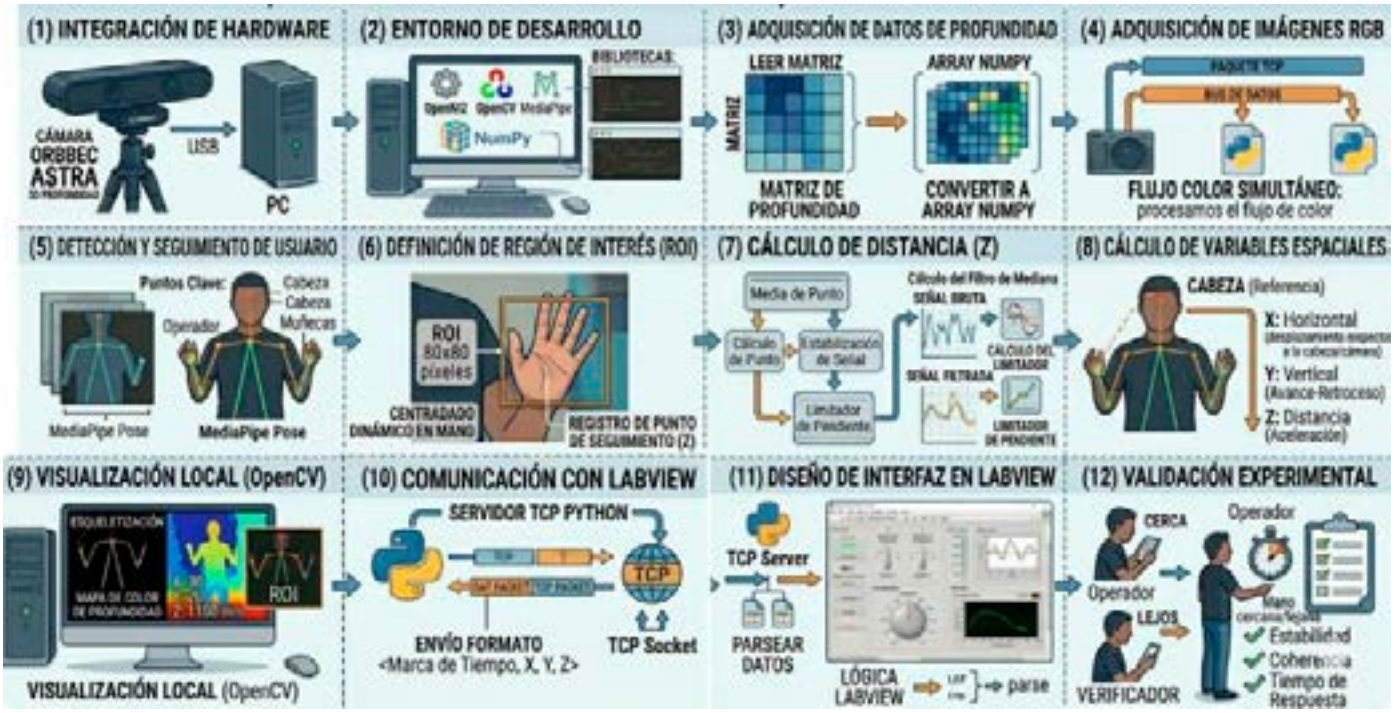


Fig. 3. Secuencia gráfica de la implementación metodológica

Paso 8: Cálculo de variables espaciales
X: desplazamiento horizontal respecto a la cabeza
Y: desplazamiento vertical
Z: distancia en milímetros desde la cámara
Paso 9: Visualización local (OpenCV)
Imagen RGB con esqueletización
Imagen de profundidad con mapa de color
Superposición de: ROI, Punto de tracking, Valores
Paso 10: Comunicación con LabVIEW
Implementación de servidor TCP en Python
Envío de datos en formato: <timestamp, X, Y, Z>
Paso 11: Diseño de interfaz en LabVIEW
Recepción de datos TCP
Desconcatenación de la trama
Paso 12: Validación experimental
Pruebas de distancia:
Mano cercana / lejana
Evaluación de: Estabilidad de Z, Coherencia con movimiento real
Tiempo de respuesta
Visualización mediante: Indicadores numéricos, gráficas en tiempo real.

B. Implementación del sistema de control vehicular

El vehículo utilizado corresponde a un carro simulado implementado en la plataforma virtual *MonoDrive simulator*. El control de este vehículo se realizó usando las librerías dispuestas en *LabVIEW*. En la Fig. 4 se muestra el escenario virtual de *MonoDrive* donde se realizaron las pruebas de conducción.



Fig. 4. Simulador MonoDrive. API para el entorno gráfico de LabVIEW

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se diseñó una interfaz gráfica en LabVIEW capaz de visualizar en tiempo real los datos capturados por el sensor de profundidad Astra, incluyendo el mapa de profundidad y la posición de las articulaciones del usuario. A partir de esta información se definieron regiones de interés *(ROI*) dentro del campo de visión del sensor, las cuales activan comandos de control cuando el usuario realiza determinados movimientos corporales, de este modo se ejecutan tareas como: avance, retroceso y dirección del vehículo. La Fig. 5 muestra la Instalación experimental del trabajo, en ella se visualiza la interfaz gestual diseñada, el simulador de conducción *MonoDive*, la cámara *Astra Orbbec* y la detección de las imágenes de profundidad y *RGB*.



Fig. 5. Instalación experimental

En la Interfaz de usuario (ver Fig. 6) se definen los parámetros de configuración del protocolo TCP (Dirección IP, Puerto y Número de bytes). Además, se puede seleccionar el tipo de terreno y clima donde se desea conducir. La interfaz reporta los valores instantáneos en las tres coordenadas espaciales (X, Y, Z) y permite visualizar la posición del timón y del pedal de aceleración. Las pruebas iniciales del sistema permitieron verificar el funcionamiento de la arquitectura propuesta, evidenciando una respuesta adecuada en la detección de gestos y en la transmisión de comandos hacia el vehículo simulado.



Fig. 6. Interfaz gestual para control vehicular simulado desarrollada en LabVIEW

Entre los resultados preliminares obtenidos se destacan: Reconocimiento estable de gestos dentro del campo de visión del sensor, latencia reducida entre el movimiento del usuario y la activación del comando y control efectivo del desplazamiento del vehículo en las direcciones definidas. Las pruebas experimentales indicaron que el sistema es capaz de traducir movimientos corporales en acciones de control con un comportamiento consistente, siempre que el usuario permanezca dentro de las regiones de detección establecidas. En la Fig. 7, se pueden observar diferentes escenarios y climas de conducción donde fue probado el control de dirección y velocidad del vehículo simulado, en ella se permite visualizar los valores instantáneos de las variables X, Y y Z adquiridas, la posición del timón, el porcentaje de aceleración y el estado de avance o retroceso del vehículo.



Fig. 7. Vehículo operado bajo diferentes escenarios de conducción y climas

Las Fig. 8 y 9 muestran las imágenes del mapa de profundidad y la cámara RGB captadas. En ellas se evidencia la creación de una Región de Interés (ROI por sus siglas en inglés *Region Of Interest*) sobre las extremidades detectadas, el proceso de esqueletización, detección y seguimiento de los brazos (tracking) y los valores detectados para cada eje. Independiente de la mano detectada, para el eje X (eje horizontal y referente a la cabeza), se obtendrá un valor de cero (0) si la mano está naturalmente cerca de la cabeza en posición palma abierta hacia el frente. Si la mano está extendida hacia un extremo, su valor corresponderá a (1) para la mano derecha y a (-1) para la mano izquierda. Para las posiciones intermedias del brazo, se tendrá un valor proporcional a su extensión que oscila entre (0) y (±1). El valor del eje X es el que controla la posición del timón en la interfaz, pudiéndose girar de izquierda a derecha o viceversa.



Fig. 8. Detección de valores para el eje horizontal “X”. Izquierda



Fig. 9. Detección de valores para el eje horizontal "X". Derecha

Estando el usuario ubicado frente a la cámara (aproximadamente a unos 2m), e independientemente de la mano detectada, cuando se levante la mano y el valor de Y (eje vertical) supere un umbral determinado, se establecerá la condición de reversa del automóvil. El vehículo continuará moviéndose hacia atrás hasta tanto el valor del eje Y no haya decaído por debajo de dicho umbral, momento en el cual se reestablecerá la dirección del vehículo hacia adelante. La Fig. 10 muestra la detección de valores en el eje vertical.



Fig. 10. Detección de valores para el eje vertical "Y" (Adelante-Atrás)

Para controlar la velocidad (posición del acelerador) del vehículo, el usuario podrá acercar o recoger su mano, conservando su palma abierta y de frente hacia la cámara. Entre más cerca esté, se acelerará más el vehículo, si se aleja, el porcentaje de aceleración disminuirá. La Fig. 11 muestra la detección de valores para el eje de profundidad Z (922 mm) y el porcentaje de aceleración sobre el vehículo (78%).



Fig. 11. Detección de valores para el eje de profundidad "Z" (Aceleración) con la mano extendida

La Fig. 12 muestra la detección de valores para el eje de profundidad Z (1220 mm) y el porcentaje de aceleración sobre el vehículo (30%).



Fig. 12. Detección de valores para el eje de profundidad "Z" (Aceleración) con la mano recogida

En la Fig. 13 se muestra el código gráfico desarrollado en LabVIEW, en él se establece la conexión TCP/IP con el script de Python y se procesan los datos enviados por la cámara. Usando los bloques "Match Pattern" se desconcatena la trama y se extraen independientemente los valores de las variables X, Y y Z. La trama de datos transmitida posee el siguiente formato:

<timestamp,X,Y,Z>.

Para controlar la dirección (adelante o reversa) del vehículo simulado, se estableció un valor umbral de 40 en la variable Y, si el valor del eje vertical supera este umbral, entonces el vehículo retrocede, de lo contrario avanzará hacia adelante.

Para controlar proporcionalmente la velocidad del vehículo con la extensión de la mano hacia adelante, se estableció una relación lineal entre el valor de Z (distancia a la cámara) y el porcentaje de aceleración a través de una regresión lineal así:

$$\%Acel = -0.01 * Z + 10 \qquad (1)$$

Donde Z es el valor de la distancia sensado desde la mano hasta la cámara expresado en [mm] y $\%Acel$ se refiere al porcentaje de aceleración del vehículo.

Nótese que las variables de control están conectadas directamente al bloque "*DRIVE*" del vehículo simulado.

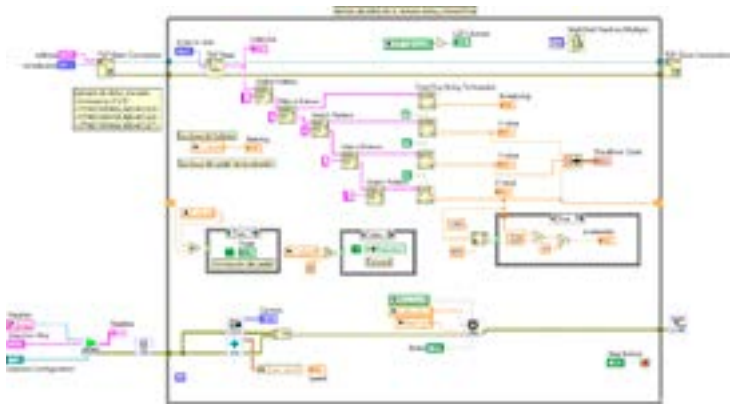


Fig. 13. Código gráfico desarrollado en LabVIEW

Los resultados obtenidos demuestran que la integración de sensores RGB-D con plataformas de instrumentación virtual permite desarrollar interfaces hombre–máquinas basadas en interacción natural con un costo relativamente bajo. La utilización de la cámara Astra Orbbec como sensor de captura de movimiento ofrece ventajas importantes en términos de disponibilidad de datos tridimensionales y seguimiento esquelético en tiempo real.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó el diseño e implementación de una interfaz gestual basada en sensores de profundidad y LabVIEW para el control de un vehículo simulado. La arquitectura propuesta permitió integrar captura de movimiento, procesamiento de señales y control de actuadores dentro de un sistema virtual, capaz de interpretar gestos humanos en tiempo real.

Los resultados preliminares evidencian la viabilidad de utilizar sensores de profundidad como dispositivos de interacción natural para el control de sistemas físicos, contribuyendo al desarrollo de interfaces hombre–máquina más intuitivas y accesibles.

Comparado con trabajos previos en los que el reconocimiento gestual se utiliza principalmente para controlar brazos robóticos o sistemas virtuales, la propuesta presentada explora su aplicación en el control de un sistema vehicular. Esto amplía las posibilidades de investigación en interfaces gestuales aplicadas a sistemas de movilidad y plataformas experimentales de control. En trabajos futuros se plantea integrar algoritmos más avanzados de clasificación de gestos basados en aprendizaje automático, así como ampliar el número de comandos gestuales y evaluar el desempeño del sistema en escenarios más complejos. No obstante, el sistema presenta algunas limitaciones asociadas a la dependencia de las condiciones de iluminación, la distancia del usuario respecto al sensor y la precisión del seguimiento esquelético. Estas limitaciones han sido también reportadas en investigaciones previas sobre sensores Kinect y sistemas de reconocimiento gestual [4].

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Institución Universitaria Pascual Bravo por la financiación del proyecto PCT908 y al Laboratorio de Electrónica Industrial Orlando Carrillo Perilla de La UdeA por el apoyo con el préstamo los sensores de profundidad Astra.

REFERENCIAS

[1] F. A. Ruiz, H. N. Gómez, S. A. Estrada, J. M. Muñoz, A. F. Correa, and N. A. Restrepo, “Diseño e implementación de un sistema para captura de movimiento corporal y control de servomecanismos mediante Kinect y LabView,” *Germina*, vol. 3, no. 3, pp. 60–88, 2020, doi: https://doi.org/10.52948/germina.v3i3.223.

[2] M. Ababneh, H. Sha, D. Alshalabe, D. Khader, H. Mahameed, and M. Alqudimat, “Gesture Controlled Mobile Robotic Arm for Elderly and Wheelchair People Assistance Using Kinect Sensor,” pp. 636–641, 2018.

[3] I. Ben Abdallah and Y. Bouteraa, “Gesture control of 3DoF robotic arm teleoperated by Kinect sensor,” in *19th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering (STA)*, IEEE, 2019.

[4] K. Gao *et al.*, “Challenges and solutions for vision-based hand gesture interpretation: A review,” *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 248, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.cviu.2024.104095.

[5] M. M. Rahman, A. Uzzaman, F. Khatun, M. Aktaruzzaman, and N. Siddique, “A comparative study of advanced technologies and methods in hand gesture analysis and recognition systems,” Mar. 25, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.eswa.2024.125929.

[6] M. Basavanna., M. Shivakumar., K. . Prakash., and P. Bhomkar, “ROS Based 3D Mapping of an Indoor Environment Using Fusion of Orbbec Astra Camera and Lidar on Turtlebot Mobile Robot,” in *2021 5th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, IEEE, Dec. 2021, pp. 323–327. doi: 10.1109/ICEECCOT52851.2021.9708058.

[7] S. Janzon, C. M. Sanchez, M. Zella, and P. J. Marron, “Person Re-Identification in Human Following Scenarios: An Experience with RGB-D Cameras,” in *2020 Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, IEEE, Nov. 2020, pp. 424–425. doi: 10.1109/IRC.2020.00076.

[8] L.-F. Yeung, Z. Yang, K. C.-C. Cheng, D. Du, and R. K.-Y. Tong, “Effects of camera viewing angles on tracking kinematic gait patterns using Azure Kinect, Kinect v2 and Orbbec Astra Pro v2,” *Gait Posture*, vol. 87, pp. 19–26, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.gaitpost.2021.04.005.

[9] A. Navarro, L. Vargas, A. Arteaga, P. Madrinan, N. Salazar, and H. Clavijo-Moran, “Kinect v2 and Orbbec Astra Pro Cameras for Gait Analysis a Preliminary Comparison,” in *2023 IEEE Colombian Caribbean Conference (C3)*, IEEE, Nov. 2023, pp. 1–4. doi: 10.1109/C358072.2023.10436293.

[10] F. J. L. Bailon, C. J. B. Batain, O. Q. Buniel, J. C. V. Lopez, R. P. Sagun, and R. E. Tolentino, “Human Arm Angle Calculation Using Spherical Rotation Coordinate System and Vector-Based Approach Through Orbbec Astra Pro Plus Camera,” in *2025 IEEE 4th International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*, IEEE, Sep. 2025, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICONAT66879.2025.11362729.

Prevención cardiovascular con mhealth: retos para el desarrollo de tecnología digital de salud desde un enfoque de innovación tecnológica

Camila Castro-Páez
Depto. de Ingeniería Biomédica
Universidad de los Andes,
Bogotá, Colombia
cami-cas@uniandes.edu.co

Laura del Mar González
Depto. de Cardiología
Fundación Cardioinfantil (La Cardio)
Bogotá, Colombia
lgonzalezp@lacardio.org

Sandra Saumett
Depto. de Investigaciones
Fundación Cardioinfantil (La Cardio)
Bogotá, Colombia
sandrasaumett@gmail.com

Diana Espitia
Depto. de Ingeniería Biomédica
Universidad de los Andes,
Bogotá, Colombia
da.espitiac@uniandes.edu.co

Clara Forero
Depto. de Diseño
Universidad de los Andes,
Bogotá, Colombia
cl.forero2722@uniandes.edu.co

Daniel Hernández
Depto. de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad de los Andes,
Bogotá, Colombia
df.hernadezp12@uniandes.edu.co

Camilo Escobar-Velásquez
Depto. de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad de los Andes,
Bogotá, Colombia
ca.escobar2434@uniandes.edu.co

Mario Linares-Vásquez
Depto de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad de los Andes,
Bogotá, Colombia
m.linaresv@uniandes.edu.co

Javier Navarro
Visible Heart® Laboratories,
Institute for Engineering in Medicine, Department of Surgery
University of Minnesota
MN, United States of America
jnavarro@umn.edu

Juan Carlos Briceño
Depto. de Ingeniería Biomédica ,
Universidad de los Andes,
Depto. de Investigaciones,
Fundación Cardioinfantil (La Cardio)
Bogotá, Colombia
jbriceno@uniandes.edu.co

Darío Echeverri
Depto. de Cardiología
Fundación Cardioinfantil (La Cardio)
Bogotá, Colombia
decheverri@lacardio.org

***Abstract*—La prevención primaria de la enfermedad cardiovascular es un desafío que podría ser abordado con herramientas basadas en tecnologías móviles (mhealth). Aunque el desarrollo de estas herramientas es necesario, no es un reto tecnológico demasiado complejo. En este proyecto se planteó caracterizar el nivel de riesgo cardiovascular de la población de colaboradores de un hospital con foco cardiovascular en Colombia, desarrollar una aplicación móvil que integre la clasificación de riesgo y la educación para prevención cardiovascular, evaluar el desempeño de la herramienta a corto plazo, y entender los retos para el desarrollo de soluciones internas. En resumen, el 41% de la población del estudio tiene un riesgo cardiovascular moderado o alto, a pesar de que en su mayoría son mujeres jóvenes que trabajan en un entorno de atención médica con enfoque cardiovascular. Aunque se tiene una necesidad médica definida y alineada con el interés institucional, usuarios relativamente "cautivos" dentro del hospital, se cuenta con financiación y con el recurso humano multidisciplinario necesario; las dificultades han obstaculizado el desarrollo y la implementación. En aspectos humanos se destaca la falta de adherencia al tratamiento de los participantes, la deserción en el estudio, la dificultad del trabajo multidisciplinario, las brechas en la articulación del equipo con el personal de tecnología, y la creciente desmotivación en el equipo. En aspectos técnicos se resaltan la poca claridad sobre los lineamientos internos, la falta conocimientos, y la necesidad de personal dedicado dentro de la institución. En aspectos administrativos se resaltan las incompatibilidades entre la ejecución de proyectos ágiles de software y la ejecución de proyectos de investigación con financiación**

Palabras clave—enfermedad cardiovascular, prevención primaria, innovación en salud, mhealth.

I. Introducción

La enfermedad cardiovascular (CV) causa una alta morbilidad y mortalidad de adultos en el mundo, y sigue siendo la enfermedad más mortal en países de América, como Colombia. Aunque en los últimos años se ha disminuido la mortalidad y la carga de la enfermedad en las Américas, aún existen diferencias importantes entre los países de Latinoamérica [1]. Como la enfermedad CV es silenciosa, puede tardar décadas en desarrollarse hasta ser sintomática; es necesario realizar prevención primaria efectiva. La prevención primaria implica identificar a las personas "aparentemente" sanas que tienen riesgo cardiovascular (RCV) e implementar estrategias que controlen los factores de riesgo modificables.

Para determinar el RCV de las personas se usan modelos cuantitativos, como la escala de riesgo de Framingham, las ecuaciones de cohortes agrupadas (Pooled Cohort Equations) o SCORE2 [2-4]. Diferentes modelos han sido validados para la

población colombiana [5], pero el Ministerio de Salud en su guía más reciente recomienda usar Framingham ajustada [10].

Respecto a los factores de riesgo para enfermedad CV en Latinoamérica, se ha reportado asociación con factores sociales como poca educación, bajo estatus socioeconómico, discriminación, disparidades, dificultad de acceso a servicios de salud y a tratamientos (como controles de hipertensión o diabetes), diferencias de oferta y acceso entre zonas urbanas y rurales, y condiciones de vida inadecuadas (como baja calidad del aire). También se ha asociado a factores de riesgo metabólico (como hipertensión arterial, diabetes, colesterol elevado, y obesidad abdominal), a factores de riesgo comportamentales (como el tabaquismo, consumo de alcohol, dieta poco saludable, y sedentarismo), y a otras comorbilidades (como diabetes, depresión o condiciones genéticas) [1, 6-9]. Si bien algunos de estos factores no son modificables, sí se pueden implementar acciones efectivas para modificar ciertos factores (por mencionar algunos, aumentar la actividad física o controlar la hipertensión) y así reducir el RCV.

Por esta razón, las herramientas basadas en tecnologías móviles (*mhealth*) pueden jugar un rol relevante en las iniciativas de predicción, prevención, monitoreo y educación de enfermedad CV. Incluso su potencial puede ser mayor como habilitador tecnológico en países de ingresos bajos y medios, o en zonas rurales o apartadas. Algunos estudios han demostrado su utilidad para reducir la presión arterial sistólica, mejorar la adherencia farmacológica, aumentar el control glicémico, detectar arritmias, y promover mejores hábitos de vida (como actividad física, cesación de tabaquismo, y dieta saludable). Su impacto se amplifica cuando se incluye retroalimentación personalizada, se combina con intervención profesional y se basa en teorías de cambio conductual.

En el proyecto Corazón Saludable (cofinanciado por Minciencias Código 223989785348, contrato 750-2021) realizado por Uniandes y La Cardio, se propuso entender el efecto de una herramienta de mhealth para hacer prevención cardiovascular en el contexto colombiano. Aunque la misión es clara, la necesidad clínica existe, la tecnología necesaria no es complicada, y se tiene financiación; el proyecto ha enfrentado diferentes retos más allá de la tecnología. El objetivo de este trabajo es discutir los aciertos y las dificultades encontrados en el desarrollo de tecnologías móviles dentro del hospital.

II. Metodología

El proyecto Corazón Saludable fue aprobado por el Comité de ética de la Fundación Cardioinfantil. La población de estudio fue el personal de colaboradores del hospital (personal de salud, administrativos, y externos). El único criterio de inclusión fue ser parte del personal del hospital; y los criterios de exclusión fueron estar en estado de embarazo o tener menos de 30 años. Todas las personas que cumplían los criterios fueron invitadas a participar mediante email. El reclutamiento se realizó entre agosto y noviembre de 2022, aunque el seguimiento sigue en curso. La participación, después de firmar el consentimiento informado, fue libre, voluntaria y gratuita. El hospital garantizó al personal el tiempo para asistir a las consultas, y el proyecto asumió los costos de las valoraciones y de los exámenes de laboratorio.

A. Caracterización de riesgo cardiovascular de la población

Se realizó un estudio de cohorte prospectivo con el personal del hospital. La información fue recolectada mediante encuestas, valoraciones médicas de cardiología, y exámenes de laboratorio realizados en el hospital (sin costo para los participantes).

La encuesta indagó sobre características sociodemográficas (por ejemplo, nivel educativo y tipo de aseguramiento en salud), antecedentes médicos familiares (historia de diabetes, hipertensión arterial, o de enfermedad CV), estilo de vida y hábitos (como consumo de alcohol y de tabaco, calidad de la dieta, actividad física, medio de transporte para desplazarse al trabajo, y uso del teléfono móvil). En las valoraciones médicas (todas realizadas dentro del hospital) se tomaron medidas de peso (kg), talla (cm), perímetro abdominal (cm), y presión sistólica basal (mmHg) usando los protocolos estándar. Cada persona fue remitida al laboratorio del hospital, para tomar exámenes de colesterol total (mg/dL), colesterol de alta densidad - HDL (mg/dL), colesterol baja densidad - LDL (mg/dL), triglicéridos (mg/dL), y glucosa en ayunas (mg/dL).

La obesidad fue determinada mediante el índice de masa corporal (IMC), usando los valores estándar. La obesidad abdominal fue definida con valores de perímetro abdominal mayor a 102 cm para hombres, y 88 cm en mujeres. La presión arterial alta fue definida como: tener antecedentes de hipertensión arterial (autoreportado), usar de medicación hipotensiva, o tener un valor basal superior a 130 mmHg. La diabetes fue definida como: tener antecedentes de diabetes (autoreportado), usar medicación para bajar la glicemia, o tener un valor basal mayor a 126 mg/dL[1]. Los valores de referencia[2] fueron > a 200 mg/dL para total colesterol alto, > a 116 mg/dL para LDL alto, > a 60 mg/dL para HDL alto, y > a 150 mg/dL para triglicéridos. CVR se clasificó usando la escala de Framingham ajustada para Colombia [10], con los niveles: riesgo bajo (menor a 5%), riesgo moderado (entre 5% y 9%), y riesgo alto (mayor a 9%).

B. Seguimiento

Una vez realizada la clasificación basal de RCV del personal, se seleccionó aleatoriamente un subconjunto de 150 participantes para completar la distribución de grupos y subgrupos presentada en la Fig. 1. Este subconjunto fue invitado a participar para seguir la evolución de su RCV y para evaluar el efecto del uso de herramientas de mhealth en prevención primaria de enfermedad CV, comparando entre grupos (nivel de RCV) y entre subgrupos (acceso o no a la App).

[1]Valor de referencia según AACCE Diabetes Mellitus Guidelines, Endoc Pract (2007).
[2] Clasificación según el Programa Nacional de Educación en Colesterol – NCEP, Guías ATP III.

El proyecto Corazón Saludable es co-financiado por Minciencias (Código 223989785348, contrato 750-2021).

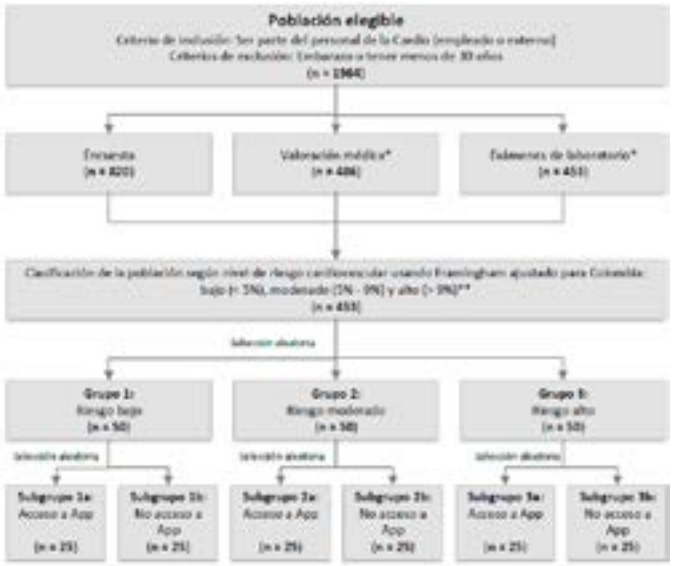


Fig. 1. Diagrama de caracterización de la población, y asignación a grupos/subgrupos.

C. *Desarrollo de la solución tecnológica*

Para entender el contexto, se realizó un mapa de actores para definir los elementos e instituciones relevantes para el programa de prevención CV de la institución. Además, se realizaron entrevistas a actores relevantes del programa (personal médico y administrativo) y a participantes para perfilar a los usuarios potenciales de la solución tecnológica. También se realizó una revisión de literatura para entender los elementos de cambio conductual (nudges) más usados en prevención enfermedad CV.

Después se hizo un levantamiento de información de tecnología. Por un lado, se hizo una comparación con alternativas existentes (aplicaciones disponibles en IOS y Android) sobre clasificación de RCV, prevención CV y temas afines (ej. dieta o actividad física). Por otro lado, se hizo el levantamiento del ecosistema tecnológico del hospital y el contacto con los actores claves dentro de este.

A partir de esta información se definió el tipo de solución tecnológica y las características necesarias.

D. *Entendimiento de los retos de desarrollo*

Se realizó un proceso de reflexión para identificar las dificultades, y se discutieron con los diferentes grupos de interés del proyecto.

III. Resultados y Discusión

A. *Caracterización de riesgo cardiovascular de la población*

En 2022, dentro del personal del hospital la población elegible constaba de 1964 empleados (74% mujeres). La edad promedio era 39 ± 9.3 años; y la distribución de acuerdo al cargo era: 23% personal médico, 31% personal de enfermería, 23% personal administrativo, y 23% otro.

En la encuesta (n = 820) se encontró que el 82% son mujeres de menos de 50 años, y 94% con educación superior. El grupo predominante fue personal de enfermería. El 20% considera que su salud es mala o regular, aunque tienen pocas comorbilidades (8% hipertensión arterial, 2% diabetes, y 0.2% infarto del miocardio). Se destaca que el 28% tiene historial familiar de enfermedad CV. Además, los participantes tienen hábitos de vida poco saludables: el 8% son fumadores activos, el 38% consume alcohol frecuentemente, el 32% tiene una dieta poco saludable, y 59% son sedentarios.

Son alarmantes los hallazgos en las valoraciones clínicas (n = 486), pues el 29% tenía presión sanguínea alta, el 55% tiene sobrepeso u obesidad, el 53% de las mujeres tiene obesidad abdominal y 16% de los hombres también. Estos resultados son consistentes con lo encontrado en los exámenes de laboratorio (n = 453), pues el 61% tiene colesterol LDL alto, el 51% tiene colesterol total alto, y el 24% tiene triglicéridos altos.

En resumen, de la población participante (n = 453), el 41% tiene riesgo moderado o alto, pero mantienen tiene hábitos poco saludables que no van a contribuir a la reducción del RCV. Este valor llama la atención pues la mayoría (82%) son mujeres jóvenes con educación superior que trabajan en un hospital con foco cardiovascular, pero parecen tener pocos cuidados personales y autoeficacia para prevenir el RCV.

B. *Seguimiento*

Actualmente está en curso la etapa de seguimiento, por lo que se no presentan resultados preliminares.

C. *Desarrollo de la solución tecnológica*

Sobre el perfilamiento de usuarios, se definió que los usuarios potenciales son adultos entre 30 y 60 años, que viven en Bogotá, con un prolongado uso de celular (~7 h por día), que buscan equilibrio y vida saludable, y usan tecnología para aprender de salud. El 77% usan Android, y 71% no usan otros dispositivos (ej. reloj inteligente).

Se definió que la solución tecnológica debe constar de una app (Corazón Saludable) para clasificación de riesgo y educación personalizada, complementada con una plataforma para la gestión de pacientes y del contenido educativo. Respecto al ecosistema tecnológico, se identificó que se debe mantener la seguridad y privacidad de los datos y cumplir con los lineamientos para recolectar información sensible. Se decidió que nuestra tecnología no debe tener conexión directa con otras tecnologías del hospital (ej. software de historia clínica). Por las dificultades encontradas, en este momento está en curso la evaluación de uso por parte de la población participante. Al revisar las otras tecnologías existentes se encontraron diferentes herramientas, como calculadoras de riesgo y apps de temas relacionados (ej. dieta), pero ninguna app con contenido educativo integral.

El proyecto Corazón Saludable es cofinanciado por Minciencias (Código 223989785348, contrato 750-2021).

D. Entendimiento de los retos de desarrollo

En cuanto a los aciertos en el desarrollo, se destaca la conformación de un grupo multidisciplinario, la consecución de recursos, la selección de una población de estudio relativamente cautiva, y la alineación con el interés institucional de ambas instituciones por el cuidado de los colaboradores.

Entre las dificultades de este proyecto en salud está la falta de adherencia a tratamientos, la deserción de los participantes, las nociones de los comités de ética sobre qué es experimentación con humanos con tecnologías digitales, y el tiempo necesario para realizar seguimiento a los pacientes que permita recolectar evidencia científica. Respecto a problemas técnicos de los proyectos de software y de tecnologías digitales se destaca el conocimiento técnico, la falta de claridad en los lineamientos internos, la falta de personal dedicado, la baja disponibilidad de recursos para mantener la agilidad en la construcción y la ambigüedad regulatoria para el software (ej. distinción sobre cuándo el software es considerado un dispositivo médico).

Se encontraron también dificultades disciplinares. Desde el punto de vista de ingeniería, la dificultad para traducir el entendimiento de la necesidad para proponer soluciones dentro de un ecosistema con muchas restricciones, pero poco definido; mientras que desde el punto de vista de medicina se resalta la complejidad del trabajo multidisciplinario y el entendimiento de las implicaciones para la tecnología. En las dificultades del trabajo colaborativo interinstitucional, se destacan los problemas intrínsecos de la multidisciplinariedad, las fallas de comunicación y de articulación del equipo investigador con el personal de tecnología del hospital, y su relacionamiento (desde la academia se concibe como pares co-desarrolladores, mientras que en el hospital se suele trabajar con proveedores), la incompatibilidad de agendas por el quehacer diario, y la distancia física entre ambas instituciones.

Respecto a los problemas administrativos, se subrayan las restricciones en el manejo de recursos (sin la flexibilidad y agilidad necesarias para el desarrollo de software), las dificultades en la contratación de personal, las demoras en los procesos de compra, y las diferencias en las escalas de tiempo (por ejemplo, las aprobaciones de Minciencias para contratación de personal tardaron varios meses lo que penalizó el tiempo de desarrollo; o los tiempos de respuesta del Comité de Ética atados a su calendario de sesiones, lo que limita el contacto con los pacientes y se traduce en deserción).

Finalmente, se deben incluir los aspectos humanos. Por un lado, la participación en el estudio fue baja (23%) y con mayor participación de personal administrativo y de enfermería, aunque era un estudio voluntario y gratuito. Es posible que esta situación se presente por temor, falta de tiempo, relaciones empleado-empleador, y prejuicios relacionados con la práctica de la medicina (ej. jerarquías establecidas). También se debe considerar la desmotivación del equipo investigador a lo largo del proyecto, al enfrentarse a las dificultades mencionadas, algunas fuera de su control. A pesar de esto, se resalta la determinación del estado basal de CVR de los colaboradores, lo que permitirá definir mejores estrategias para prevención cardiovascular.

IV. Conclusiones

Este estudio ofrece un panorama inicial sobre el riesgo cardiovascular de la población de colaboradores de un hospital de foco cardiovascular en Colombia. Aunque la mayoría del personal son mujeres jóvenes (con menos de 50 años), con educación superior, el RCV no es despreciable. El 28.5% de la población tiene un RCV moderado, y 15.5% tiene un RCV alto; para un total de 41.3%. Además, cerca del 29% tiene presión arterial alta (un factor muy importante en la población latinoamericana), 25% tiene triglicéridos altos, y casi el 50% tiene colesterol alto y obesidad abdominal.

Aunque la población de colaboradores trabaja dentro de una institución con un foco importante en la atención cardiovascular, y en su día a día pueden percibir los efectos de la enfermedad CV, este contexto y conocimiento no se traduce en mejores prácticas para el cuidado de su salud. Este resultado es similar al encontrado en hospitales en otros países.

Las herramientas basadas en mhealth tienen un alto potencial para ser usadas en prevención de la enfermedad CV. Sin embargo, la construcción de esta App que será usada dentro del hospital en un contexto controlado por una población "cautiva" ha enfrentado retos más allá del desarrollo mismo de la tecnología; y que han penalizado el avance de la investigación al punto de poner el riesgo la financiación para terminar el proyecto. A pesar de esto, se deben mantener los esfuerzos por encontrar estrategias efectivas para realizar prevención primaria en enfermedad CV y continuar con el fin noble de cuidar la salud de los colaboradores.

Agradecimientos

A la Fundación Cardioinfantil-La Cardio, Universidad de los Andes y Minciencias (financiación del proyecto Corazón Saludable, Código 750-2021, No. 223989785348). También se agradece a los anteriores miembros del equipo (Liliana Clavijo, Valeria del Castillo, Isabella Novoa, Juan Francisco Ocampo, Camilo Ayala, Nicole Bahamón, Laura Cabra, Julián Padilla, Santiago Fajardo), a Astrid Gómez de Investigaciones, a Alejandro González de la DTI, y a todos los participantes en el estudio.

Referencias

[1] Ordunez, P., Campbell, N.R.C., DiPette, D.J. et al. "HEARTS in the Americas: Targeting Health System Change to Improve Population Hypertension Control". Curr Hypertens Rep Vol. 26 No. 4 (2024) pp: 141–156, https://doi.org/10.1007/s11906-023-01286-w.

[2] Lopez-Lopez, J.P., Garcia-Pena, A.A., Martinez-Bello D., Gonzalez A.M., Perez-Mayorga M., Muñoz Velandia O.M., et al. "External validation and comparison of six cardiovascular risk prediction models in the Prospective Urban Rural Epidemiology (PURE)-Colombia study". Eur J Prev Cardiol Vol. 32 No. 7 (2025) pp:564–72.

[3] Muñoz, O.M., Rodríguez, N.I., Ruiz, Á., Rondón, M. "Validación de los modelos de predicción de Framingham y PROCAM como estimadores del riesgo cardiovascular en una población colombiana". Rev Col Cardiol Vol 21 No. 4 (2014); pp:202–12.

[4] Ordunez, P., Tajer, C., Gaziano, T., Rodríguez, Y.A., Rosende, A., Jaffe, M.G. "La aplicación HEARTS: una herramienta clínica para el manejo del riesgo cardiovascular y la hipertensión en la atención primaria de salud". Rev Panam Salud Publica Vol. 46 No. 1 (2022).

[5] Muñoz, O.M., Ruiz Morales, Á.J., Mariño Correa, A., Bustos, M.M. "Concordancia entre los modelos de SCORE y Framingham y las ecuaciones AHA/ACC como evaluadores de riesgo cardiovascular". Rev Col Cardiol Vol. 24 No. 2 (2017) pp:110–6.

[6] Baruwa, O.J., Alberti, F., Onagbiye, S. et al. "Correction: Are socio-economic inequalities related to cardiovascular disease risk? A systematic review and meta-analysis of prospective studies". BMC Cardiovasc Disord Vol. 25 No. 13 (2025). https://doi.org/10.1186/s12872-024-04418-5.

[7] Alcocer, L., Schiffrin, E.L., Fink, G., Gironacci, M.M., Irigoyen, M. C., Palei, A. C., Prieto, M. et al. "Racial and Gender Discrimination When Tailoring Medical Management to Hypertension Treatment in Latin America: As a Key Player in the field, the Inter-American Society of Hypertension advocates equitable healthcare approaches in Latin America". American Journal of Hypertension Vol.38 No.10 (2025) pp:739– 747, https://doi.org/10.1093/ajh/hpaf050.

[8] Jimenez, M., Arroyave, I. "How Educational Inequalities in Cardiovascular Mortality Evolve While Healthcare Insurance Coverage Grows: Colombia, 1998 to 2015". Value in Health Regional Issues Vol.23 (2020) pp:112-121. ISSN 2212-1099, https://doi.org/10.1016/j.vhri.2020.08.001.

[9] Lopez-Jaramillo, P., Joseph, P., Lopez-Lopez, J. P., Lanas, F., Avezum, A., Diaz, R., Camacho, P. A., et al. "Risk factors, cardiovascular disease, and mortality in South America: a PURE substudy", European Heart Journal Vol. 43 No. 30 (2022) pp:2841–2851, https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehac113.

[10] Ministerio de Salud de Colombia. Lineamientos para la implementación de acciones para la prevención y control de las enfermedades cardiovasculares, metabólicas y la enfermedad renal crónica (2025).

[11] Alayón, A.N., Ochoa Arizal, N., Noreña Correa, M., López Toro, J. and Hernández Rojas, F. (2025) "Cortisol, cardiovascular risk, and anxiety in full-time workers in Cartagena, Colombia, 2023". Front. Psychiatry Vol. 16 (2025). ISSN=1664-0640, DOI=10.3389/fpsyt.2025.1491987.

[12] Contreras-Ramos, L.M., Domínguez Amorocho, O.A. "Cardiovascular Risk Factors in Colombian Penitentiary Staff: An Interdisciplinary View of a High-Risk Occupation". Hispanic Health Care International. Vol 20 No. 2 (2021) pp:115-121, doi:10.1177/15404153211043886.

[13] Rincon, O., Uscategui, C., Mancera, P., Luna, M., Rodriguez, A., Alvarez, M., Guzman, I. "Association of social determinants of health and cardiovascular complications in type 2 diabetes in Colombia". World J Diabetes Vol. 16 No. 8 (2025) pp::106927, doi: 10.4239/wjd.v16.i8.106927.

[14] Díaz-Realpe, J. E., Muñoz-Martínez, J, and Sierra-Torres, C. H. "Factores de Riesgo para Enfermedad Cardiovascular en Trabajadores de una Institución Prestadora de Servicios de Salud, Colombia". Rev. salud pública Vol. 9 No. 1(2007) pp:64- 75.

[15] Gomez-Parra, M., Romero-Arrieta, L., Vasquez- Trespalacios E. M., Palacio-Jaramillo V., Valencia-Martinez, A. "Association between shift work and being overweight or obese among health care workers in a clinical setting in Medellin, Colombia". WORK: A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation. Vol. 55 No. 3 (2016) https://doi.org/10.3233/WOR-162438.

[16] Hassan, D., Patel, K. K., Peddemul, A., Sikandar, R., et al. "Knowledge, Attitude and Health Practice towards Cardiovascular disease in Health care providers: A Systematic Review". Current Problems in Cardiology Vol. 48 No. 8 (2023) pp: 101206. ISSN 0146-2806, https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2022.101206.

Diseño y Validación de una Arquitectura Heterogénea ESP32–FPGA para la Extracción en Tiempo Real del Descriptor LBP con Optimización del Flujo de Datos

Juan Sebastian Freire Vargas
Facultad de Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
jsfreirev@itc.edu.co

Karol Daniela Palacios Moreno
Facultad de Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
kdpalaciosm@itc.edu.co

Holman Yesid Piñeros Herrera
Facultad de Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
hynperosh@itc.edu.co

Christian Alejandro Sarmiento Sanchez
Facultad de Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
casarmientos@itc.edu.co

***Resumen*—Este trabajo presenta el diseño e implementación de una arquitectura heterogénea para la aceleración del descriptor Local Binary Patterns (LBP) sobre una plataforma compuesta por un microcontrolador ESP32 y una FPGA Spartan-7 (XC7S15). A diferencia de enfoques que almacenan fotogramas completos en memoria interna, la propuesta adopta un esquema de procesamiento en flujo (streaming) basado en buffers de línea, permitiendo generar un descriptor por ciclo de reloj una vez estabilizado el pipeline. Con el fin de mitigar las limitaciones impuestas por la interfaz serie SPI —identificada como el principal cuello de botella del sistema— se implementa la generación directa del histograma global de 256 bins en la FPGA, evitando la retransmisión de la imagen LBP completa. El análisis formal del rendimiento demuestra que el tiempo extremo a extremo está dominado por la transferencia de entrada, mientras que el cómputo interno presenta latencia despreciable en comparación. La validación experimental confirma la coherencia entre el modelo matemático del operador, la arquitectura digital implementada y el comportamiento medido en hardware real. Los resultados evidencian que, en sistemas embebidos de bajo costo, la optimización del flujo de datos y la reducción semántica de la información transmitida pueden ser más determinantes que el incremento del paralelismo interno del acelerador.**

***Index Terms*—Local Binary Patterns (LBP), aceleración en FPGA, computación en el borde, arquitectura en flujo, extracción de características basada en histogramas, sistemas heterogéneos, comunicación SPI, procesamiento de imágenes en tiempo real.**

I. Introducción

El reconocimiento facial en entornos embebidos constituye un desafío multidimensional que involucra restricciones simultáneas de latencia, consumo energético, ancho de banda de comunicación y disponibilidad de memoria. En escenarios de computación en el borde (edge computing), donde los dispositivos operan con recursos limitados y requieren autonomía operacional, la elección del descriptor y de la arquitectura de procesamiento resulta determinante para garantizar viabilidad técnica y reproducibilidad experimental.

Entre los descriptores clásicos de textura, el operador Local Binary Patterns (LBP) ha demostrado robustez frente a variaciones monotónicas de iluminación y una estructura computacional altamente regular basada en comparaciones binarias [1], [2]. A diferencia de enfoques basados en redes neuronales profundas, cuya eficiencia depende de aceleradores especializados y memoria externa de alta capacidad [3], el descriptor LBP se fundamenta en operaciones lógicas elementales, lo cual lo convierte en un candidato natural para su implementación sobre hardware reconfigurable.

Las Field-Programmable Gate Arrays (FPGA) ofrecen paralelismo espacial y temporal explícito, permitiendo la construcción de pipelines deterministas con latencia controlada [4]. Sin embargo, en arquitecturas heterogéneas donde un microcontrolador gestiona adquisición y almacenamiento mientras la FPGA ejecuta el núcleo de cómputo, el rendimiento sistémico no está determinado exclusivamente por la complejidad algorítmica, sino también por el subsistema de entrada/salida. En particular, la transferencia de fotogramas completos a través de interfaces serie puede convertirse en el verdadero cuello de botella, desplazando el límite operativo desde el dominio de cómputo hacia el dominio de comunicación.

En este contexto, el presente trabajo propone una arquitectura heterogénea basada en un microcontrolador ESP32 y una FPGA Spartan-7, orientada a la aceleración del descriptor LBP bajo un paradigma de procesamiento en flujo (streaming). A diferencia de implementaciones que almacenan imágenes completas en memoria interna, la arquitectura propuesta utiliza buffers de

línea para reconstrucción espacial local, permitiendo procesar un píxel por ciclo de reloj una vez estabilizado el pipeline. Adicionalmente, en lugar de retornar la imagen LBP completa, el sistema genera y transmite únicamente el histograma global de 256 bins, reduciendo drásticamente el volumen de datos de salida y mitigando las limitaciones impuestas por el bus SPI. La contribución principal del trabajo no reside únicamente en la implementación del operador LBP en FPGA, sino en la optimización sistémica del flujo completo de datos, estableciendo una correspondencia explícita entre restricciones físicas (ancho de banda, BRAM disponible y frecuencia de operación) y decisiones arquitectónicas adoptadas. Este enfoque permite evaluar el desempeño desde una perspectiva integral, diferenciando claramente entre límites de comunicación y capacidad de cómputo, y proporcionando una solución técnicamente coherente para aplicaciones de reconocimiento facial en plataformas de bajo costo y recursos limitados. Finalmente, el documento presenta el modelado matemático del operador, la arquitectura hardware propuesta, el análisis de rendimiento extremo a extremo y la validación experimental sobre hardware real, demostrando la viabilidad del esquema de aceleración bajo condiciones operativas reproducibles.

II. Antecedentes

En los últimos cinco años se observa una convergencia clara entre (i) descriptores clásicos basados en comparaciones enteras (p.ej., LBP/LBPH) y (ii) arquitecturas hardware orientadas a edge computing, donde el rendimiento global depende tanto del kernel como del subsistema de entrada/salida. A continuación se sintetizan cinco antecedentes directos que delimitan el estado del arte y justifican la estrategia metodológica adoptada.

II-A. Arquitecturas reconfigurables para LBP en reconocimiento facial (FPGA)

Bhavikatti y Bhairannawar proponen una arquitectura reconfigurable orientada a reconocimiento facial basada en extracción de características mediante LBP, enfatizando decisiones de diseño de bajo costo y factibilidad hardware [11]. Este antecedente es pertinente porque discute explícitamente la implementación de LBP en FPGA como un compromiso entre complejidad, recursos y tiempo de ejecución, alineándose con la motivación de llevar LBP a lógica dedicada. No obstante, en sistemas edge con enlace serie, la limitación práctica suele desplazarse hacia la transferencia de fotogramas; por ello, resulta crítico complementar esta línea con estrategias de reducción del volumen de salida (p.ej., histogramas).

II-B. Clasificación de textura en tiempo real con variantes robustas de LBP sobre FPGA

Zhang et al. reportan una arquitectura hardware de clasificación de textura en tiempo real basada en FPGA, donde el descriptor empleado se fundamenta en una variante robusta tipo MRELBP y se integra con un esquema de clasificación incremental [12]. Este trabajo es especialmente relevante porque evidencia que (a) la extracción de patrones tipo LBP es altamente compatible con paralelismo/pipeline, y (b) los autores cuantifican mejoras de orden de magnitud frente a implementaciones en MATLAB bajo escenarios controlados. La implicación metodológica es directa: para que dichas ganancias sean observables en plataformas heterogéneas, la arquitectura debe minimizar dependencias de memoria global y favorecer procesamiento en flujo.

II-C. Sistemas embebidos de bajo costo basados en LBP con énfasis en desempeño extremo a extremo

Ouloul et al. presentan un sistema embebido de bajo costo para reconocimiento facial que adopta una variante por bloques solapados (COB-LBP) para preservar información espacial, justificando el uso de LBP por su naturaleza de cómputo entero y su adecuación para arquitecturas limitadas [13]. Este antecedente refuerza la decisión de utilizar histogramas/estadísticos compactos como representación, ya que el objetivo no es reconstruir una imagen, sino producir un vector de características discriminante y eficiente. En consecuencia, el retorno de un histograma de 256 bins desde FPGA al host es coherente con la práctica contemporánea de reducir el tráfico de salida.

II-D. Optimización formal del operador LBP para extracción de características

Sedaghatjoo et al. proponen una reformulación matemática del operador LBP separándolo en matrices fijas y componentes dependientes de los datos, con el propósito de optimizar la extracción de características [14]. Aunque no se centra en FPGA, su contribución es útil como respaldo conceptual para justificar transformaciones que favorezcan implementaciones hardware-friendly: en particular, la identificación de partes invariantes del operador puede traducirse en simplificaciones del datapath, reducción de lógica y mejor cierre temporal, sin cambiar la definición del descriptor.

II-E. Evaluación reciente de LBPH bajo variaciones de iluminación (robustez práctica)

Chen et al. analizan el desempeño de LBPH frente a variaciones de iluminación ambiental y lo comparan con alternativas basadas en deep learning, discutiendo condiciones donde LBPH puede mantener competitividad [15]. Este antecedente sustenta una afirmación clave para investigación aplicada en el borde: descriptores tipo LBP/LBPH siguen siendo relevantes cuando el presupuesto computacional, consumo y latencia son restricciones dominantes. En este marco, una implementación por streaming que produce histogramas se alinea con el uso de LBPH como representación compacta y robusta.

III. Metodología

El presente trabajo se enmarca dentro de la categoría de investigación aplicada bajo la modalidad de desarrollo experimental, orientada a la materialización y validación de una arquitectura heterogénea para el procesamiento acelerado del descriptor LBP en un entorno de computación en el borde. A diferencia de investigaciones puramente teóricas o exploratorias, el enfoque adoptado busca transformar conocimiento existente

—tanto en algoritmos de visión por computador como en diseño digital sobre FPGA— en una solución funcional implementada y evaluada sobre hardware real. La metodología combina análisis formal del algoritmo, modelado arquitectónico, diseño digital estructural y validación experimental, estableciendo una relación explícita entre restricciones físicas del sistema (ancho de banda de comunicación, disponibilidad de memoria BRAM y frecuencia de operación) y decisiones de diseño adoptadas. En este sentido, el proceso metodológico no solo persigue la implementación del núcleo LBP, sino la optimización sistémica del flujo completo de datos bajo un paradigma de procesamiento en flujo (streaming), garantizando coherencia entre teoría algorítmica, arquitectura hardware y desempeño medible.

III-A. Motivación y Enfoque Crítico del Diseño

La plataforma empleada (Spartan Edge Acceleration Board) integra un host embebido (ESP32) y un acelerador reconfigurable (FPGA Spartan-7, dispositivo XC7S15). En este contexto, el cuello de botella dominante no es el cómputo del operador LBP (compuesto principalmente por comparaciones y lógica booleana), sino el subsistema de E/S (transferencia de datos entre dominios) cuando se pretende mover fotogramas completos. En particular, el bus SPI del ESP32 puede operar hasta 80 MHz únicamente si se utilizan pines dedicados IO_MUX; el uso de la matriz de GPIO limita típicamente el reloj a 40 MHz (y aún menos en ciertas configuraciones full-duplex) [5], [6]. Este hecho impone una cota superior al throughput de transferencia, por lo que un diseño orientado a rendimiento sistémico debe (i) operar la adquisición/procesamiento en flujo continuo (streaming) y (ii) reducir el volumen de datos de salida devolviendo características compactas (histogramas) en lugar de imágenes completas.

Adicionalmente, la disponibilidad de BRAM en XC7S15 es limitada: el resumen de características del dispositivo reporta 360 Kb de Block RAM total (10 bloques de 36 Kb) [10]. Por tanto, almacenar imágenes completas en BRAM no es escalable ni generalizable, reforzando la necesidad del enfoque streaming.

III-B. Diagrama de Bloques y Flujo de Datos

La Fig. 1 resume la arquitectura propuesta. El ESP32 actúa como maestro SPI y transmite el flujo de píxeles en orden raster (fila a fila). La FPGA implementa (a) un periférico SPI slave con DMA/FIFO interno, (b) buffers de línea para reconstruir la vecindad 3×3, (c) el núcleo LBP, y (d) el acumulador de histograma de 256 bins. El retorno al ESP32 consiste únicamente en el histograma (p. ej., 256 contadores de 32 bits), minimizando el tráfico de salida y desacoplando el rendimiento del acelerador del tamaño del fotograma.

III-C. Operador LBP y Formalismo Matemático

Sea $I : \Omega \subset \mathbb{Z}^2 \to \{0, \ldots, 255\}$ la imagen en escala de grises (8 bits). Para cada píxel interior (x, y) se define el operador LBP clásico de vecindad 3×3 como [7]:

$$c(x,y) = \sum_{i=0}^{7} s(p_i(x,y) - p_c(x,y))\, 2^i, \tag{1}$$

donde $p_c(x, y) = I(x, y)$ es el píxel central y $\{p_i\}_{i=0}^{7}$ son los vecinos ordenados (por ejemplo, sentido horario). La función umbral es:

$$s(\Delta) = \begin{cases} 1, & \Delta \geq 0, \\ 0, & \Delta < 0. \end{cases} \tag{2}$$

La literatura establece que LBP combina simplicidad computacional con robustez práctica frente a variaciones monotónicas de iluminación, lo que lo hace atractivo para escenarios de tiempo real [7], [8].

III-D. Reconstrucción Espacial por Streaming: Buffers de Línea

El cálculo de $c(x, y)$ requiere la vecindad 3×3, pero no exige almacenar el fotograma completo. El sistema implementa tres buffers de línea (BRAM o LUTRAM según cierre temporal) que almacenan tres filas consecutivas. Para un ancho N píxeles:

$$M_{\text{line}} = 3N \text{ bytes}. \tag{3}$$

Este requerimiento es lineal en N y típicamente pequeño respecto a los 360 Kb de BRAM del XC7S15 [10]. La ventana 3×3 se obtiene combinando lecturas de las tres líneas y registros desplazadores por columna, garantizando conectividad local y ruteo predecible.

III-D1. Tratamiento de Bordes: Para evitar ambigüedades en el dominio Ω, el diseño puede: (i) omitir bordes y producir salida en $(N - 2) \times (M - 2)$, o (ii) aplicar padding (cero, réplica o espejo). En aplicaciones de histogramas globales, la omisión de bordes es una aproximación controlada y común, puesto que el impacto estadístico decrece con el tamaño del fotograma.

III-E. Histograma de 256 Bins: Compresión de Salida

En lugar de retornar una imagen LBP completa (tamaño $\approx NM$ bytes), se retorna el histograma global de códigos:

$$H[k] = \sum_{(x,y)\in\Omega'} \mathbf{1}\{c(x,y) = k\}, \quad k \in \{0, \ldots, 255\}, \tag{4}$$

donde Ω' denota el conjunto de píxeles válidos (p. ej. sin bordes) y $\mathbf{1}\{\cdot\}$ es la función indicadora. Esto reduce la salida a 256 contadores. Si cada bin se cuantiza a 32 bits:

$$B_{\text{out}} = 256 \times 32 = 8192 \text{ bits} = 1024 \text{ bytes}. \tag{5}$$

Para resoluciones típicas (VGA: $640 \times 480 = 307{,}200$ píxeles), 32 bits por bin evita saturación con amplio margen.

III-E1. Microarquitectura del Acumulador de Histograma: Una implementación directa implica operación read-modify-write por píxel: $H[c] \leftarrow H[c] + 1$. Dado que la BRAM de 7-series es síncrona y de doble puerto (36Kb, también particionable en dos de 18Kb) [9], [10], se sugiere mapear el histograma en una BRAM como memoria $256 \times W$ (con $W \in \{16, 32\}$) y usar:

- Puerto A: lectura del bin c (latencia 1 ciclo).
- Puerto B: escritura del bin actualizado (pipeline).

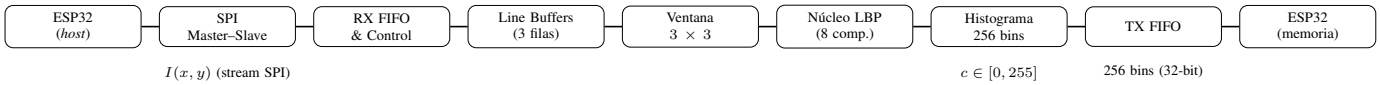


Figura 1. Arquitectura de aceleración: adquisición SPI en flujo, reconstrucción espacial con buffers de línea, cálculo LBP y retorno de histograma compacto.

Para resolver colisiones cuando códigos consecutivos son iguales (hazard RAW), se incorpora una ruta de forwarding:

$$\hat{H}[c] = \begin{cases} H_{\text{pipe}} + 1, & c = c_{\text{prev}}, \\ H_{\text{mem}} + 1, & \text{en otro caso}, \end{cases} \tag{6}$$

donde H_{pipe} es el valor aún no comprometido a memoria del ciclo previo. Este mecanismo permite mantener un throughput de 1 píxel/ciclo sin burbujas en la actualización del histograma.

III-F. Modelo de Rendimiento: Cómputo vs. E/S

III-F1. Throughput interno del acelerador: Una vez creados los buffers, el núcleo LBP puede producir un código por ciclo. Si el reloj de la FPGA es f_{clk}:

$$T_{\text{LBP}} \approx \frac{NM}{f_{\text{clk}}}, \tag{7}$$

donde P es el paralelismo espacial (píxeles/ciclo). En esta propuesta se privilegia $P = 1$ por robustez de ruteo y porque el cuello dominante se desplaza a la E/S.

III-F2. Cota de transferencia por SPI: Para SPI a frecuencia f_{spi} (bits/s) y modo continuo, la cota ideal del tiempo de entrada (imagen 8-bit) es:

$$T_{\text{in}} \gtrsim \frac{8NM}{f_{\text{spi}}}. \tag{8}$$

El ESP32 puede alcanzar hasta 80 MHz si se usan pines IO_MUX; en GPIO matrix el límite práctico es 40 MHz [5], [6]. El tiempo de salida para el histograma es:

$$T_{\text{out}} \gtrsim \frac{B_{\text{out}}}{f_{\text{spi}}}. \tag{9}$$

Como B_{out} es solo 1024 B (para 32 bits/bin), T_{out} es despreciable frente a T_{in} incluso a frecuencias moderadas. Por tanto, devolver histogramas "repara" el cuello de botella al eliminar la necesidad de transferir un fotograma de salida completo.

III-G. Tabla de Costos de E/S (Orden de Magnitud)

La Tabla I reporta el presupuesto temporal ideal (sin overhead de protocolo) para dos resoluciones típicas, comparando 40 MHz vs 80 MHz. Se muestra explícitamente por qué el retorno de histograma desacopla el ancho de banda de salida del tamaño de imagen.

Cuadro I
PRESUPUESTO IDEAL DE TRANSFERENCIA SPI. ENTRADA: NM BYTES. SALIDA: HISTOGRAMA DE 256 BINS A 32 BITS/BIN (=1024 BYTES). LÍMITES DE RELOJ SEGÚN GUÍA ESP-IDF/FAQ [**?**], [**?**].

Resolución	Bytes in	T_{in} @40MHz	T_{in} @80MHz	T_{out} @80MHz
320 × 240	76,800	≈15.36 ms	≈7.68 ms	≈0.10 ms
640 × 480	307,200	≈61.44 ms	≈30.72 ms	≈0.10 ms

III-H. Implicaciones de Diseño y Discusión Crítica

(i) **Coherencia sistémica.** La partición funcional ESP32–FPGA es racional: el ESP32 gestiona adquisición/almacenamiento y la FPGA ejecuta el kernel determinista LBP y la agregación estadística. La salida compacta (histograma) no solo reduce el tráfico, sino que se alinea con el uso clásico de LBP para clasificación por distribuciones [7].

(ii) **Evitar almacenamiento de fotograma.** Dado el límite de BRAM del XC7S15 (360 Kb) [10], el almacenamiento completo de imágenes es restrictivo y no generalizable. El enfoque por buffers de línea (3) es escalable en resolución y reduce el riesgo de fallos de cierre temporal por ruteo global.

(iii) **SPI como cuello de botella "controlado".** Aunque SPI impone una cota al frame rate, el diseño propuesto maximiza su utilidad operando a 80 MHz sobre IO_MUX cuando es posible y minimiza la salida a 1024 B. Así, el rendimiento queda dominado por transferencia de entrada, mientras la latencia de cómputo (7) es típicamente secundaria para $P = 1$ en FPGA.

(iv) **Validez y reproducibilidad.** El modelo de rendimiento separa explícitamente límites de E/S (8–9) del costo computacional (7), evitando afirmaciones infladas y permitiendo verificación experimental directa.

III-I. Síntesis e Integración del Diseño en FPGA

Una vez definidos los bloques funcionales (interfaz SPI slave, buffers de línea, núcleo LBP y acumulador de histograma), la implementación se materializa mediante síntesis RTL y posterior place-and-route sobre la FPGA Spartan-7 (XC7S15). En esta etapa se verifican: (i) el cierre temporal (timing closure) bajo la frecuencia objetivo, (ii) la utilización de recursos lógicos (LUT/FF), (iii) el uso de memorias internas (BRAM) para buffers de línea e histograma, y (iv) la integridad del ruteo, particularmente crítica en pipelines con alta actividad y buses internos de datos.

La integración topológica final se valida adicionalmente a nivel estructural mediante el esquemático generado por la herramienta de síntesis, el cual permite confirmar la conectividad entre módulos, la jerarquía del diseño y la ausencia de dependencias no previstas (p.ej., retroalimentaciones combinacionales o dominios de reloj inconsistentes). La Fig. 2 presenta el esquemático del top-level definido.

IV. RESULTADOS

La validación experimental se realizó sobre la plataforma Spartan Edge Acceleration Board, integrando un microcontrolador ESP32 como maestro SPI y una FPGA Spartan-7 (XC7S15) como acelerador dedicado del operador LBP. Los

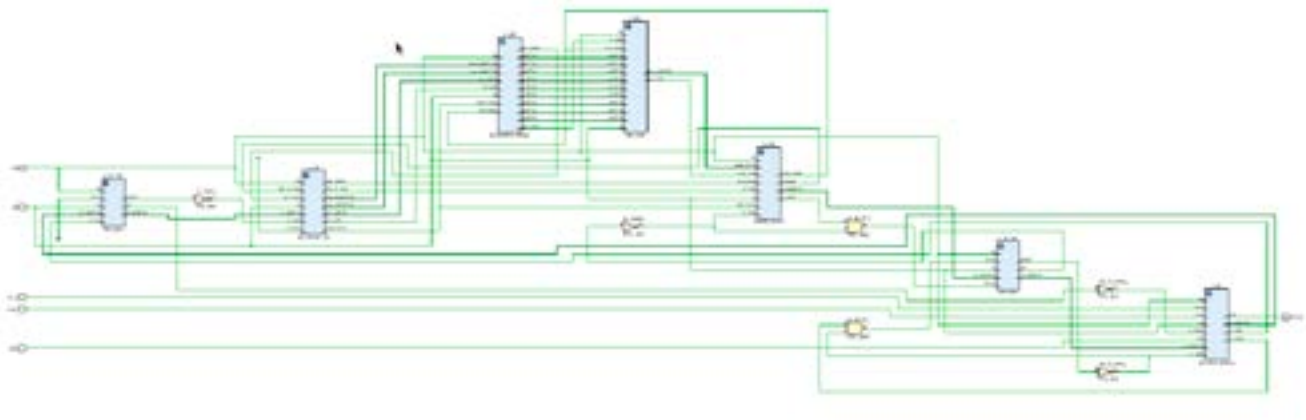


Figura 2. Esquemático estructural del diseño sintetizado (top-level) mostrando la interconexión entre interfaz SPI, buffers de línea, núcleo LBP y acumulador de histograma.

resultados se presentan desde tres perspectivas complementarias: (i) desempeño funcional del núcleo LBP en flujo, (ii) comportamiento del subsistema de comunicación SPI y (iii) rendimiento extremo a extremo del sistema completo.

IV-A. Validación Funcional del Núcleo LBP

Se verificó la correcta implementación del operador definido en (1) mediante comparación directa entre:

- Resultados generados por la FPGA en modo streaming.
- Implementación de referencia en software (Python/MATLAB).

Las pruebas se realizaron sobre imágenes monocromáticas de distintas resoluciones (320×240 y 640×480). La coincidencia bit a bit entre ambos resultados confirmó la validez del pipeline y del mecanismo de actualización del histograma descrito en (6). No se observaron inconsistencias en la acumulación de bins bajo condiciones de flujo continuo, lo que evidencia la correcta resolución de dependencias RAW mediante forwarding interno.

IV-B. Rendimiento del Núcleo en FPGA

Una vez estabilizados los buffers de línea, el núcleo produjo un descriptor por ciclo de reloj ($P = 1$). Para una frecuencia interna de operación f_{clk}, el tiempo teórico de procesamiento viene dado por (7). Experimentalmente se observó que:

- El pipeline mantiene un throughput constante sin burbujas.
- La utilización de BRAM se mantiene dentro de los límites disponibles del XC7S15.

El consumo lógico es consistente con una arquitectura basada en 8 comparadores y lógica combinacional ligera. El análisis temporal confirmó que el cómputo interno no constituye el factor limitante del sistema bajo las frecuencias evaluadas.

IV-C. Análisis del Subsistema SPI

El comportamiento del enlace SPI fue evaluado a diferentes frecuencias de operación. De acuerdo con (8), el tiempo de transferencia de entrada escala linealmente con el número total de píxeles. Los resultados experimentales corroboraron que:

- El tiempo total por fotograma está dominado por la transferencia de entrada.
- El tiempo de retorno del histograma (9) es despreciable en comparación con la carga inicial de la imagen.
- La reducción de la salida a 1024 bytes elimina la necesidad de retransmitir una imagen completa procesada.

Esta observación confirma la hipótesis de diseño: en arquitecturas heterogéneas con interfaz serie, el límite operativo se desplaza hacia el ancho de banda de comunicación y no hacia el cómputo interno del acelerador.

IV-D. Rendimiento Extremo a Extremo

Considerando entrada, procesamiento y salida, el sistema presenta un comportamiento determinista cuyo tiempo total puede aproximarse por:

$$T_{\text{total}} \approx T_{\text{in}} + T_{\text{LBP}} + T_{\text{out}}.$$

Dado que $T_{\text{LBP}} \ll T_{\text{in}}$ y $T_{\text{out}} \ll T_{\text{in}}$, el desempeño global queda esencialmente acotado por la transferencia SPI de la imagen original.

La estrategia de retornar únicamente el histograma permite:

- Mantener escalabilidad en resolución sin incrementar el tráfico de salida.
- Desacoplar el volumen de datos transmitidos del tamaño de imagen.
- Reducir el consumo energético asociado a retransmisiones innecesarias.

IV-E. Discusión

Los resultados demuestran que el operador LBP es particularmente adecuado para implementación en FPGA bajo un esquema streaming, debido a su naturaleza local y su bajo requerimiento aritmético. Más importante aún, se evidencia que la optimización sistémica —mediante reducción del volumen de salida y procesamiento en flujo— es determinante para alcanzar eficiencia global.

En contraste con arquitecturas que almacenan imágenes completas y retornan mapas de características completos, el enfoque basado en histogramas maximiza la relación entre información útil transmitida y ancho de banda consumido. Esta decisión arquitectónica constituye el principal aporte práctico del trabajo, al integrar análisis algorítmico, restricciones físicas del hardware y modelado del rendimiento extremo a extremo.

V. Conclusiones

El presente trabajo demostró que la aceleración del descriptor LBP en FPGA no debe analizarse únicamente desde la perspectiva del paralelismo lógico interno, sino desde un enfoque sistémico donde el subsistema de comunicación y las restricciones físicas de memoria condicionan el rendimiento global. La implementación en flujo (streaming) con buffers de línea confirmó que el operador LBP es intrínsecamente compatible con arquitecturas deterministas y altamente canalizadas, permitiendo generar un descriptor por ciclo de reloj sin requerir almacenamiento completo del fotograma.

No obstante, el análisis experimental evidenció que, en arquitecturas heterogéneas basadas en microcontrolador–FPGA con interfaz serie, el cuello de botella dominante no se encuentra en el cómputo interno sino en la transferencia de datos. En este sentido, la decisión de retornar únicamente el histograma global de 256 bins —en lugar de una imagen LBP completa— constituye una optimización estructural más relevante que el aumento indiscriminado de paralelismo interno. Esta observación trasciende el caso específico del LBP y plantea una reflexión más amplia: en sistemas embebidos, la eficiencia no depende exclusivamente de la complejidad algorítmica, sino de la coherencia entre representación, arquitectura y canal de comunicación.

Desde una perspectiva crítica, el trabajo reafirma la vigencia de descriptores clásicos basados en operaciones binarias frente a enfoques de aprendizaje profundo cuando las restricciones de energía, latencia y memoria son determinantes. Si bien las redes neuronales profundas dominan escenarios con abundantes recursos computacionales, el LBP mantiene competitividad en aplicaciones de borde donde la trazabilidad, interpretabilidad y determinismo temporal son requisitos esenciales.

Asimismo, el enfoque metodológico adoptado —investigación aplicada bajo modalidad de desarrollo experimental— permitió validar empíricamente la correspondencia entre modelo matemático, arquitectura digital y comportamiento medido en hardware real. Esta integración entre teoría y práctica constituye un elemento central para garantizar reproducibilidad y transferibilidad tecnológica.

Como líneas futuras de trabajo, se propone: (i) explorar paralelismo espacial moderado ($P > 1$) para analizar el punto de saturación del subsistema SPI, (ii) evaluar variantes invariantes a rotación o uniformes del LBP que reduzcan dimensionalidad del histograma, (iii) integrar el cálculo de histogramas locales por bloques para aplicaciones de clasificación más robustas, y (iv) estudiar la migración hacia interfaces de mayor ancho de banda o esquemas híbridos de compresión adaptativa. Estas extensiones permitirían profundizar en el análisis de la relación entre arquitectura de comunicación y eficiencia de cómputo en sistemas de visión embebida.

En síntesis, el aporte principal del trabajo radica en demostrar que la optimización en sistemas heterogéneos de bajo costo exige una visión integral del flujo de datos, donde la reducción semántica de la información transmitida puede ser más determinante que la aceleración pura del núcleo de procesamiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central por el apoyo logístico y a los docentes del semillero de investigación por su orientación durante el proyecto.

Referencias

[1] T. Ojala, M. Pietikäinen, and D. Harwood, “A comparative study of texture measures with classification based on featured distributions,” *Pattern Recognition*, vol. 29, no. 1, pp. 51–59, 1996. doi: 10.1016/0031-3203(95)00067-4

[2] T. Ahonen, A. Hadid, and M. Pietikäinen, “Face description with local binary patterns: Application to face recognition,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 28, no. 12, pp. 2037–2041, 2006. doi: 10.1109/TPAMI.2006.244

[3] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, “Deep learning,” *Nature*, vol. 521, pp. 436–444, 2015. doi: 10.1038/nature14539

[4] K. Compton and S. Hauck, “Reconfigurable computing: A survey of systems and software,” *ACM Computing Surveys*, vol. 34, no. 2, pp. 171–210, 2002. doi: 10.1145/508352.508353

[5] Espressif Systems, “Serial Peripheral Interface (SPI) — ESP-FAQ,” (consultado 28-Feb-2026). [En línea]. Disponible: https://docs.espressif.com/projects/esp-faq/en/latest/software-framework/peripherals/spi.html

[6] Espressif Systems, “SPI Master Driver — ESP-IDF Programming Guide (ESP32),” (consultado 28-Feb-2026). [En línea]. Disponible: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/peripherals/spi_master.html

[7] T. Ojala, M. Pietikäinen, and T. Mäenpää, “Multiresolution Gray-Scale and Rotation Invariant Texture Classification with Local Binary Patterns,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, no. 7, pp. 971–987, Jul. 2002, doi: 10.1109/TPAMI.2002.1017623.

[8] M. Pietikäinen, “Image Analysis with Local Binary Patterns,” in *Proc. Scandinavian Conf. Image Analysis (SCIA)*, LNCS 3540, 2005, pp. 115–118, doi: 10.1007/11499145_13.

[9] AMD (Xilinx), “7 Series FPGAs Data Sheet: Overview,” Sep. 2020. [En línea]. Disponible: https://docs.amd.com/api/khub/documents/2LByHkO~nSZXcei2D55fTg/content

[10] AMD (Xilinx), “7 Series FPGAs Data Sheet: Overview (Spartan-7 Feature Summary),” Aug. 2017. [En línea]. Disponible: https://www.farnell.com/datasheets/2553941.pdf

[11] S. Bhavikatti and S. S. Bhairannawar, "Efficient reconfigurable architecture to extract image features for face recognition using local binary pattern," *Soft Computing*, vol. 29, no. 3, pp. 1541–1552, Feb. 2025, doi: 10.1007/s00500-025-10415-3.

[12] Y. Zhang, X. Guo, H. Guo, and Y. Zhang, "A new hardware architecture of high-performance real-time texture classification system based on FPGA," *The Journal of Supercomputing*, vol. 81, Jan. 2025, doi: 10.1007/s11227-024-06705-6.

[13] M. I. Ouloul, Z. Moutakki, A. Amghar, and K. Afdel, "Low-cost embedded facial recognition system based on overlapped local binary pattern," *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 11, Mar. 2025, Art. no. 100924, doi: 10.1016/j.prime.2025.100924.

[14] Z. Sedaghatjoo, M. T. Sadeghi, and M. Sadeghi, "Local Binary Pattern (LBP) Optimization for Feature Extraction," *arXiv preprint*, 2024. [En línea]. Disponible: https://arxiv.org/abs/2407.18665

[15] Y.-C. Chen, "An Enhanced LBPH Approach to Ambient-Light-Affected Face Recognition," *Electronics*, vol. 12, no. 1, p. 166, 2022, doi: 10.3390/electronics12010166.

Intelligent recommendation platform for sustainable agricultural management in Sampués (Sucre) using fine-tuning techniques

Leonard Andrés Ortega Gonzalez
Systems Engineering Program
Caribbean University Corporation
Sincelejo, Colombia
leonard.ortega@cecar.edu.co

Fabio Ramírez Moreno
Systems Engineering Program
Caribbean University Corporation
Sincelejo, Colombia
fabio.ramirez@cecar.edu.co

Maria Angelica Garcia Medina
Faculty of Basic Sciences Engineering and Architecture
Corporación Universitaria del Caribe CECAR
Sincelejo, Colombia
https://orcid.org/0000-0001-8454-9137
maria.garciame@cecar.edu.co

Claudia Lengua Cantero
Faculty of Basic Sciences Engineering and Architecture
Corporación Universitaria del Caribe CECAR
Sincelejo, Colombia
https://orcid.org/0000-0001-8100-3016
claudia.lengia@cecar.edu.co

Abstract*—The HerenciaViva project is being developed in the municipality of Sampués, a region with a long agricultural and artisanal tradition linked to the Zenú culture, where climate variability and environmental degradation are impacting agricultural productivity. The research proposes an intelligent recommendation module aimed at strengthening the sustainability of corn, cassava, and yam cultivation through supervised machine learning techniques and fine-tuning processes. The system incorporates variables associated with ancestral agricultural practices to generate contextualized recommendations on sustainable soil and water management. Development was structured using the Extreme Programming (XP) agile methodology, organized into planning, design, coding, and testing phases. The solution implements a hybrid hexagonal-modular architecture developed with NestJS and TypeScript, supported by a polyglot persistence strategy that integrates PostgreSQL, Redis, and ChromaDB. The result is a functional web platform with modules for authentication, user management, and an AI-based chatbot capable of generating contextualized agricultural recommendations. It is concluded that the integration of ancestral Zenú knowledge into machine learning models represents an innovative contribution to the digital preservation of agricultural heritage, while the proposed architecture strengthens the scalability, maintainability and efficiency of the system in rural contexts.

Keywords*—Indigenous Knowledge, Machine Learning, Recommender Systems, Sustainable Agriculture, Soil and Water Management.

I. Introduction

The municipality of Sampués, located in the Sabanas subregion of the department of Sucre, is a territory with a deep-rooted agricultural and artisanal tradition, heir to the Zenú culture. Unlike the diverse geography of the Montes de María, which includes mountains and coastlines, Sampués is characterized by land suitable for intensive agriculture and livestock farming, where the economy is primarily sustained through traditional agricultural activities such as the cultivation of corn, cassava, and yam. However, the productivity of these lands faces critical challenges related to climate variability and resource depletion, making the transition to sustainable water and soil management imperative. Therefore, the integration of an artificial intelligence model based on Machine Learning is proposed to analyze agricultural factors such as soil preparation for crops, planting processes, pest and disease management, and irrigation.

In this regard, the design of a technical tool for farmers focused on the sustainable management of soil and water is proposed. This solution is based on a hybrid architecture that integrates the principles of hexagonal architecture (ports and adapters) with a modular design. The ecosystem is deployed through a hybrid mobile application for end-user use by farmers in the field, complemented by a web platform configured as an administrative dashboard, facilitating technical monitoring and system management.

The system's core functionality utilizes machine learning models optimized through fine-tuning techniques. These models are trained with data collected through interviews with farmers to provide accurate recommendations tailored to the local agricultural context. To ensure optimal performance and data integrity, the back-end implements PostgreSQL for structured data persistence, Redis as a high-speed caching layer, and ChromaDB as the vector database for the recommendation system, guaranteeing rapid responses in processing technical queries.

II. Background

A. Fine-Tuning in Machine Learning Models

The use of advanced machine learning techniques has significantly transformed decision support systems in agricultural contexts, particularly in scenarios where environmental variability and data heterogeneity pose critical challenges. In this context, fine-tuning has become established as an efficient strategy within transfer learning, allowing models previously trained on large volumes of data to be adapted to specific domains with reduced and highly contextualized datasets. Unlike training from scratch, this approach not only

reduces computational costs but also preserves the general knowledge of the base model, improving its ability to generalize to new data [1]. This characteristic is especially relevant in rural environments such as the municipality of Sampués (Sucre), where the availability of structured data is limited, but valuable empirical knowledge exists that can be formalized through supervised retraining processes.

Within the framework of the HerenciaViva project, fine-tuning is applied to machine learning models using data collected directly from local farmers through structured interviews, allowing for the capture of specific agricultural patterns in the Sabanera region. This approach not only facilitates adapting the model to regional agricultural vocabulary and practices, but also introduces a layer of contextual knowledge that is difficult to represent in generic datasets. However, the use of fine-tuning in highly specialized domains poses challenges related to overfitting and the quality of the input data, requiring the implementation of robust strategies for cross-validation, regularization, and evaluation using metrics such as precision, recall, and F1-score [2]. Consequently, the model's effectiveness depends on both the quality of the fitting process and the representativeness of the incorporated local data.

B. Machine Learning for Recommendation Systems in the Agricultural Sector

Machine learning-based recommendation systems have proven to be key tools for optimizing agricultural management, particularly in decision-making related to land use, crop selection, and irrigation planning. Recent studies have shown that supervised algorithms such as Random Forest, Gradient Boosting, and artificial neural networks offer high performance in predicting agronomic variables when soil, climate, and historical data are integrated [3], [4], [5], [6], [7]. However, many of these approaches suffer from a limited capacity for local contextualization, as they rely on global datasets that do not capture the cultural and environmental particularities of specific regions. In this regard, HerenciaViva's proposal introduces a differentiating value by incorporating primary data collected in the field, which allows for the generation of more precise and culturally relevant recommendations.

In terms of soil management, machine learning models allow for the analysis of variables such as pH, moisture, texture, and nutrient levels, facilitating the identification of optimal crops for specific soil conditions. Similarly, in crop management, these systems can classify phenological stages, detect pests using computer vision, and suggest integrated management practices. In the field of irrigation, the integration of evapotranspiration, precipitation, and soil moisture data has enabled the development of models that optimize water use, significantly reducing water waste compared to traditional methods [8]. However, the effectiveness of these solutions depends largely on the underlying data architecture, which must be capable of managing both structured and unstructured information in real time.

C. Data management in development

The development adopts a multilingual data architecture that combines multiple specialized technologies. PostgreSQL is used as the relational persistence system, providing robustness and support for complex queries on structured data such as user profiles, crop records, and historical results. Redis, a key-value non-relational database, is used as an in-memory storage system, enabling efficient session management, result caching, and authentication, which is critical for ensuring adequate response times in environments with limited connectivity. Additionally, ChromaDB is used as a vector database, introducing vector storage capabilities that facilitate information representation through embedding and the execution of semantic similarity searches. This last feature is fundamental to the recommendation engine, as it allows for the identification of similar patterns among agricultural profiles and the generation of recommendations based on the system's previous experiences, overcoming the limitations of purely deterministic approaches.

D. Design from a Software Engineering Perspective

The system's development is based on the agile methodology Extreme Programming (XP), which is particularly well-suited to environments where requirements evolve continuously. In the context of HerenciaViva, this characteristic is essential, given that the system must adapt progressively as new agricultural data is collected. Adopting practices such as test-driven development, continuous integration, and constant refactoring allows for maintaining high software quality standards while facilitating the incorporation of changes without compromising system stability. However, applying XP to projects with artificial intelligence components introduces additional challenges, particularly in model validation and experiment management, requiring careful integration between software engineering and data science practices.

E. Background of Cultivation Processes with Ancestral Zenú Techniques

The Zenú people, an indigenous group originating from the Colombian Caribbean with historical settlements in what are now the departments of Córdoba and Sucre, developed a sophisticated system of hydraulic agriculture known as "camellones" or "raised-platform crops" over centuries. This system consisted of constructing mounds of earth in flood-prone areas of the Momposina Depression, surrounded by canals that channeled water from the marshes, achieving precise control of soil moisture, fertility, and the growing cycles of corn, cassava, and other tubers [9]. These techniques represent an ancient body of knowledge in hydraulic and agricultural management adapted to the floodplain ecosystem, whose fundamental principles are directly relevant to the sustainable management of soil and water in Sampués.

Research such as that in [10] has documented that the Zenú raised fields allowed for crop cycles during periods of flooding and drought, taking advantage of the fertile silt deposited by the rising waters to enrich the soil organically. This knowledge, passed down through generations, includes crop rotation practices, plant associations, and the interpretation of environmental biological indicators, constituting a form of ecological intelligence that has been traditionally underutilized in modern technological systems. Incorporating these practices as input variables in machine learning models not only enriches the system's knowledge base but also contributes to the preservation of intangible cultural heritage, aligning with principles of sustainability and technological appropriation.

F. Programming Languages and Technological Frameworks

The development of HerenciaViva uses criteria of scalability, maintainability, and alignment with modern architectures. Therefore, TypeScript is established as the primary language, allowing for improved code robustness through static typing [11], while NestJS facilitates the implementation of a modular architecture based on dependency injection principles [12]. On the frontend, React and React Native enable the development of intuitive interfaces for both web and mobile environments, optimizing the end-user experience.

Additionally, Python is used in the processing and training pipeline for the ML models, leveraging libraries such as scikit-learn, pandas, and transformers for fine-tuning and managing ChromaDB embeddings. Communication between services is handled through RESTful APIs documented with Swagger/OpenAPI, and authentication is managed with JWT (JSON Web Tokens), forming a cohesive, scalable technological ecosystem aligned with best practices in software engineering.

Thus, this approach not only seeks to optimize the productivity and sustainability of local agricultural systems, but also to establish a replicable model for other regions with similar characteristics, where the combination of advanced technology and traditional knowledge can generate innovative and contextualized solutions.

III. Methodology

The recommendation system was developed using the Extreme Programming (XP) agile methodology, defined as an agile software development framework whose objective is to produce higher-quality software and respond quickly to changes in customer requirements. Emerging in the late 1990s, XP introduces a set of rules and practices based on the philosophy of improving software development in a pragmatic yet disciplined way [13].

Because it focuses on technical practices, teamwork, customer involvement, and a willingness to accept changes, even in the later stages of a project, implementing XP involves a harmonious combination of these elements to streamline the development process, emphasizing efficiency and flexibility. This fosters iterative, adaptive, and user-centered processes, especially suitable for contexts with changing requirements. The life cycle is structured in four phases: planning, design, coding, and testing. In the planning phase, requirements are gathered through interviews and field visits, formalized as user stories prioritized according to their value. Subsequently, in the design phase, a hexagonal-modular architecture is defined, along with data modeling, the processing pipeline for fine-tuning, and prototypes of the system interfaces, ensuring a simple and functional design approach.

The coding phase is developed iteratively through incremental releases that encompass backend construction, database configuration, machine learning model training and integration, and the development of mobile and web applications. XP practices such as pair programming, continuous integration, and ongoing refactoring are applied. Finally, the testing phase is conceived as a cross-functional process, implementing Test-Driven Development (TDD), integration validations, and model evaluation using metrics such as accuracy, recall, and F1 score. Additionally, acceptance tests are carried out with local farmers, ensuring that the recommendations generated are relevant, understandable and applicable in the real agricultural context, thus closing the continuous improvement cycle characteristic of the methodology.

IV. Results

A. Architecture of the HerenciaViva application

The HerenciaViva recommendation system utilizes Hexagonal Architecture, considered a port and adapter architecture. Its foundation lies in separating the application into distinct layers, enabling isolated development evolution. This promotes the separation of responsibilities between business logic, infrastructure services, and external interfaces. This architectural approach facilitates modularity, scalability, maintainability, and independent testing of each system component. By isolating the domain layer from external technologies, the platform can evolve without significantly impacting core functionalities, a particularly relevant aspect for intelligent systems requiring continuous adaptation and integration of new data sources.

Within this architecture, the application is structured around clearly defined APIs that act as communication ports between modules and external services. The backend exposes RESTful services responsible for authentication, recommendation processing, agricultural data management, and interaction with artificial intelligence models. Adapters allow the system to connect to databases, caching mechanisms, vector search engines, and external AI services. This also facilitates testing of each layer. The architecture maintains a structure based on well-specified APIs, defining the port and adapter. The web platform is developed under this principle.

The database is structured using a NoSQL system, specifically the open-source, document-oriented MongoDB database management system. Structuring is done through collections and documents to carry out the entire process of specifying the modules that HerenciaViva uses, specifically in its statistical reports. Furthermore, Redis is used for user management, given its superior handling of user data protection.



Fig. 1. Modular Application Architecture – Modular Hexagonal.

B. Backend structuring

HerenciaViva is implemented in NestJS 11, a progressive framework based on Node.js designed for developing scalable enterprise applications. The system runs on Express 5 using @nestjs/platform-express, enabling efficient HTTP request management and high modularity. The persistence layer

combines TypeORM with PostgreSQL, allowing for the structured management of agricultural records, recommendation histories, user profiles, and soil-related information. PostgreSQL was selected due to its robustness, transactional consistency, and advanced indexing capabilities for structured agricultural datasets.

Authentication and authorization mechanisms are established using Passport.js, integrating multiple authentication strategies such as JWT, Google OAuth2, and Apple Auth. Libraries like passport-jwt, passport-google-oauth20, passport-apple, and @nestjs/jwt enable secure session management and token validation. This multi-vendor mechanism improves accessibility and strengthens security for farmers and administrative users.

Regarding artificial intelligence functionalities, these were integrated using the @google/generative-ai SDK connected with Gemini models, enabling the platform to process agricultural queries in natural language and generate contextualized recommendations. Additionally, ChromaDB is incorporated as a vector database to support semantic similarity searches between agricultural profiles, soil conditions, and historical recommendation patterns. This integration forms the core of the intelligent recommendation engine.

To optimize performance and asynchronous task processing, the system incorporates Redis via ioredis, along with BullMQ and @nestjs/bullmq for queue management and background job execution. This mechanism is particularly relevant for handling AI inference tasks, recommendation generation, caching processes, and notification flows without impacting system responsiveness.

The validation and transformation of input data are managed using class-validator, class-transformer, and Joi, ensuring consistency and integrity of the information provided by users. On the other hand, HTTP security and optimization mechanisms include helmet, compression, cookie parser, and @nestjs/throttler, providing protection against common web vulnerabilities and improving response efficiency.

Likewise, the platform integrates internationalization support via nestjs-i18n, facilitating multilingual capabilities, while monitoring and traceability processes are managed by nestjs-pino, enabling structured logs for system debugging and auditing.



Fig. 2. Technology stack.

C. *Scenarios of the HerenciaViva recommendation system*

HerenciaViva features an initial authentication interface where users can create accounts using email or federated authentication services. Existing users can access the system through a secure login process that validates credentials and session tokens.



Fig. 3. *HerenciaViva Modules of the HerenciaViva recommendation system.*



Fig. 4. *HerenciaViva Startup module of the recommendations system.*

Once authenticated, users are redirected to the main dashboard, which serves as the platform's central navigation environment. From this interface, users can interact with AI-powered recommendation modules, manage agricultural information, review historical queries, and access educational resources related to sustainable agriculture.

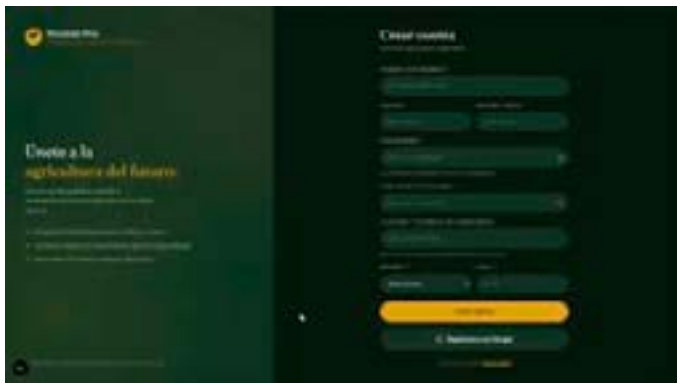


Fig. 5. Authentication modules

The AI-powered conversational module is one of the platform's most important features. Through natural language interaction, farmers can describe problems related to soil degradation, pests, irrigation, or crop diseases, and the system generates recommendations tailored to local agricultural conditions. These recommendations are further refined using data collected directly from farmers in Sampués.



Fig. 6. HerenciaViva recommendation modules.

V. Conclusion

HerenciaViva is conceived with the potential impact of integrating artificial intelligence, fine-tuning techniques, and ancestral Zenú agricultural knowledge into intelligent recommendation systems geared towards sustainable rural management. Preliminary results show that the combination of machine learning models, semantic search using vector databases, and conversational interfaces allows for the generation of contextualized recommendations adapted to the conditions of the Sampués - Sucre territory. The incorporation of ancestral Zenú knowledge as training variables contributes not only to improving the contextual relevance of the recommendations but also to the preservation of ancestral knowledge of cultivation and irrigation processes, bridging the gap between traditional knowledge and emerging digital technologies.

The adoption of a modular hexagonal architecture along with a polyglot persistence strategy guarantees the scalability, interoperability, and maintainability of the platform. The integration of technologies such as NestJS, PostgreSQL, Redis, ChromaDB, and AI services based on Gemini makes HerenciaViva a robust and extensible ecosystem capable of supporting intelligent agricultural services in rural environments.

Furthermore, the application of Extreme Programming (XP) methodology facilitated the iterative evolution of the system through continuous feedback from local stakeholders, demonstrating its suitability for projects characterized by changing requirements and progressive data acquisition. Future work will focus on expanding the agricultural dataset, incorporating explainable AI mechanisms, and validating the platform in larger rural communities to strengthen the accuracy and sustainability of the recommendation model.

References

[1] J. Howard y S. Ruder, «Universal Language Model Fine-tuning for Text Classification,» *In Proceedings of the 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics,* vol. 1, pp. 328-339, 2018.

[2] I. G. Goodfellow, Y. Bengio y A. C. Courville, Deep learning, Estados Unidos: berilustrasi, 2016.

[3] M. Hasan, M. A. Marjan, M. P. Uddin, M. I. Afjal, S. Kardy, S. Kardy, S. Ma y Y. Nam, «Ensemble machine learning-based recommendation system for effective prediction of suitable agricultural crop cultivation,» *Front. Plant Sci.,* vol. 4, pp. 1-18, 2023.

[4] S. Das y M. Ambika, «Revolutionizing Indian Farming: Machine Learning-Powered NLP for Optimal Crop Recommendations,» *Procedia Computer Science,* vol. 258, pp. 2040-2049, 2025.

[5] S. Bhatnagar, N. Lakshmi, A. A y V. Srinivasa Murthy Y, «Development of a Crop Recommendation System Through the Use of Various Machine Learning Algorithms,» *Second International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ICETITE),* pp. 1-6, 2024.

[6] S. Bhatnagar, N. Lakshmi, A. A y V. Srinivasa Murthy Y, «Development of a Crop Recommendation System Through the Use of Various Machine Learning Algorithms,» *Second International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ICETITE),* pp. 1-6, 2024.

[7] T. v. Klompenburg, A. Kassahun y C. Catal, «Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review,» *Computers and Electronics in Agriculture,* vol. 177, pp. 1-18, 2020.

[8] A. Goldstein, L. Fink, A. Meitin, S. Bohadana, O. Lutenberg y G. Ravid, «Applying machine learning on sensor data for irrigation recommendations: revealing the agronomist's tacit knowledge,» *Precision Agric,* vol. 19, p. 421–444, 2018.

[9] C. Plaza, F. Ana María, J. Sáenz Samper y S. Archila, La sociedad hidráulica zenú: Estudio arqueológico de 2,000 años de historia en las llanuras del Caribe colombiano, Santa Fé de Bogotá: Banco de la República , 1993.

[10] C. Plazas y A. M. Falchetti de Sáenz, Asentamientos prehispánicos en el bajo río San Jorge, Santa Fé de Bogotá: Litografía Arco, 1981.

[11] S. Fenton, Pro TypeScript: Application-Scale JavaScript Development 2nd Edición, Apress, 2017.

[12] M. C. Mathis, Mastering NestJS: A Comprehensive Guide to TypeScript-Powered Backend Engineering, API Design, Testing, and Production Deployment, Independently published, 2025.

[13] A. Jones, Extreme Programming Mastery: An In-Depth Exploration and Practical Guide, Walzone Press, 2025.

Design and Implementation of an IoT-Based Monitoring and Control System for Precision Agriculture in Tahiti Lime Crops of the Asociación Agropecuaria Arboleda located in Mercaderes – Cauca

Jhoan Sebastian Parra Quiroga
Universidad del Valle
Cali, Colombia
jhoan.parra@correounivalle.edu.co

Andrés Fernando Restrepo Alvarez
Universidad del Valle
Cali, Colombia
Laboratorio de Simulación y Procesos SAS
Cartagena, Colombia
andres.restrepo@correounivalle.edu.co

Hector Andrés Gonzalez Rodriguez
Reconstruir Habitat
Mercaderes, Colombia
hg248848@gmail.com

Jherson Eveiro Díaz Rosero
Tecnoparque Nodo Valle
Cali, Colombia
jhersondiazr@gmail.com

Yessica Dayana Díaz Rosero
Reconstruir Habitat
Mercaderes, Colombia
jessicadiazros@gmail.com

***Abstract*—This paper presents the design, development, and validation of a digitally integrated monitoring and control system for precision agriculture in Tahiti lime crops of the Asociación Agropecuaria Arboleda located in Mercaderes – Cauca, aligned with Industry 4.0 paradigms. The proposed solution leverages Internet of Things (IoT) technologies, wireless sensor networks, cloud computing, and data analytics to enable real-time management of irrigation and fertigation processes in rural agricultural environments, contributing to the digital transformation of traditional farming systems.**

The system architecture consists of distributed sensor nodes responsible for acquiring key soil physicochemical parameters, including pH, electrical conductivity, and macronutrient concentrations (N, P, K), as well as environmental variables such as ambient temperature and relative humidity. These data are transmitted via low-power wireless communication protocols to a cloud-based platform, where they are processed, stored, and visualized through a user-friendly digital dashboard. The platform supports data-driven decision-making by integrating historical data analysis and threshold-based alerts.

Additionally, the system incorporates automated control strategies for irrigation and nutrient dosing, based on predefined agronomic models and real-time sensor feedback. This closed-loop control approach improves water-use efficiency, optimizes fertilizer application, and reduces operational costs, while minimizing environmental impacts associated with over-irrigation and nutrient leaching.

The research methodology follows an applied and experimental approach, including system design, hardware and software integration, prototyping, and validation under controlled and semi-controlled conditions, up to verification in a real-world operating environment through field deployment and long-term performance evaluation. On the other hand, the integration of renewable energy sources, such as photovoltaic systems, enhances system autonomy and feasibility in non-interconnected rural areas. The results demonstrate the effectiveness of integrating sensing, communication, and control technologies to enable smart agricultural practices. This work contributes to the advancement of digital agriculture by providing a scalable and sustainable solution that supports resource optimization, increases crop productivity, and facilitates the adoption of Industry 4.0 technologies in the agricultural sector.

Keywords*—*Internet of Things (IoT), precision agriculture, smart irrigation systems, wireless sensor networks, time monitoring

I. Introduction

The Department of Cauca is mainly divided into three mining zones (El Tambo-Dovio, Pacific Coast-South, and Mercaderes), identified by the Mining and Energy Planning Unit (UPME) as mining districts due to the high concentration of mineral resources in these areas [1]. In particular, Mercaderes is considered the driest municipality in the Department of Cauca and the second driest municipality in Colombia. Its jurisdiction has been severely affected by intense heat waves associated with the El Niño phenomenon, resulting in more extreme dry seasons and higher temperatures, which have negatively impacted crops, livestock, and the general population.

In addition to these climatic effects, most agricultural soils worldwide are deficient in one or more nutrients required for

This project is funded with resources from Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación of Colombia MINCIENCIAS through call 962-2024 SENAINNOVA

proper plant growth and development. Therefore, it is necessary to establish irrigation and fertilization plans for each crop according to the specific soil type and local climatic and environmental conditions [2].

One of the main agricultural activities in Mercaderes is the cultivation and commercialization of organic Tahiti lime produced by local farming communities. In particular, the ASOCIACIÓN AGROPECUARIA ARBOLEDA (ASOAGRAR) exports this product. Globally, the demand for this citrus fruit has steadily increased, and its cultivation faces specific challenges associated with climate change, including nutrient management, irrigation optimization, and the implementation of Industry 4.0 technologies to maximize the productivity of high-quality fruits that meet export standards, thereby improving the economic income of rural farming families [3].

Despite existing efforts in agricultural research, there remains a significant gap in the application of specific technological solutions for crops cultivated by Colombian rural farming communities. Research on macronutrient monitoring and resource management in citrus crops, particularly Tahiti lime, has experienced significant growth in recent years. Authors such as [4] have contributed to the understanding of macronutrient uptake and distribution in citrus trees, providing a solid foundation for subsequent research. Studies such as [5] have examined the specific water requirements of lime crops under Mediterranean conditions, offering valuable information for efficient water management in these cultivation systems.

The review presented in [4] provides a comprehensive overview of nutrient management in citrus orchards, highlighting key strategies and challenges. Water management practices in citrus orchards have also been extensively investigated, providing detailed analyses addressing both irrigation efficiency and water resource conservation. Studies [6–8] have specifically investigated the uptake and distribution of macronutrients in citrus trees under saline stress conditions, emphasizing the importance of nutritional management under adverse environmental scenarios. Collectively, these studies establish a solid basis for understanding the nutritional and water requirements of Tahiti lime crops, providing valuable perspectives for the implementation of advanced monitoring systems.

Considering the aforementioned factors, the low productivity and quality of organic Tahiti acid lime are closely associated, among other factors, with inadequate management of the plant's water and nutritional requirements, thereby negatively affecting producers' income. According to several studies, appropriate water and nutrient supply management can achieve an increase of approximately 37.9% in crop yield and a 26.4% improvement in fruit quality, both in terms of fruit size and juice content. Furthermore, it can generate water savings of approximately 41.7%, thereby minimizing the environmental impact associated with traditional crop management practices [5–7].

On the other hand, the proposed monitoring system for macronutrients and soil physicochemical parameters, aimed at the controlled management of water resources and organic fertilizers in organic Tahiti lime crops, is presented as a sustainable production alternative considering the climatic conditions of Mercaderes. Finally, this article presents the design of a monitoring system for macronutrients (nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, and magnesium) and soil physicochemical parameters [9], as well as the controlled management of water resources and organic fertilizers, enabling precise irrigation strategies based on the actual requirements of the crops

II. Characterization of the Community

A. *Context of the association's economic activity*

The ASOAGRAR association was formed in 2007 to bring together farmers from the municipality of Mercaderes, Cauca. Currently, its members cultivate and produce organic Tahiti limes, which has become their main economic activity. The association has access to technical staff provided by the government, who offer advisory services on production and marketing aspects, and several members have obtained export farm certifications.

A technical visit was conducted to evaluate the land conditions for establishing a Tahiti lime crop, considering soil (physical, chemical, and biological characteristics), climatic, and agronomic management criteria. During the visit, activities included area delimitation, soil sampling, measurement of environmental variables, and general observation of the land's condition.

B. *Analysis of the information provided by the community*

A preliminary evaluation based on technical and agronomic criteria was carried out to select the land and determine its viability for establishing a Tahiti lime crop. During this stage, aspects such as topography, accessibility, water availability, soil type, vegetation cover, climatic conditions, drainage, and sun exposure were analyzed to identify the land's productive potential.

TABLE I. Information provided by the community

Criteria	Description	Result
1. Mobile network coverage	Availability of 3G/4G/5G signal for data transmission.	Good 3G/4G signal
2. Solar irradiance	Solar exposure for photovoltaic panels (without significant shading).	More than 6 hours per day
3. Vehicle accessibility	Ease of access to the site by vehicle (installation and maintenance purposes).	Regular road accessible by pickup truck
4. Surveillance / security	Presence of people or protective measures safeguarding the equipment.	Owner resides on the property
5. Water availability for irrigation	Availability of a water source for crop irrigation (important for agronomic management).	Gravity-fed or nearby pumped irrigation system
6. Availability of operational personnel	Availability of individuals (owner, family member, or employee) able to support basic tasks (sensor cleaning, inspection).	Two or more people available
7. Terrain topography	Land slope that may hinder installation or affect crop development.	Flat terrain (slope < 3%)

8. Availability of electrical power	Connection to the electrical grid (backup supply for equipment, even if the system is solar-powered).	Electrical power available on-site
9. Farmer commitment	Interest and willingness to collaborate with the project (evaluated through interview).	Maximum commitment and proactive attitude
10. Condition of the lime crop	Presence of established plants (ideal for representative monitoring).	Mature plants with high productivity
11. Risk of natural disasters	History of floods, landslides, frost events, etc. (higher risk corresponds to lower score).	Verified high-risk condition

III. Monitoring and Control System Design

A. Delimitation of the Tahiti lime cultivation area

The biological system selection was carried out considering the agronomic, environmental, and productive conditions of the organic Tahiti lime crops cultivated by the Asociación Agropecuaria Arboleda (ASOAGRAR) in Mercaderes. The evaluated area is located at the following geographic coordinates:

- Latitude: 1.673247
- Longitude: -77.256752

These coordinates enable the precise location of the site within the study area, facilitating its georeferencing and future monitoring through Geographic Information System (GIS) tools or satellite imagery. Regarding the observed conditions, the terrain exhibits slightly undulating topography, with vegetation cover composed of grasslands, shrubs, and some scattered trees. The site presents good solar exposure and natural conditions favorable for agricultural intervention. Additionally, areas with dry vegetation and uncontrolled plant growth were identified, indicating the need for cleaning and pruning activities to optimize land use.



Fig. 1. Satellite image of cultivation area.

The study area corresponds to a 588 m² experimental plot (28 m × 21 m) located under tropical dry-climate conditions characterized by high solar radiation, prolonged drought periods, and limited water availability. Fig. 1 shows the arrangement of the selected plants for the proposed monitoring and control system.

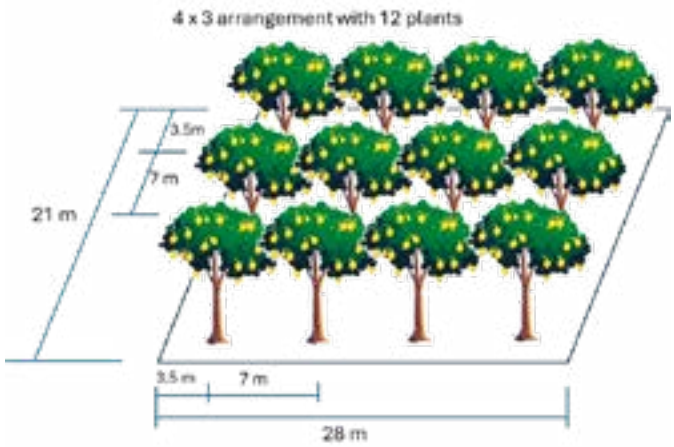


Fig. 2. Plant arrangement of the Tahiti lime crop within the monitoring and control system

To characterize the physicochemical properties of the soil, a systematic composite sampling methodology using a zigzag distribution pattern was implemented [10, 11]. Seven subsamples were collected at depths between 20 and 40 cm, corresponding to the active root zone of the crop. The samples were analyzed to determine pH, electrical conductivity, soil moisture, and macronutrient concentrations (N, P, and K), which served as reference values for sensor calibration and validation.

The monitored variables were selected according to the physiological requirements of *Citrus* × *latifolia* Tanaka and include soil moisture, pH, electrical conductivity, macronutrients (N, P, K), ambient temperature, relative humidity, and soil temperature. These parameters are critical for evaluating nutrient availability, irrigation requirements, and crop health conditions.

Additionally, agronomic reference ranges reported in the literature were considered for irrigation and fertigation management. Optimal pH values between 5.5 and 7.0 and recommended nutrient application ranges for Tahiti lime cultivation were incorporated into the monitoring and control strategy to support precision agriculture practices [9, 12].

B. Description of the system

The proposed system corresponds to a conceptual IoT-based monitoring and control architecture intended for precision agriculture applications in Tahiti lime crops. The system is designed to integrate sensing technologies, wireless communications, embedded systems, cloud computing, renewable energy generation, and automated control strategies under an Industry 4.0 framework for smart agriculture applications.

The conceptual architecture follows a distributed Internet of Things (IoT) approach composed of multiple interconnected subsystems, including the field monitoring subsystem, data acquisition and processing subsystem, wireless communication subsystem, cloud storage subsystem, visualization and user interface subsystem, control and actuation subsystem, and energy supply subsystem. The overall conceptual architecture

and information flow of the proposed monitoring platform are illustrated in Fig. 3.

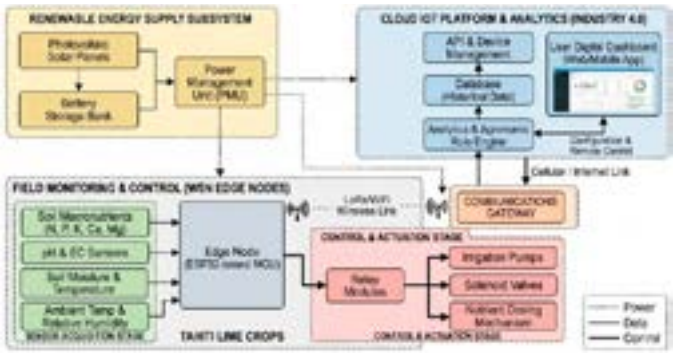


Fig. 3. Overall architecture of the proposed IoT-based monitoring and control system for precision agriculture in Tahiti lime crops.

The field monitoring subsystem is designed to acquire physicochemical and environmental variables associated with crop management. The proposed sensing stage includes sensors for measuring soil macronutrients (N, P, K, Ca, and Mg), soil moisture, pH, electrical conductivity, soil temperature, ambient temperature, and relative humidity. These sensors are intended to be distributed throughout the cultivation area and connected to embedded monitoring nodes responsible for local data acquisition and signal conditioning.

The acquisition and processing subsystem is conceptually based on low-power embedded microcontroller platforms, particularly ESP32-based systems, selected due to their integrated wireless communication capabilities, low energy consumption, processing performance, and compatibility with IoT applications. These monitoring nodes are intended to perform sensor reading, local signal processing, temporary data storage, communication management, and actuator control.

The communication subsystem is designed to enable bidirectional wireless data transmission between field monitoring nodes, the gateway station, and the cloud platform. Considering the rural deployment conditions and long-range communication requirements, low-power communication technologies such as LoRa, WiFi, and cellular communication networks were considered during the conceptual design phase. These technologies are expected to provide reliable connectivity in rural environments characterized by limited telecommunications infrastructure.

At the cloud layer, the storage and processing subsystem is intended to store historical data, process real-time measurements, generate alerts, and enable remote visualization through a web-based monitoring platform. The cloud platform is expected to allow users to supervise crop conditions remotely through internet-connected devices such as smartphones, tablets, and personal computers. Additionally, the platform is proposed to support parameter configuration, historical analysis, and remote control functionalities associated with irrigation and fertigation management.

The control and actuation subsystem is designed to integrate electromechanical devices such as relays, irrigation pumps, solenoid valves, and nutrient dosing mechanisms responsible for executing physical control actions in the field. The proposed control strategy follows a closed-loop architecture in which sensor measurements are intended to be continuously evaluated against predefined agronomic thresholds to determine irrigation and fertigation requirements.

The conceptual operational workflow of the system begins with the acquisition of environmental and soil variables through distributed sensors deployed throughout the cultivation area. The acquired information is intended to be processed locally and transmitted wirelessly toward the gateway station and subsequently to the cloud platform. The platform is designed to store, analyze, and visualize the information while generating alerts and control decisions when abnormal conditions are detected. Finally, commands are expected to be transmitted to the field actuators to activate irrigation or fertigation processes according to the estimated requirements of the crop.

Overall, the proposed system architecture is intended to integrate sensing, communication, cloud computing, automation, and renewable energy technologies into a unified precision agriculture platform capable of improving water-use efficiency, optimizing fertilizer application, reducing operational costs, and supporting sustainable agricultural production under rural operating conditions.

C. Energy autonomy

Considering the limited availability and reliability of electrical infrastructure in rural agricultural areas of Mercaderes, the proposed monitoring and control system incorporates a conceptual renewable energy subsystem intended to guarantee autonomous and continuous operation under isolated field conditions. The energy architecture was conceived to ensure operational reliability, low maintenance requirements, and long-term sustainability for future precision agriculture applications deployed in non-interconnected rural environments.

The Department of Cauca presents geographical and topographical conditions that complicate the expansion of conventional electrical infrastructure, particularly in remote agricultural communities. Although official reports indicate electrical coverage above 90% at the departmental level, several rural zones continue experiencing limitations in electricity availability and service reliability. Consequently, renewable energy technologies were identified as a viable alternative for supporting autonomous IoT-based agricultural systems.

The proposed energy subsystem is conceptually based on photovoltaic solar generation combined with battery-based energy storage. Solar energy was selected due to the high solar resource availability in the study area, characterized by average annual global irradiation values close to 4.88 kWh/m²·day, equivalent to approximately 4.88 Peak Sun Hours (PSH). Solar resource assessments obtained from PVGIS climatic datasets indicate low seasonal variability and stable irradiance conditions throughout the year, with irradiation values ranging between 4.21 and 5.54 kWh/m²·day.

The conceptual photovoltaic subsystem is intended to supply electrical energy to sensor nodes, communication modules, embedded processing units, gateway devices, and irrigation control actuators. The preliminary sizing of the photovoltaic

system was performed considering the estimated daily energy consumption of the monitoring infrastructure and expected system losses associated with energy conversion and storage processes.

Figure 4 presents the conceptual design of the proposed photovoltaic-powered monitoring node intended for deployment in Tahiti lime cultivation environments. The figure illustrates both the conceptual mechanical structure and the proposed field installation configuration of the autonomous monitoring unit. The upper section of the figure shows the structural design of the photovoltaic support system, including the tilted panel holder frame, metallic support structure, electronic enclosure, and mounting base. The lower section illustrates the conceptual integration of the photovoltaic-powered monitoring node within the agricultural environment, highlighting its intended operation under real field conditions.

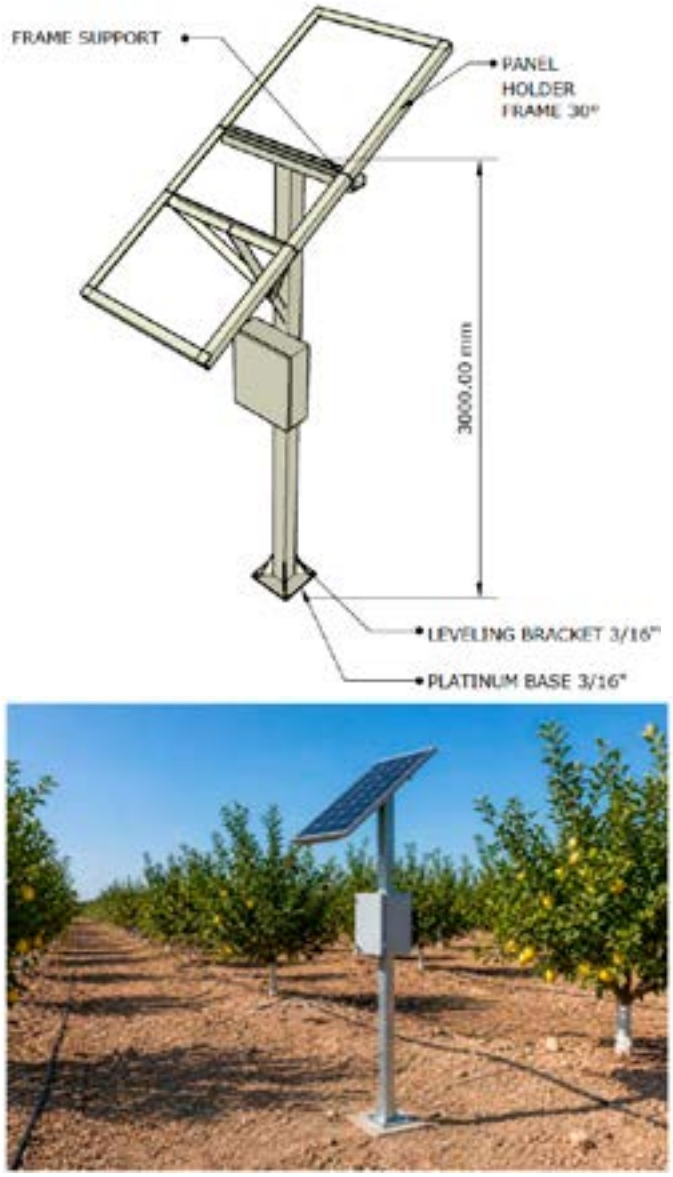


Fig. 4. Proposed photovoltaic-powered monitoring node for precision agriculture applications in Tahiti lime crops. Top: conceptual mechanical design of the support structure, including the photovoltaic panel holder, electronic enclosure, and mounting system. Bottom: conceptual field deployment configuration of the autonomous monitoring node within the agricultural environment.

Considering an average annual solar resource of 4.88 kWh/m²·day and an estimated global system efficiency of approximately 17%, the useful energy generation per square meter can be estimated in $0.83\ kWh/m^2/day$.

To reduce energy consumption, low-power embedded devices and sleep-mode operating strategies were implemented within the monitoring nodes. The solar resource analysis demonstrates favorable conditions for photovoltaic generation due to the high irradiation levels and low seasonal variability characteristic of tropical regions.

The integration of renewable energy technologies improves system autonomy, reduces dependence on conventional electrical infrastructure, and enhances the feasibility of deploying precision agriculture systems in rural environments.

IV. CONCLUSION

This work presented the conceptual design of an IoT-based monitoring and control system for precision agriculture applications in organic Tahiti lime crops cultivated by the ASOAGRAR community in Mercaderes. The proposed architecture integrates sensing technologies, embedded systems, wireless communications, cloud computing, automated irrigation and fertigation strategies, and renewable energy generation under an Industry 4.0 framework oriented toward sustainable agricultural production in rural environments. The study also established a methodological framework for soil characterization, environmental monitoring, and agronomic parameter identification, which constitutes a fundamental basis for the future implementation and validation of the proposed monitoring platform.

The analysis of the environmental, agronomic, and technological conditions of the study area demonstrated the feasibility of implementing precision agriculture technologies in rural agricultural systems affected by water scarcity and limited access to technological infrastructure. In particular, the evaluation of soil physicochemical properties, climatic conditions, and solar resource availability enabled the identification of critical variables associated with irrigation management, nutrient availability, and crop productivity. Likewise, the solar resource assessment revealed favorable conditions for the future integration of photovoltaic energy systems, with average irradiation values close to 4.88 kWh/m²·day and low seasonal variability, supporting the technical viability of autonomous monitoring nodes powered by renewable energy sources.

From an engineering perspective, the proposed architecture demonstrates the potential of combining IoT technologies, low-power embedded systems, wireless sensor networks, and cloud-based data management to support intelligent decision-making processes in precision agriculture applications. The conceptual integration of soil nutrient sensing, environmental monitoring, and automated irrigation and fertigation control strategies

provides a scalable and modular technological framework capable of improving water-use efficiency, optimizing fertilizer application, and reducing operational costs and environmental impacts associated with conventional agricultural practices.

Additionally, the proposed system contributes to the digital transformation of rural agricultural production systems by promoting the adoption of Agriculture 4.0 technologies in communities with limited technological access. The incorporation of renewable energy systems, wireless communications, and remote monitoring capabilities enhances the operational autonomy and scalability of the proposed platform, facilitating its potential replication in other agricultural regions with similar climatic and socioeconomic conditions.

Finally, although the proposed system remains at a conceptual and design stage, the developed methodology, system architecture, and preliminary resource assessments provide a solid technical foundation for future stages of detailed engineering, prototype construction, experimental validation, and field deployment. Future work should focus on the implementation and calibration of the monitoring nodes, long-term validation under real operating conditions, performance evaluation of the wireless communication infrastructure, and the integration of advanced data analytics, machine learning algorithms, and predictive irrigation models to further improve the efficiency and sustainability of precision agriculture systems.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the ASOAGRAR community of Mercaderes, Cauca, for their collaboration and support during the design proposal of the monitoring and control system. Their participation and knowledge of local agricultural practices were essential for the development and validation of this study.

REFERENCES

[1] Alcaldía Municipal de Mercaderes, "Plan De Desarrollo Territorial 2024 – 2027 Mercaderes-Cauca," 307 p. 2024. [Online]. Available in: https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstreams/c5cc9bd3-7188-4c60-b8ca-a4abe0e1efbd/download

[2] Vallejo-Quintero, Victoria Eugenia, "Importance and utility of microbial elements in evaluating soil quality: case studies in silvopastoral systems," *Colombia Forestal*, *16*(1), pp. 83-99, 2013. [Online]. Available in: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-07392013000100006&lng=pt&tlng=.

[3] Ríos Restrepo, J. F., Ortiz Borja, E., Betancur Muñoz, O., & Villada Restrepo, D., "Producción orgánica y su impacto en el desarrollo económico del sector rural colombiano," Ágora, 3(1), pp. 57-70, 2013. [Online]. Available in: https://ojs.tdea.edu.co/index.php/agora/article/view/235

[4] Syvertsen, J.P., Garcia-Sanchez, F., "Multiple abiotic stresses occurring with salinity stress in citrus," Environmental and Experimental Botany, Volume 103, pp. 128-137, 2014. [Online]. Available in: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.015.

[5] Orduz-Rodríguez, J. O., & Osorio, J. A., "Modelo productivo de lima ácida Tahití (Citrus × latifolia Tanaka ex Q. Jiménez) para Colombia," Agrosavia, 432 p. 2020. [Online]. Available in: https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7403435

[6] López Díaz, C. A., & Gómez, J. D., Diagnóstico nutricional del cultivo de la lima ácida Tahití en el departamento del Meta, Colombia. Temas Agrarios, 23(1), pp. 57-70, 2018. [Online]. Available in: https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/1298/2741

[7] Rodríguez, L. F., & Almanza, P. J., "Effect of irrigation and fertilization on crop yield and fruit quality of the Tahiti lime Citrus latifolia Tanaka (Rutaceae)," Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 9(1), pp. 57-67, 2015. [Online]. Available in: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449944864007

[8] Ameer, S., Ibrahim, H., Kulsoom, F., Ameer, G., & Sher, M., "Real-time detection and measurements of nitrogen, phosphorous and potassium from soil samples: A comprehensive review," Journal of Soils and Sediments, 24, 2565–2583, 2024.

[9] Wey, H., Hunkeler, D., Bischoff, W., & Bünemann, E., "Field-scale monitoring of nitrate leaching in agriculture," Environmental Monitoring and Assessment, 194, 45, 2022.

[10] Chang, J., Clay, D., Carlson, C., Malo, D., Clay, S., Lee, J., & Ellsbury, M., "Precision farming protocols: Grid distance and soil nutrient impact on the reproducibility of spatial variability measurements," Precision Agriculture, 1, pp. 277–289, 2000.

[11] Virk, S., Tucker, M., Harris, G., Smith, A., Levi, M., & Lessl, J., "Efficacy and economics of different soil sampling grid sizes for site-specific nutrient management in southeastern USA," Agronomy, 15(4), 903, 2025.

[12] Yuan, Y., Miao, Y., Yuan, F., Ata-Ul-Karim, S., Liu, X., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., & Cao, Q., "Delineating soil nutrient management zones based on optimal sampling interval in medium- and small-scale intensive farming systems," Precision Agriculture, 23, pp. 538–558, 2022.

Context-Enriched Security Monitoring for OT/ICS Networks Using Cloud SIEM and Passive Telemetry

Marian Hristov
Faculty of Telecommunications
Technical University of Sofia
Sofia, Bulgaria
email:
marianhristov97@gmail.com

Maria Nenova
Faculty of Telecommunications
Technical University of Sofia
Sofia, Bulgaria
email: mvn@tu-sofia.bg

Georgi Tsochev
Faculty of Computer systems and technologies
Technical University of Sofia
Sofia, Bulgaria
email: gtsochev@tu-sofia.bg

Rumen Doynov
Faculty of Telecommunications
Technical University of Sofia
Sofia, Bulgaria
email: doynov@tu-sofia.bg

***Abstract* – The rapid convergence of Information Technology (IT) and Operational Technology (OT), accelerated by Industry 4.0, has increased industrial connectivity and efficiency while simultaneously expanding the attack surface of critical environments. In OT/Industrial Control Systems (ICS) networks, cyber incidents can escalate beyond data loss or financial impact into operational disruption and safety-relevant consequences. At the same time, many industrial organizations face a practical gap between detection and response – i.e., security telemetry may exist, but actionable, context-rich alerting and reliable monitoring of the monitoring system/tool itself are often insufficient.**

Our work investigates a cloud-based system for security event monitoring and analysis, with a focus on OT/Internet of Things (IoT) environments where passive, agentless visibility is frequently required. The objective is to design and validate an end-to-end approach that: A) centralizes and enriches security events, B) enables rapid, operationally useful notification and triage, C) improves the reliability of visibility through health/operational monitoring, and D) detects high-impact scenarios that are difficult to distinguish using generic alerts, such as firmware downgrade activity camouflaged as legitimate update behavior.

Methodologically, our work combines a structured review of OT threat trends and systemic weaknesses – e.g., visibility gaps, segmentation, remote access exposure, and shared credentials - with practical engineering implementations and controlled testing. The developed architecture integrates passive OT monitoring - Microsoft Defender for IoT (D4IoT), cloud SIEM correlation and analytics, - Microsoft Sentinel - and automation workflows (Azure Logic apps). Custom analytic logic is introduced to enrich alerts with operational context (e.g., sensor identity and location) and to implement version-aware comparison for differentiating benign firmware upgrades from potentially malicious downgrades. Reliability is addressed through a multi-layer health monitoring model that independently detects loss of telemetry, cloud connectivity degradation, and sensor availability issues using SIEM rules, Azure Resource Graph checks, and on-premises monitoring (e.g., SNMP/Zabbix), including applicability to constrained or air-gapped scenarios. In addition, a complementary SIEM use case is demonstrated via Splunk-based detection workflows for IoT malware/DDoS-related indicators, illustrating how heterogeneous sources can be unified into a "single pane of glass" for investigation and response.

Results from laboratory and production-like validations show that the system can deliver timely, context-rich notifications to security operations, reduce response time, and minimize alert fatigue by selectively escalating only high-risk events (i.e., downgrade incidents) while reporting routine changes (i.e., upgrades) through scheduled summaries. The health monitoring layer provides early warning of visibility degradation and supports guided troubleshooting by differentiating likely failure modes. Collectively, the findings support the conclusion that cloud-based event monitoring - when combined with OT-aware passive telemetry, context enrichment, automation, and reliability monitoring - meaningfully improves detection-to-response effectiveness in Industrial environments without introducing disruptive active scanning or endpoint agents.

As external validation of practical impact, one of the authors has received official recognition from Microsoft for contributions to Defender for IoT, including collaboration on a playbook. The link to the recognition will be provided separately.

Keywords- OT/ICS/ IoT, D4IoT, SIEM/SOAR

I. Introduction

In the recent five years, OT/ICS organizations have witnessed a sustained increase in cyber threats, driven by Industry 4.0 adoption, IT-OT convergence, and the growing utilization of remote connectivity. Dragos's annual *Year in Review* reports [1-4] consistently emphasize that industrial networks face both higher incident volume and increasingly mature adversary behaviors. A prevailing tendency remains that Ransomware attacks affect industrial sectors, especially Manufacturing, alongside a continued incline in disruptive actions impacting the industrial operations. The security professionals at Dragos emphasize the scale of this concern (e.g., 605 Ransomware incidents in 2022 and 905 in 2023, with further increases suggesting thousands of affected OT/ICS companies in 2025), underscoring that cybercrime is a persistent and expanding risk to industrial operations. In parallel, the OT threat landscape has matured beyond the traditional IT-focused compromise, so adversaries increasingly exploit legitimate administrative paths, such as Remote Access, Shared Credentials, and Trusted Connections, and demonstrate more OT-aware tradecraft, complicating detection and response in networks where uptime and safety are the main priorities.

These movements reveal a practical reality in OT/ICS defense strategies: even when telemetry and detection mechanisms are in place, the operational outcome often falls short. Our research concludes that many industrial organizations still lack actionable, context-rich alerting that enables timely responses and trustworthy assurance that the visibility is continuously available. Passive, agentless monitoring is frequently required in these networks because many traditional Industrial Automation Control Systems (IACS) devices do not

support agents, while active scanning can introduce process risk. However, the totally passive monitoring raises another critical question of how to monitor the monitoring system. A sensor malfunction, cloud connectivity disruption, or ingestion degradation can silently eliminate visibility, leaving the industrial organization effectively unmonitored and potentially unprotected during the worst possible moment. In addition, novel OT threats increasingly include scenarios that abuse legitimate processes, such as firmware downgrade activity, for which a malicious actor mimics genuine maintenance flows, creating symmetry between benign and adversarial behavior [5-6].

Our work successfully addresses these challenges by designing Context-Enriched Security Monitoring for OT/ICS Networks Using Cloud SIEM and Passive Telemetry solution. We researched cloud-based systems for monitoring that integrate passive OT monitoring - Microsoft Defender for IoT [7] - cloud SIEM correlation and analytics, - Microsoft Sentinel [8] - and automation flows through the Azure Logic apps [9]. The objective is to develop and validate a robust approach that centralizes and enriches security alerts and events with operational context (e.g., sensor information and site location), enables instant notifications, improves reliability based on multi-layer health/operational monitoring for the actual solution (i.e., telemetry loss, cloud connectivity interruption, and sensor availability issues), and spots high-impact attacking scenarios that are difficult to distinguish using generic alerts. Most notably, Firmware Downgrades in IACS devices, using version-aware analytics that escalate only regressions while documenting regular upgrades through scheduled reports. Furthermore, we demonstrate an additional, complementary, SIEM use case based on Splunk Enterprise [10] that detects IoT DDoS indicators, highlighting how heterogeneous sources can be merged in a single-pane-of-glass security monitoring solution.

Collectively, our article argues that cloud-based security monitoring, when combined with OT-aware passive analysis, context-enriched telemetry, automation, and self-health/operational monitoring for reliability, can substantially improve detection-to-response effectiveness in OT/ICS environments without the need for disruptive active scanning or agent installation. As external validation of the work impact, one of the authors has received official recognition from Microsoft for contributions to Defender for IoT, including collaboration on a Playbook [11].

II. Overview of Microsoft Defender for IoT and Solution Implementation

Microsoft Defender for IoT (D4IoT) is a passive, agentless network monitoring solution designed to work across heterogeneous IT, OT, and IoT environments. The overall system utilizes the following two core components:

- **D4IoT network sensor**, which is the on-premises part (dedicated server or virtual machine) that receives mirrored traffic from a SPAN port or network TAP and analyzes it using Deep Packet Inspection (DPI) and OT-aware analytics engines;
- **Azure D4IoT**, which is a cloud management console in the Azure Portal that aggregates data from cloud-connected sensors and provides centralized management.

Based on the operational constraints and Internet connectivity policies, D4IoT can be implemented in the following three modes:

- **Air-gapped**, where the sensors are managed locally, via the sensor GUI, and forward alerts to an on-premises SIEM, such as Splunk Enterprise. With this approach, the scaling management becomes complex as the number of sensors grows;
- **Cloud-connected**, where the sensors send data to Azure and are centrally managed through the Azure Portal;
- **Hybrid**, which is a mixed deployment with some cloud-connected sensors and others that remain locally managed and integrate with an on-premises SIEM.

D4IoT's primary functional areas include:

- **Asset Management** - utilizing mirrored traffic to build a device inventory and network map, capturing attributes such as IP and MAC address, Hostname, Firmware or OS, Model, and observed machine-to-machine communication patterns;
- **Vulnerability Management** - used to identify weaknesses across discovered devices (e.g., missing patches, exposed ports, unauthorized software, vulnerable protocols, etc.);
- **Threat Management** - generates real-time alerts and historical reports utilizing ICS-specific threat intelligence and integrating behavioral baselining to flag deviations and/or suspicious activities.

The sensor onboarding process is presented in Fig. 1. In the case of a cloud-connected implementation, the firewall rules need to be adjusted to allow outbound access to several Azure secure endpoints over TCP 443 [12]. Once the D4IoT network sensor(s) are successfully implemented and the relevant data is streamlined to Azure, the Sentinel data connector - Microsoft Defender for IoT - is enabled to ingest the security alerts. This operation is presented in Fig. 2.



Fig. 1. D4IoT network sensor onboarding



Fig. 2. "Microsoft Defender for IoT" Sentinel data connector

Finally, once D4IoT - as a passive, agentless network monitoring solution - is integrated with Sentinel, - as the cloud SIEM - the automation part is achieved through an Azure Logic apps. The alerts are ingested via the native data connector. At the same time, custom Analytic rules enrich detections with operational context and standardize essential data fields important for instant triage and potential response. To fill the detection-to-response gap, Sentinel incidents trigger Logic apps that dispatch structured, event-enriched notifications to the Security Operations Center (SOC), including actionable details needed for immediate assessment. Reliability is guaranteed through a multi-layer self-health/operational monitoring design, including Sentinel rules that detect telemetry gaps (i.e., D4IoT alerts), Azure Resource Graph (ARG) query checks to identify sensor cloud-connectivity disruptions, and on-premises SNMP monitoring (e.g., Zabbix server) that validates sensor availability for constrained or air-gapped networks. Finally, Firmware Downgrade in IACS devices detection is engineered using version-aware analytics and parsing the old and new versions from alerts to only escalate regressions. At the same time, standard upgrades are handled via scheduled reports to minimize SOC alert fatigue.

III. Testing the Proposed Solution

We validated the proposed solution's workability through a structured test scenario combining controlled lab simulations and production-like industrial network conditions. First, we confirmed the end-to-end data flow from the fully passive D4IoT sensors to Microsoft Sentinel, ensuring that alerts were reliably ingested and normalized. We then applied the context-enrichment logic and generated representative alert detections to confirm that sensor information and site location mapping were consistently populated in incidents and subsequent notifications. Next, we tested the notification channel by initiating several Sentinel incidents and closely monitoring the automated execution of Azure Logic apps, which produced instant, context-enriched messages with the expected key data for immediate SOC triage and potential response. The simulation results – including D4IoT alert, Sentinel incident, an email notification, and automated incident tag are presented in Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, and Fig. 6.



Fig. 3. "*Malware Test File Detected - EICAR AV Success*" D4IoT alert



Fig. 4. *"D4IoT – Malware Identified in Industrial Network"Sentinel incident*



Fig. 5. *"D4IoT – Malware Identified in Industrial Network" email notification*

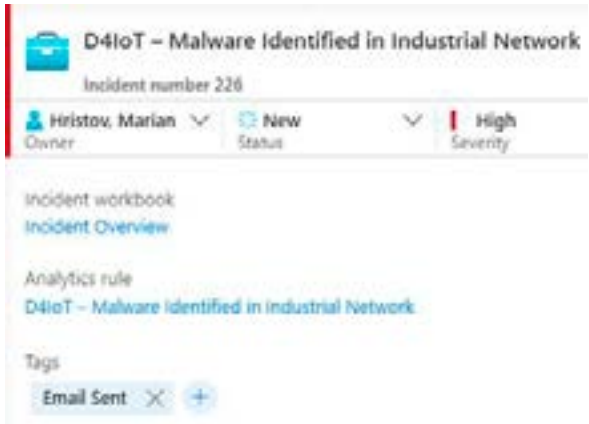


Fig. 6. *Automated "Email Sent" Incident tag*

To evaluate the solution's reliability, we deliberately simulated visibility-degradation scenarios, including alert gaps, cloud connectivity interruptions, and sensor availability loss, which confirmed that the independent, self-health/operational-monitoring layered approach raised signals through the appropriate notification channels and demonstrated expected performance behavior. The multi-layer design also allowed clear differentiation of likely failure ways, significantly improving troubleshooting compared to single-indicator monitoring. The simulation results – including action description, expected and actual outcome are presented in Table 1.

TABLE I. SELF-HEALT/OPERATIONAL MONITORING

#	*Description*	*Expected Outcome*	*Actual Result*
1	Zabbix email	Zabbix email for 3 unsuccessful pings	Zabbix email on the 6th minute
2	Teams notification	Teams notification for 30 minutes since the last cloud connectivity	Teams notification on the 31st minute
3	Sentinel incident – "No alerts in 30 minutes"	Sentinel incident for no alerts in the last 30 minutes from any sensor	Sentinel incident on the 31st minute
4	Sentinel incident – "45 minutes disconnected"	Sentinel incident for 45 minutes since the last cloud connectivity	Sentinel incident on the 45th minute
5	Sentinel incident – "No alerts in 12 hours"	Sentinel incident for no alerts in the last 12 hours from a particular sensor	Sentinel incident after 12 hours

For the IACS device Firmware Downgrade use case, we executed controlled downgrade and restoration sequences, which verified that the developed version-aware analytics logic generates an incident only during the downgrade while suppressing escalation during the subsequent legitimate upgrade. In parallel, the scheduled report mechanism successfully collected and addressed benign firmware changes for governance and compliance purposes without generating unnecessary high-priority incidents or SOC alert fatigue.

TABLE II. FIRMWARE DOWNGRADE

#	*Description*	*Expected Outcome*	*Actual Result*
1	D4IoT detects the IACS device	D4IoT identifies the firmware version of the IACS device	Version 3.3.1.2 is identified
2	Firmware downgrade	"Firmware Change Detected" alert	The alert indicates version 3.3.1.1
3	Sentinel incident generation	"D4IoT-Firmware Downgrade Detected" incident generated	Incident 226 is generated
4	Firmware upgrade	Second "Firmware Change Detected" alert	The alert indicates version 3.3.1.2
5	Sentinel incident suppression	Second "Firmware Change Detected" alert not to trigger incident	Second "D4IoT-Firmware Downgrade Detected" incident is not generated

Across all scenarios, our "Context-Enriched Security Monitoring for OT/ICS Networks Using Cloud SIEM and Passive Telemetry" system behaved deterministically. Furthermore, it remained operationally safe under OT constraints, demonstrating that passive data telemetry combined with cloud SIEM analytics can enable rapid detection-to-response workflows. Overall, the solution performs as intended and, in practice, exceeds initial expectations by delivering higher-than-expected detection results, reducing manual operational overhead, and speeding up incident triage and troubleshooting.

IV. CONCLUSION

Our research demonstrates that combining passive, OT-aware telemetry with cloud SIEM analytics, context enrichment, and automation meaningfully closes the detection-to-response gaps in OT/ICS networks while preserving operational constraints. The developed solution delivers promptly actionable notifications, reduces SOC alert fatigue (i.e., selective escalation), and enhances resilience by continuously validating visibility through multi-layer self-health/operational monitoring. Lab simulations and production-like testing confirmed that the solution functions reliably end-to-end and supports more rapid triage and troubleshooting than traditional, non-enriched alert contexts. Future work will focus on replicating these core capabilities, including context-enriched alerts, automated notifications, health monitoring, and version-aware firmware downgrade detection by utilizing an on-premises SIEM product, specifically Splunk Enterprise, to support air-gapped and hybrid industrial deployments.

ACKNOWLEDGMENT *(Heading 5)*

The authors gratefully acknowledge the support provided by the project BG05SFPR001-3.004-0025 DUNIZvIKT.

REFERENCES

[1] Dragos, "ICS/OT Cybersecurity Year in Review 2022"
[2] Dragos, "Year in Review 2023"
[3] Dragos, "OT Cybersecurity Report: A Year in Review 2025"
[4] Dragos, "OT Cybersecurity Report: A Year in Review 2026"
[5] SafeBreach, "Windows Downdate: Downgrade attacks using Windows Updates", online: https://www.safebreach.com/blog/downgrade-attacks-using-windows-updates (accessed: 10.05.26)
[6] Hristov M, Nenova M, Dimitrova V. Security Symmetry in Embedded Systems: Using Microsoft Defender for IoT to Detect Firmware Downgrade Attacks. Symmetry. 2025; 17(7):1061. https://doi.org/10.3390/sym17071061
[7] Official product documentation, "Microsoft Defender for IoT", online: https://www.microsoft.com/en-us/security/business/endpoint-security/microsoft-defender-iot (accessed: 10.05.26)
[8] Official product documentation, "Microsoft Sentinel", online: https://www.microsoft.com/en-us/security/business/siem-and-xdr/microsoft-sentinel (accessed: 10.05.26)
[9] Official product documentation, "Azure Logic apps", online: https://azure.microsoft.com/en-us/products/logic-apps (accessed: 10.05.26)
[10] Official product documentation, "Splunk Enterprise", online: "https://www.splunk.com/en_us/products/splunk-enterprise.html" (accessed: 10.05.26)
[11] Microsoft Defender for Endpoint Blog, "Sensor Disconnection Notifications with Microsoft Defender for IoT and Microsoft Sentinel" online: https://techcommunity.microsoft.com/blog/microsoftdefenderatpblog/sensor-disconnection-notifications-with-microsoft-defender-for-iot-and-microsoft/4375517 (accessed: 10.05.26)
[12] Official product documentation, "Networking requirements", online: https://learn.microsoft.com/en-us/azure/defender-for-iot/organizations/networking-requirements#sensor-access-to-azure-portal (accessed: 10.05.26)

Manos de aprendizaje: del salón de clase a la vida de los niños a través de la fabricación digital

Javier Muñoz Tovar,
docente investigador
bmunoz@itc.edu.co

Belina Quezada, estudiante,
Bbquezadat@itc.edu.co

Ana Supelano, estudiante,
amsupelanol@itc.edu.co

1. Introducción (Español – versión académica con citas)

En los últimos años, la educación en ingeniería ha enfrentado el reto de transformar sus enfoques tradicionales de enseñanza hacia modelos centrados en el estudiante, que promuevan no solo la adquisición de conocimientos técnicos, sino también el desarrollo de competencias transversales como el trabajo en equipo, el pensamiento crítico y la resolución de problemas en contextos reales [1]. En este sentido, metodologías activas como el aprendizaje basado en proyectos (Project-Based Learning, PBL) han demostrado ser efectivas para fomentar un aprendizaje significativo y contextualizado [2].

Paralelamente, el avance de tecnologías como la manufactura aditiva ha abierto nuevas oportunidades en la formación en ingeniería, al facilitar la integración entre diseño, prototipado y validación dentro de entornos educativos [3]. Estas herramientas permiten no solo fortalecer habilidades técnicas, sino también desarrollar soluciones con impacto social tangible.

A pesar de estos avances, persiste una brecha en la implementación de experiencias formativas que integren de manera efectiva el aprendizaje técnico con la resolución de problemas reales, especialmente en contextos de vulnerabilidad social [4]. En este sentido, resulta fundamental promover estrategias pedagógicas que articulen la formación académica con necesidades concretas de la sociedad.



Fig 1. Estudiantes en catedra de prótesis.

En respuesta a esta problemática, este artículo presenta una experiencia de aprendizaje desarrollada en el marco de un curso de fabricación digital y un semillero de manufactura aditiva, en la cual los estudiantes participaron en el diseño y fabricación de una prótesis impresa en 3D para una niña en condición de vulnerabilidad. El objetivo de este trabajo es analizar cómo la implementación de un enfoque de aprendizaje basado en proyectos contribuye al fortalecimiento de competencias técnicas y transversales en estudiantes de ingeniería, así como a la generación de impacto social.

El documento se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 presenta el marco teórico, la Sección 3 describe la metodología, la Sección 4 expone los resultados, la Sección 5 discute los hallazgos, y la Sección 6 presenta las conclusiones.

2. Marco Teórico (Español – con citas IEEE)

El aprendizaje basado en proyectos (Project-Based Learning, PBL) se ha consolidado como una de las metodologías activas más relevantes en la educación en ingeniería, al promover un aprendizaje centrado en el estudiante mediante la resolución de problemas complejos y contextualizados [1]. Este enfoque permite integrar

conocimientos teóricos y prácticos, fomentando el desarrollo de competencias clave como el trabajo en equipo, la comunicación efectiva y el pensamiento crítico [2].



Fig 2. Meza de conceptualización sobre protesis

Diversos estudios han evidenciado que la implementación del PBL mejora la motivación y el compromiso de los estudiantes, así como su capacidad para aplicar conocimientos en contextos reales [3]. En particular, en la educación en ingeniería, el PBL facilita la aproximación a situaciones similares a las que los futuros profesionales enfrentarán en su ejercicio laboral, fortaleciendo así su preparación integral.

Por otra parte, la incorporación de tecnologías emergentes como la manufactura aditiva ha transformado los procesos de enseñanza-aprendizaje en ingeniería. La impresión 3D permite materializar ideas de manera rápida y económica, facilitando procesos iterativos de diseño, prototipado y validación [4]. Esto no solo potencia el desarrollo de habilidades técnicas, sino que también promueve la creatividad y la innovación en los estudiantes.

Adicionalmente, el uso de la manufactura aditiva en contextos educativos ha demostrado ser particularmente efectivo cuando se vincula con proyectos de impacto social. En este sentido, iniciativas orientadas al desarrollo de soluciones para comunidades vulnerables contribuyen a fortalecer la responsabilidad social y el compromiso ético de los futuros ingenieros [5].



Fig.3 conceptualización manual parte estética

En consecuencia, la integración del aprendizaje basado en proyectos con tecnologías de manufactura aditiva y un enfoque de impacto social constituye una estrategia pedagógica robusta para la formación integral en ingeniería, al articular el desarrollo de competencias técnicas, transversales y sociales en un mismo entorno de aprendizaje.

3. Metodología

3.1 Enfoque del estudio

El presente trabajo se enmarca en un enfoque cualitativo con alcance descriptivo, basado en el análisis de una experiencia educativa desarrollada bajo la metodología de aprendizaje basado en proyectos (PBL). El estudio se configura como un estudio de caso, centrado en la implementación de un proyecto de diseño y fabricación de una prótesis impresa en 3D en un entorno académico.



Fig.4 prearmado de prototipos

3.2 Contexto y participantes

La experiencia se llevó a cabo en el marco de un curso de fabricación digital y un semillero de investigación en manufactura aditiva. Los participantes fueron estudiantes de ingeniería vinculados a estos espacios académicos,

quienes trabajaron de manera colaborativa en el desarrollo del proyecto.



Fig.5 toma de medidas

El proyecto se desarrolló en articulación con la fundación FABRILAB, lo que permitió abordar un caso real asociado a la fabricación de una prótesis personalizada para una niña en condición de vulnerabilidad.

3.3 Diseño metodológico

La metodología se estructuró bajo un enfoque de aprendizaje basado en proyectos, en el cual los estudiantes participaron activamente en todas las fases del desarrollo. El proceso se organizó en las siguientes etapas:

- **Definición del problema:** identificación de las necesidades de la beneficiaria y análisis de requerimientos funcionales.



Fig 6. Impresión muñón para referencias

- **Diseño conceptual:** generación de propuestas de solución y selección del diseño más adecuado.



Fig.7 modelado estetico

- **Modelado digital:** desarrollo del modelo mediante herramientas de diseño asistido por computadora (CAD).



Fig.8 escaneo de muñón para impresión

- **Prototipado:** fabricación de prototipos utilizando tecnologías de manufactura aditiva (impresión 3D).

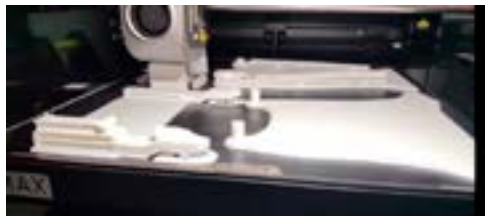


Fig.9 impresión de prótesis definitiva

- **Iteración:** ajustes al diseño con base en pruebas funcionales y retroalimentación.



Fig.10 ensamble de la protesis

- **Validación:** evaluación del funcionamiento y adaptación de la prótesis a las necesidades de la usuaria.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de información

Para el análisis de la experiencia se consideraron diferentes fuentes de información, incluyendo la observación del proceso de trabajo de los estudiantes, la revisión de los productos desarrollados (diseños y prototipos), y la retroalimentación obtenida durante la ejecución del proyecto.



Fig. 11 presentación final del proceso

Adicionalmente, se analizaron aspectos relacionados con la motivación, el compromiso y la apropiación del conocimiento por parte de los estudiantes a lo largo del desarrollo de la experiencia.

3.5 Consideraciones éticas

El desarrollo del proyecto se realizó garantizando el respeto por la dignidad y bienestar de la beneficiaria, así como el uso responsable de la información. Se procuró que la intervención tuviera un impacto positivo, tanto en el proceso formativo de los estudiantes como en la calidad de vida de la usuaria final.



Fig. 12 entrega de prótesis a Danna

4. Resultados

Los resultados de la experiencia educativa evidencian impactos significativos tanto en el proceso formativo de los estudiantes como en el desarrollo del proyecto de ingeniería con enfoque social.

En primer lugar, se observó un incremento en la motivación y el compromiso de los estudiantes durante todas las fases del proyecto. La posibilidad de trabajar en un caso real asociado a una necesidad social concreta favoreció una mayor apropiación del proceso de aprendizaje y una participación activa en las actividades de diseño, modelado y fabricación.



Fig. 13 equipo de trabajo

En segundo lugar, se evidenció el desarrollo progresivo de competencias técnicas relacionadas con el diseño asistido por computadora (CAD) y la manufactura aditiva. Los estudiantes lograron pasar de modelos conceptuales iniciales a prototipos funcionales iterativos, incorporando mejoras basadas en pruebas y retroalimentación.

Asimismo, se fortalecieron competencias transversales como el trabajo en equipo, la comunicación efectiva y la toma de decisiones en contextos de incertidumbre técnica. Estas habilidades se manifestaron especialmente durante las fases de iteración y validación del diseño.



Fig. 14 ceremonia entrega de protesis

Desde el punto de vista del impacto del proyecto, se logró la fabricación y entrega de una prótesis personalizada funcional, adaptada a las necesidades específicas de la beneficiaria. Este resultado permitió materializar la conexión entre el proceso académico y una solución tecnológica con impacto social real.

Finalmente, la experiencia permitió evidenciar que la integración de aprendizaje basado en proyectos con manufactura aditiva genera entornos de aprendizaje más significativos, en los cuales los estudiantes perciben una mayor relevancia de los contenidos abordados en su formación profesional.

5. Discusión

Los resultados obtenidos en esta experiencia educativa evidencian la efectividad del aprendizaje basado en proyectos (PBL) como estrategia pedagógica en la formación en ingeniería, en concordancia con lo reportado en la literatura [1], [2]. La participación activa de los estudiantes en todas las fases del proyecto permitió no solo la adquisición de conocimientos técnicos, sino también el desarrollo de competencias transversales esenciales para el ejercicio profesional.

En particular, se observa que la integración del PBL con tecnologías de manufactura aditiva potencia el aprendizaje significativo, al permitir que los estudiantes transiten desde la conceptualización hasta la materialización de soluciones funcionales. Este hallazgo es consistente con estudios que destacan el valor de la fabricación digital en entornos educativos de ingeniería [3].

Asimismo, el componente de impacto social del proyecto tuvo un papel fundamental en el fortalecimiento de la motivación y el compromiso estudiantil. La posibilidad de desarrollar una solución real para una persona en condición de vulnerabilidad generó un sentido de propósito que influyó positivamente en el proceso de aprendizaje. Esto refuerza la importancia de incorporar enfoques de ingeniería con responsabilidad social en los currículos académicos [4].

Por otra parte, el proceso de iteración y validación del diseño permitió a los estudiantes enfrentarse a problemas reales de ingeniería, caracterizados por la incertidumbre y la necesidad de toma de decisiones basada en restricciones técnicas. Este tipo de experiencias contribuye a cerrar la brecha entre la formación académica y el ejercicio profesional.

En conjunto, estos resultados sugieren que la integración de PBL, manufactura aditiva y enfoque social constituye una estrategia efectiva para la formación integral en ingeniería, al articular el desarrollo de habilidades técnicas, transversales y éticas en un mismo entorno de aprendizaje.

6. Conclusiones

Este trabajo presentó una experiencia de aprendizaje en ingeniería basada en la implementación de una estrategia de aprendizaje basado en proyectos (PBL) orientada al diseño y fabricación de una prótesis impresa en 3D con impacto social. La experiencia permitió articular el desarrollo de competencias técnicas y transversales en un entorno de aprendizaje aplicado.

Se evidenció que la integración de metodologías activas con tecnologías de manufactura aditiva favorece significativamente el aprendizaje significativo, al permitir que los estudiantes enfrenten problemas reales de ingeniería desde etapas tempranas de su formación. Asimismo, el componente social del proyecto contribuyó al fortalecimiento de la motivación, el compromiso y la responsabilidad ética de los estudiantes.

Adicionalmente, la experiencia mostró que el trabajo en contextos reales, en colaboración con una entidad externa como FABRILAB, potencia la formación integral del ingeniero al exponerlo a restricciones, necesidades reales y toma de decisiones en escenarios no estructurados.

Como aporte principal, este estudio sugiere que la combinación de PBL, manufactura aditiva y enfoque de

impacto social constituye una estrategia replicable y escalable en la educación en ingeniería.

Como trabajo futuro, se propone incorporar instrumentos de evaluación cuantitativa que permitan medir de manera más precisa el impacto del enfoque en el desarrollo de competencias específicas, así como ampliar la experiencia a otros cursos y disciplinas de ingeniería.

Referencias IEEE

[1] M. Prince and R. Felder, "Inductive teaching and learning methods: Definitions, comparisons, and research bases," Journal of Engineering Education, vol. 95, no. 2, pp. 123–138, 2006.

[2] E. de Graaff and A. Kolmos, "Characteristics of problem-based learning," International Journal of Engineering Education, vol. 19, no. 5, pp. 657–662, 2003.

[3] J. S. Mills and D. F. Treagust, "Engineering education—Is problem-based or project-based learning the answer?," Australasian Journal of Engineering Education, 2003.

[4] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York, USA: Springer, 2015.

[5] E. Tsang, Projects That Matter: Concepts and Models for Service-Learning in Engineering. Washington, DC: American Association for Higher Education, 2000.

[6] A. Kolmos, F. K. Fink, and L. Krogh, The Aalborg PBL Model: Progress, Diversity and Challenges. Aalborg University Press, 2004.

[7] C. L. B. Rogers and J. E. Portsmore, "Bringing engineering design into high school education: A review of the literature," Journal of STEM Education, vol. 5, no. 3, pp. 17–28, 2004.

[8] T. R. Kelley and J. G. Knowles, "A conceptual framework for integrated STEM education," International Journal of STEM Education, vol. 3, no. 11, 2016.

[9] National Academy of Engineering, Educating the Engineer of 2020: Adapting Engineering Education to the New Century. Washington, DC: The National Academies Press, 2005.

[10] D. A. Schön, The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action. New York,

[1] M. Prince and R. Felder, "Inductive teaching and learning methods," J. Eng. Educ., 2006.

[2] J. Mills and D. Treagust, "Engineering education—Is problem-based or project-based learning the answer?" Australasian J. Eng. Educ., 2003.

[3] E. de Graaff and A. Kolmos, "Characteristics of problem-based learning," Int. J. Eng. Educ., 2003.

[4] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies. Springer, 2015.

[5] E. Tsang, Projects That Matter: Service-Learning in Engineering. AAHE, 2000.

BLOCKDOCU: Aplicativo web con blockchain para la automatización de recepción y consultas documentales en la Unidad de Gestión Documental y Archivo de la Universidad de Nariño

Angela María Benavides Rodríguez
Programa de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería
Universidad de Nariño
Pasto, Nariño, Colombia
angelabenrod@outlook.com

Dylan José Guerrero Aité
Programa de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería
Universidad de Nariño
Pasto, Nariño, Colombia
dylanjose91@gmail.com

Resumen—El proyecto BLOCKDOCU surge como una respuesta estratégica a la vulnerabilidad crítica detectada en el Unidad de Gestión Documental y Archivo de la Universidad de Nariño, donde la gestión de historias laborales depende actualmente de procesos manuales y registros no estandarizados. Esta situación genera riesgos significativos de pérdida de información sensible, afecta la integridad de los datos personales y provoca tiempos de respuesta administrativos ineficientes que impactan la memoria institucional. Con el propósito de mitigar estas deficiencias, esta investigación propone el desarrollo de un aplicativo web modular diseñado para automatizar la recepción y consulta de documentos, fundamentado en un modelo de confianza digital que integra tecnología blockchain local.

Para alcanzar este objetivo, se implementó una metodología de ingeniería de software de alto nivel bajo un enfoque de spec-driven development, la cual permitió que la construcción del sistema estuviera guiada por especificaciones formales y requisitos técnicos rigurosos. Este proceso se potenció mediante la optimización del ciclo de vida del desarrollo asistido por inteligencia artificial, empleando agentes para la refinación del product backlog, la identificación temprana de inconsistencias en las historias de usuario y la iteración ágil de prototipos de interfaz. Asimismo, la arquitectura técnica se estructuró mediante la indexación de metadatos basados en el estándar internacional Dublin Core, asegurando que cada registro sea validado en tiempo real por la red blockchain para garantizar su inmutabilidad y autenticidad.

Los resultados obtenidos hasta el momento demuestran una estructura técnica robusta y funcional, en la que el personal del archivo puede cargar información que es validada instantáneamente por la red descentralizada, emitiendo certificados de integridad digital verificables para cada documento. Este enfoque ha permitido reducir el retrabajo, mejorar la trazabilidad entre el diseño y la implementación, y fortalecer la calidad de la lógica sistémica. En conclusión, el proyecto no solo soluciona el problema de la gestión documental deficiente, sino que establece un estándar de ingeniería moderna que alinea a la institución con la normativa legal colombiana y la vanguardia tecnológica. Se recomienda la implementación total de los módulos de consulta y reportería para consolidar a BLOCKDOCU como una herramienta integral de preservación y seguridad de la información universitaria.

Palabras clave — blockchain, metadato, desarrollo de software, inteligencia artificial.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión documental en las instituciones de educación superior constituye un pilar fundamental para la transparencia administrativa, la memoria histórica regional y la garantía de derechos ciudadanos como el acceso a la información pública y la protección de datos personales, cuando un registro es evaluado y catalogado como documento histórico, pasa a integrar el patrimonio documental institucional y debe conservarse de manera permanente, lo que exige mecanismos confiables que aseguren su autenticidad, integridad y disponibilidad a lo largo del tiempo.

En la Oficina de Gestión Documental y Archivo de la Universidad de Nariño, este pilar se encuentra comprometido, pues, la gestión de documentos sensibles como las historias laborales se desarrolla actualmente mediante procedimientos manuales y soportes físicos, sin un sistema de información que registre préstamos, devoluciones y consultas, esta condición impide garantizar la trazabilidad y recuperación oportuna de expedientes de alto valor legal requeridos para trámites de pensión y certificaciones, y dificulta el cumplimiento de la Ley 594 de 2000, la Ley 1581 de 2012 y la Ley 1712 de 2014.

A estos riesgos jurídicos se suman riesgos biológicos para el personal de custodia derivados de la manipulación constante de soportes físicos en ambientes con humedad y microorganismos, situación documentada por Alonso et al [1] en archivos institucionales con incidencias de enfermedades respiratorias superiores al 54 % de los trabajadores expuestos.

Frente a esta problemática, este articulo propone BLOCKDOCU, como una arquitectura híbrida de gestión documental que integra una red blockchain local basada en Ethereum Anvil, hashing criptográfico SHA-256, indexación de metadatos bajo el estándar internacional Dublin Core y firma digital mediante la criptobilletera MetaMask, estableciendo un

modelo de confianza digital donde cualquier alteración del documento es detectable mediante la inmutabilidad del registro distribuido, garantizando autenticidad del emisor, integridad del contenido y trazabilidad verificable de las operaciones.

El desarrollo del sistema se realizó bajo un enfoque de spec-driven development asistido por agentes de inteligencia artificial empleados en la refinación del product backlog, la detección de inconsistencias en historias de usuario y la generación automatizada de código.

Asimismo, se empleó un sistema de agentes basado en modelos de lenguaje de gran escala (LLM) para la generación automatizada de historias de usuario y la detección de inconsistencias, asegurando una transición fluida hacia la generación de código [2].

Este trabajo responde a dos preguntas de investigación: ¿cómo contribuye una arquitectura híbrida basada en blockchain local a garantizar la autenticidad e integridad documental en una institución pública de educación superior?, y ¿qué impacto tiene la integración de agentes de inteligencia artificial en el ciclo de desarrollo de un sistema de gestión documental?

II. Trabajos Relacionados

El estado del arte en la integridad documental y la ingeniería de software ha evolucionado hacia la descentralización de la confianza y la automatización de procesos, de tal manera, esta sección analiza las propuestas existentes divididas en tres ejes: sistemas de verificación basados en blockchain, estandarización de metadatos y aseguramiento de la calidad.

A. Sistemas de Notarización y Verificación con Blockchain

La literatura reporta diversas arquitecturas para la autenticación de documentos, diferenciándose principalmente por el tipo de red y el mecanismo de consenso empleado.

En una aproximación inicial, Imam et al. [3] propusieron DOC-BLOCK, una aplicación descentralizada sobre la red Ethereum que utiliza el mecanismo de Proof-of-Work (PoW). Su enfoque combina criptografía de clave pública y almacenamiento P2P para establecer un proceso de verificación abierto y auditable.

En contraste con las redes públicas, Shinde et al. [4] desarrollaron Doc-Chain, una plataforma orientada específicamente al ámbito universitario que emplea Hyperledger Fabric. Al ser una red permisionada, permite un control más granular sobre la privacidad de los certificados académicos, reforzado con cifrado simétrico AES-256 en modo CBC.

Por su parte, Rani et al. [5] introdujeron el marco BT-CNV, el cual busca un equilibrio entre transparencia y eficiencia mediante un mecanismo de consenso especializado denominado EduCM, basado en Proof-of-Authority (PoA). Esta solución destaca por la integración de IPFS para el almacenamiento descentralizado, optimizando la persistencia de los datos mediante funciones hash SHA-256 y firmas ECDSA.

Respecto a la trazabilidad y el seguimiento histórico, Zhai et al. [6] diseñaron el esquema TVS (Trusted Verification Scheme), este sistema utiliza contratos inteligentes y sellos de tiempo (timestamps) para monitorear cambios de estado en documentos de oficina en tiempo real, garantizando la objetividad de los registros.

De manera complementaria, Nizamuddin et al. [7] propusieron un modelo de control de versiones descentralizado sobre Ethereum. Su arquitectura elimina la dependencia de autoridades centrales, permitiendo la colaboración multiusuario y el rastreo inmutable de cambios mediante la vinculación de contratos inteligentes con el sistema de archivos IPFS.

B. Estándares de Metadatos y Adaptabilidad (Dublin Core)

La interoperabilidad de los sistemas documentales depende de una gestión de metadatos robusta y flexible.

Zhang [2] analizó la implementación del estándar Dublin Core en el proyecto de Bibliotecas Digitales Chinas (CDLS), demostrando que es posible extender este estándar mediante mecanismos de campos dinámicos para soportar múltiples esquemas en entornos a gran escala.

Esta flexibilidad se traduce en eficiencia técnica en el trabajo de Kang, et al. [8], quienes desarrollaron un sistema de codificación específico para el elemento "Tema" (Subject) de Dublin Core. Su enfoque permite la generación de identificadores únicos para contenidos digitales, lo que mejora significativamente los tiempos de recuperación y la organización del almacenamiento. Estas investigaciones validan la selección de Dublin Core como el núcleo de indexación para BLOCKDOCU, asegurando que el sistema sea escalable y compatible con estándares internacionales.

C. Automatización y Aseguramiento de Calidad de Software

El rigor en la construcción de sistemas descentralizados se beneficia directamente de la automatización del ciclo de vida del desarrollo.

Hsu et al. [9] presentaron un mecanismo de Aseguramiento Automático de Calidad que integra pruebas automatizadas y seguimiento de defectos bajo un esquema de Integración Continua (CI). Aunque su enfoque es generalista, subraya una premisa crítica para la presente investigación: la automatización reduce drásticamente el error humano y los costos de comunicación en entornos ágiles. Este principio justifica la implementación de un enfoque dirigido por características asistido por inteligencia artificial en este proyecto, orientado al refinamiento del backlog y la optimización de la calidad del código fuente.

III. Arquitectura del Sistema

A continuación, se presenta el flujo de uso de la aplicación sobre la arquitectura en la Figura 1., mostrando cómo interactúan los diferentes actores del sistema desde la solicitud inicial de acceso a la información hasta el cierre de los servicios documentales.

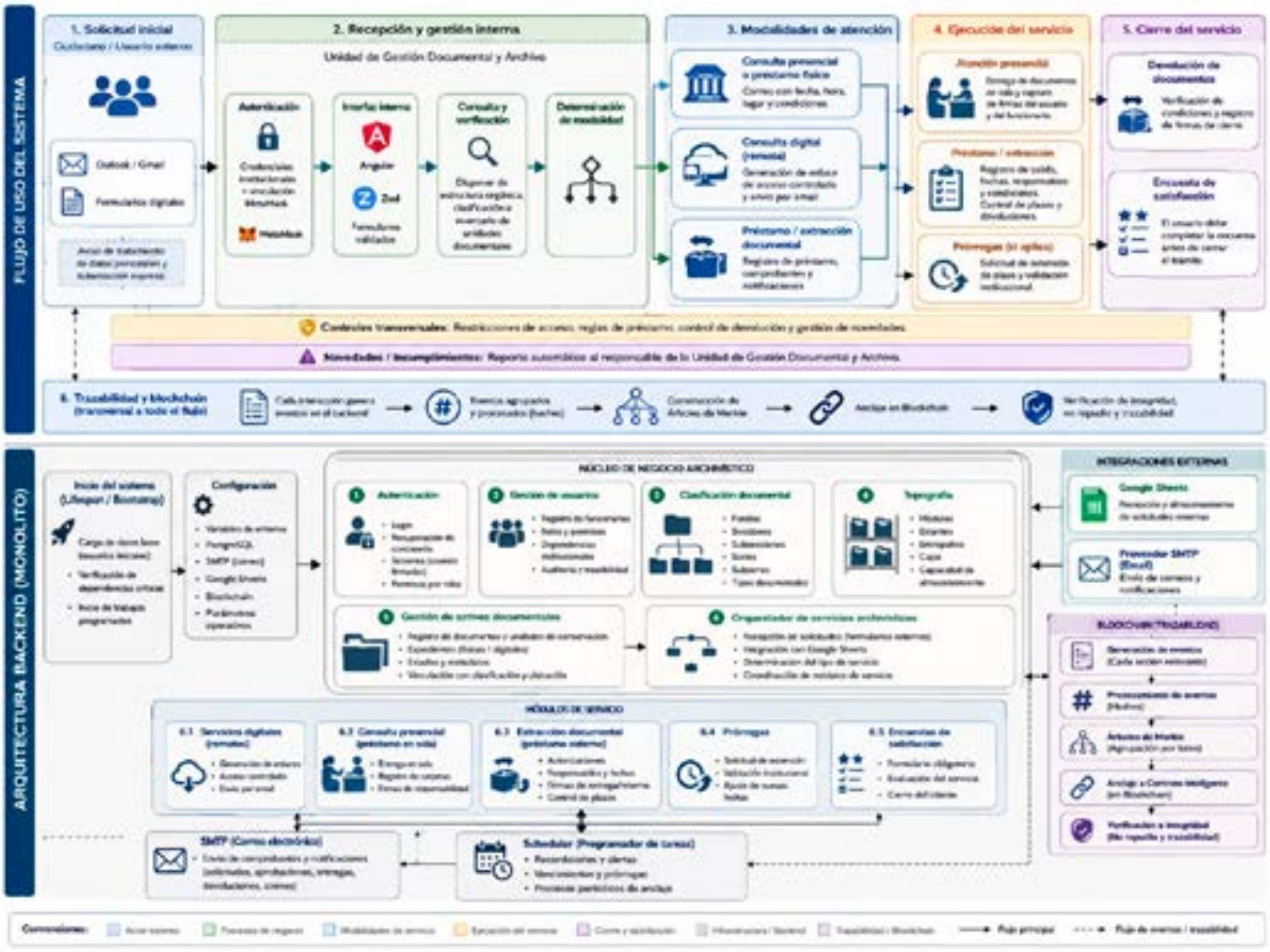


Fig 1. Diagrama de Arquitectura

El flujo inicia con los usuarios del servicio o ciudadanos, quienes presentan solicitudes de consulta, préstamo o acceso a documentos mediante formularios electrónicos dispuestos por la institución a través de canales como Outlook, Gmail o formularios digitales integrados. Antes de completar cualquier solicitud, el sistema informa al usuario sobre el tratamiento de sus datos personales y solicita su autorización expresa, requisito necesario para procesar la solicitud y habilitar futuras notificaciones electrónicas.

Una vez enviada la solicitud, esta ingresa al sistema y es recibida por los auxiliares y funcionarios de la Unidad de Gestión Documental y Archivo, quienes interactúan con la aplicación mediante un cliente frontend desarrollado en Angular. Desde esta interfaz gestionan las solicitudes utilizando formularios validados con esquemas de Zod, asegurando que toda la información registrada cumpla con las reglas definidas por la lógica de negocio y evitando inconsistencias operativas.

Antes de realizar cualquier acción dentro del sistema, los funcionarios deben autenticarse mediante sus credenciales institucionales y asociar su cuenta con MetaMask. Esto permite controlar el acceso al sistema y vincular criptográficamente cada acción ejecutada por los responsables de los trámites.

Una vez autenticados, los funcionarios consultan la solicitud recibida y verifican la disponibilidad de los documentos requeridos. Para ello pueden administrar la estructura orgánica institucional, la clasificación documental y el inventario de unidades documentales bajo custodia, permitiendo identificar si los documentos solicitados existen en formato físico, digital o en ambos soportes.

A partir de esta validación, el sistema determina la modalidad de atención correspondiente. Si el usuario solicita una consulta presencial o un préstamo físico, el sistema envía automáticamente un correo electrónico indicando la fecha, hora, lugar y condiciones bajo las cuales podrá acceder a la documentación.

Cuando el ciudadano se presenta en la Unidad de Gestión Documental y Archivo, los funcionarios registran desde la aplicación la entrega de los documentos y capturan las firmas tanto del usuario como del responsable del trámite, dejando evidencia formal de la operación.

Si los documentos cuentan con soporte digital disponible, el proceso se simplifica mediante atención remota. En este caso, el sistema genera enlaces de acceso controlado y los envía al correo

electrónico del usuario autorizado, permitiéndole consultar únicamente la documentación aprobada.

En los casos donde los documentos deben salir temporalmente de custodia institucional, el sistema registra los préstamos documentales, genera comprobantes y envía notificaciones automáticas a los responsables involucrados, manteniendo control sobre fechas de devolución, responsables y condiciones del préstamo.

Durante toda la prestación del servicio, el sistema aplica restricciones de acceso, reglas de préstamo y controles de devolución. Si se presenta alguna inconsistencia, incumplimiento o novedad, esta es reportada automáticamente al responsable de la Unidad de Gestión Documental y Archivo para su respectiva gestión.

El trámite finaliza cuando los documentos son devueltos dentro de los tiempos establecidos y en las mismas condiciones en las que fueron entregados. En este punto, el sistema vuelve a registrar firmas para dejar constancia formal del cierre del servicio.

De manera transversal, cada interacción dentro del flujo — desde la solicitud inicial del ciudadano hasta la devolución final de los documentos— genera eventos registrados por el backend. Estos eventos son agrupados, procesados mediante hashes y organizados en Árboles de Merkle para optimizar el uso de blockchain.

Finalmente, los registros consolidados son anclados en blockchain, permitiendo verificar la integridad de cada operación realizada y garantizando trazabilidad, no repudio y protección de los datos personales de los usuarios durante todo el ciclo del servicio documental.

En segundo lugar, la composición del backend de la aplicación sigue un hilo operativo que inicia desde el arranque del sistema, continúa con la gestión de usuarios y documentos, y culmina en la prestación de servicios archivísticos con mecanismos de trazabilidad e integridad, de tal manera, la intención de esta arquitectura es que cada componente participe dentro de un flujo continuo del negocio archivístico y no como módulos aislados.

El ciclo comienza con el componente principal y de lifespan, encargado de iniciar la aplicación y preparar el entorno de ejecución. Cuando el sistema arranca, este componente realiza la carga de datos base como credenciales de usuarios iniciales, verifica dependencias críticas y pone en funcionamiento los trabajos programados necesarios para la operación. Su función es centralizar el proceso de bootstrap de la aplicación y las tareas operativas recurrentes sin depender de orquestadores externos innecesarios.

Una vez iniciado el sistema, entra en funcionamiento el componente de configuración, que carga desde variables de entorno las credenciales y parámetros necesarios para la operación, como la conexión con PostgreSQL, las credenciales SMTP para correo electrónico, la integración con Google Sheets y la conexión con blockchain. Esto permite mantener la infraestructura desacoplada de la lógica de negocio y habilitar o deshabilitar integraciones según las necesidades operativas.

Con la configuración lista, el sistema habilita el componente de base de datos, encargado de administrar la conexión con PostgreSQL y gestionar las sesiones transaccionales por cada solicitud realizada al sistema. Este componente garantiza un acceso estandarizado a los datos y sirve como base para todos los procesos posteriores.

Sobre esta infraestructura operativa se construye la interacción inicial con los usuarios mediante el componente de autenticación, el cual gestiona el inicio de sesión, recuperación de contraseñas, manejo de sesiones mediante cookies firmadas y validación de permisos según roles. Desde la interfaz de usuario, aquí ocurre el primer punto de interacción directa: los funcionarios internos acceden mediante pantallas de acceso, recuperación de credenciales y paneles restringidos según su nivel de acceso.

Después de autenticarse, los usuarios interactúan con el componente de gestión de usuarios, donde desde una interfaz administrativa se registran funcionarios, se asignan roles, permisos y dependencias institucionales. Esto garantiza que cada acción ejecutada dentro del sistema pueda asociarse a una persona responsable, fortaleciendo los procesos de auditoría, trazabilidad y control dentro de la Unidad de Gestión Documental y Archivo.

Una vez definida la estructura organizacional de los usuarios, el sistema aborda el núcleo archivístico mediante el componente de clasificación documental, responsable de administrar fondos, secciones, subsecciones, series, subseries y tipos documentales. Desde la interfaz, los administradores archivísticos pueden crear, modificar y consultar esta estructura jerárquica, la cual posteriormente será utilizada para organizar los documentos y definir restricciones de acceso.

Con la clasificación establecida, el flujo continúa hacia el módulo de topografía, encargado de representar la ubicación física de los documentos mediante módulos, estantes, entrepaños y cajas, incluyendo la capacidad de almacenamiento de cada una. A través de una interfaz visual, los archivistas pueden registrar ubicaciones físicas y consultar dónde se encuentra cada documento sin mezclar esta información con los metadatos archivísticos.

Posteriormente, el sistema integra clasificación y ubicación física mediante el componente de gestión de activos documentales, donde se administran los documentos y sus unidades de conservación, como carpetas físicas o archivos digitales. Desde la interfaz, los usuarios internos registran nuevos activos documentales, consultan expedientes y actualizan su estado, conectando así la descripción archivística con su soporte y ubicación.

Con los activos documentales registrados, el backend habilita el orquestador de servicios archivísticos, encargado de gestionar la interacción con usuarios externos e internos que requieren acceso a la documentación. El flujo inicia cuando un usuario externo realiza una solicitud de consulta mediante formularios electrónicos disponibles en la interfaz pública. Estas solicitudes son recibidas y almacenadas mediante la integración con Google Sheets.

A partir de esta solicitud, el sistema determina el tipo de servicio requerido. Si se trata de un acceso digital, el módulo de

servicios digitales genera enlaces controlados de consulta y los envía automáticamente al usuario mediante correo electrónico. Desde la interfaz externa, el usuario recibe el enlace por medio de email y accede únicamente a los documentos autorizados.

Si la solicitud requiere consulta presencial, el sistema gestiona desde una interfaz interna el préstamo en sala, incluyendo procesos de entrega, recepción y firmas de responsabilidad sobre las carpetas consultadas.

Cuando los documentos deben salir físicamente de las instalaciones, entra en funcionamiento el servicio de extracción documental, donde desde la interfaz se registran autorizaciones, responsables, fechas de devolución y firmas de entrega y retorno. El sistema también aplica reglas automáticas ante incumplimientos en los tiempos establecidos como notificaciones automáticas a Control Interno y a los responsables de custodia documental.

Si el usuario requiere más tiempo para conservar los documentos extraídos, puede interactuar desde la interfaz con el módulo de prórrogas, que permite solicitar extensiones de plazo sujetas a validación institucional.

Una vez finalizado cualquier servicio, el flujo concluye obligatoriamente con el módulo de encuestas de satisfacción, donde los usuarios deben completar formularios desde la interfaz antes de cerrar formalmente el trámite.

Durante cada uno de estos movimientos, el sistema genera automáticamente comprobantes enviados por correo electrónico mediante el componente SMTP, notificando a los usuarios sobre solicitudes, aprobaciones, entregas, devoluciones o cierres de servicio sin afectar el rendimiento de las solicitudes principales.

De manera complementaria, el scheduler o programador de tareas ejecuta tareas recurrentes como recordatorios, alertas de vencimiento y procesos periódicos de anclaje de información, resolviendo procesos automáticos dentro del mismo monolito sin necesidad de incorporar colas o workers externos.

Finalmente, todo el flujo culmina en el componente de blockchain, encargado de registrar los eventos críticos de custodia documental, pues, cada acción realizada por usuarios internos o externos desde la interfaz genera eventos que son registrados, encadenados mediante hashes y agrupados por lotes para posteriormente anclarse a un contrato inteligente. Esto permite garantizar integridad, no repudio y trazabilidad sobre la custodia documental, evitando además exponer datos personales directamente en blockchain al registrar únicamente eventos verificables.

IV. Implementación

La implementación del sistema BLOCKDOCU se basa en una arquitectura de servicios de infraestructura en contenedores que soportan una aplicación web de alta integridad. El sistema garantiza la inmutabilidad de los documentos y la transparencia de los procesos mediante la integración de tecnologías Web3 y almacenamiento de objetos.

A. Infraestructura y Gestión del Mono repositorio

Con el propósito de garantizar la consistencia del entorno de desarrollo y simplificar la administración de los servicios, se adoptó una arquitectura basada en contenedores mediante Docker bajo un esquema de mono repositorio, esta configuración permite orquestar de manera eficiente la aplicación y sus servicios de soporte como se muestra en la Figura 2:

Anvil (ecosistema Foundry): Se emplea como nodo local de Ethereum de alta velocidad. Proporciona un entorno determinista con cuentas preconfiguradas, facilitando las pruebas de integración y validación de los contratos inteligentes antes de su interacción con el frontend [10].

MinIO (almacenamiento de objetos): Implementado para la gestión y almacenamiento de recursos digitales y archivos PDF de forma local, el enfoque de almacenamiento de objetos permite tratar los documentos como entidades independientes, garantizando escalabilidad y compatibilidad con el estándar S3 sin depender de servicios de nube externos [11].

PostgreSQL: Utilizado como motor de persistencia relacional para la gestión de metadatos, registros de auditoría y estados intermedios de los documentos.

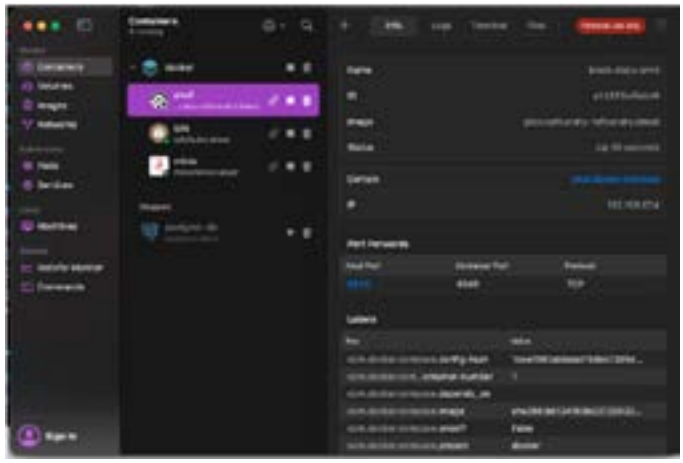


Fig 2 Estado de los servicios por contenedores en Docker.

B. Flujo de Notarización y Estandarización de Metadatos

El sistema adopta el estándar Dublin Core Metadata Element Set (DCMES) para la descripción documental, Aunque este estándar contempla 15 elementos básicos [12], BLOCKDOCU implementa una selección estratégica de campos adicionales con el fin de optimizar el registro sin comprometer la riqueza descriptiva requerida por la Unidad de Gestion Documental y Archivo.

Como documentó E. Banski, la implementación de Dublin Core en repositorios académicos demuestra que el estándar puede adaptarse a las necesidades de grandes colecciones digitales sin requerir una infraestructura técnica excesivamente compleja [13]. El proceso sigue un flujo secuencial:

1) Cálculo de hash (SHA-256)

Se genera una huella digital única del archivo PDF. Debido a la naturaleza determinista del algoritmo, cualquier modificación mínima en el documento produce un hash diferente, invalidando su verificación [14].

2) Firma criptográfica con MetaMask:

La transacción es gestionada mediante el proveedor Web3 MetaMask, donde el usuario autoriza el registro del hash en el smart contract conectándose a la red local de blockchain, tal como se muestra en las Figuras 3 y 4.

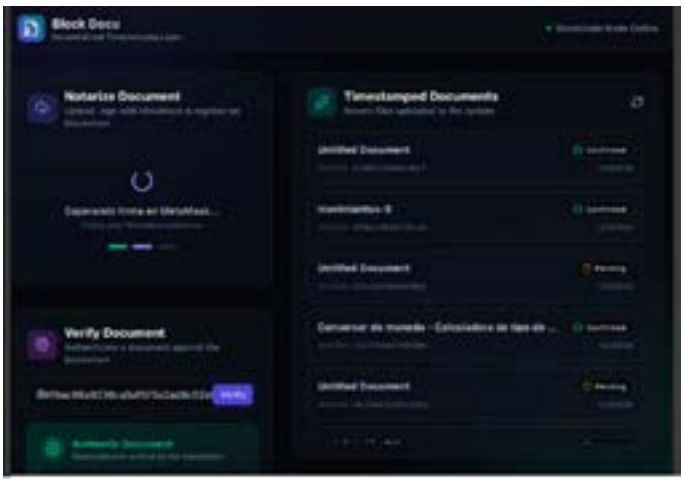


Fig 3 Interfaz de usuario para el diligenciamiento de elementos y validación de firma mediante MetaMask 1



Fig 4 Interfaz de usuario para el diligenciamiento de elementos y validación de firma mediante MetaMask 2

3) Smart Contract, Registro Inmutable y Lógica de Confianza

La base de confianza del sistema reside en un smart contract desarrollado en Solidity, el cual funciona como un mecanismo descentralizado de fe pública digital. Según la revisión sistemática de Sujeetha y Deiva Preetha [15], la naturaleza inmutable de estos componentes exige procesos de validación rigurosos, dado que la ausencia de un ciclo de vida de desarrollo de software (SDLC) estándar puede comprometer la fiabilidad y seguridad de las aplicaciones en blockchain. Bajo esta premisa, el componente lógico de BLOCKDOCU garantiza la integridad documental mediante un proceso de notarización que asocia permanentemente el hash SHA-256 de los archivos con la firma digital del emisor y una marca temporal inmutable, permitiendo así una trazabilidad completa y una verificación transparente de los documentos almacenados en el Archivo Central sin depender de intermediarios.

4) Verificación y Persistencia en el Backend

Una vez confirmada la transacción en la blockchain, el backend documentado mediante Swagger coordina el almacenamiento definitivo del documento y la actualización de los registros persistentes. El proceso inicia con la transferencia segura del archivo PDF hacia un bucket en MinIO como se muestra en la Figura 5, garantizando un almacenamiento centralizado, escalable y compatible con arquitecturas distribuidas. De manera simultánea, la base de datos PostgreSQL se actualiza para reflejar el estado del documento como "Notarizado" y almacenar el identificador de la transacción (TxHash) como evidencia técnica verificable de la operación realizada en la blockchain., además se muestra la documentación automática con Swagger en la Figura 6

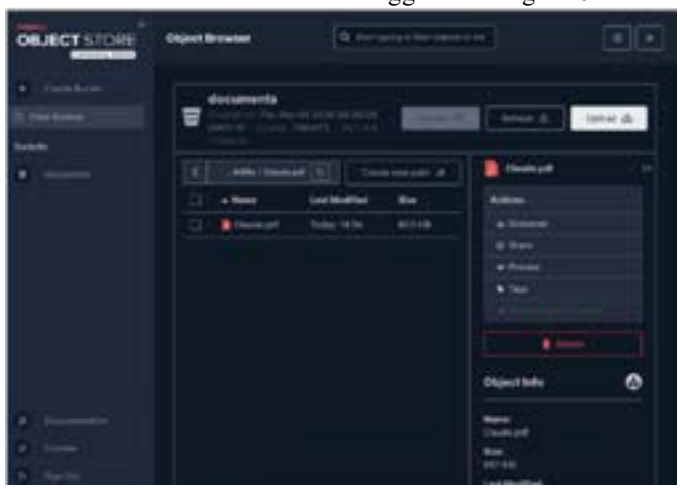


Fig 5 confirmación del almacenamiento exitoso en el Object Browser de MinIO



Fig 6: Documentación de la API en Swagger, donde se detallan los endpoints

V. Resultados y Validación

A. Pruebas Automatizadas con Pytest

A continuación, se presentan las pruebas automatizadas con Pytest, donde cada módulo tiene sus respectivas pruebas, lo que

se realizo fue ejecutar varias pruebas con datos aleatorios y se recogieron los valores en la Tabla I.

TABLA I. Consolidado de Pruebas Automatizadas con Pytest

Métrica	Valor
Total, de pruebas	169
Pruebas aprobadas	128
Pruebas no aprobadas (falladas + error)	41
Porcentaje de tests pasados	75.74%
Porcentaje de tests fallados	24.26%

A continuación, se muestra una selección de pruebas, fueron escogidas las consideradas mas relevantes para demostrar el funcionamiento de la aplicación y todas tuvieron resultado de aprobación durante su ejecución, asi se puede observar en la Tabla II..

TABLA II. Selección de Pruebas Automatizadas con Pytest

Test	Tests Incluidos	Importancia
test_verification_endpoints.py	Verificación de servicio y unidad documental, detección de tampering, integridad de cadena	Valida el núcleo del sistema de evidencia de custodia blockchain. Detecta manipulación de eventos.
test_anchoring.py	Anclaje exitoso, determinismo de batch_root, asignación de eventos a lotes	Verifica la escritura en blockchain y el cálculo correcto de raíces de lote.
test_hashing.py	Selección determinista, SHA-256 para cuando existan varios documentos con el mismo contenido, encadenamiento, detección de tampering	Fundamento criptográfico de toda la cadena de custodia. Si falla, toda la integridad se compromete.
test_login.py	Login exitoso, contraseña incorrecta, usuario sin autenticación, logout, sesión activa	Puerta de entrada al sistema. Fallos aquí permiten acceso no autorizado o bloquean usuarios legítimos.
test_solicitudes.py	Crear solicitud, aprobar (crea servicio), rechazar con/sin justificación, estados, filtros	Flujo de negocio principal del sistema. Aprobación crea servicios; errores pueden generar inconsistencias.
test_busqueda.py	Búsqueda por nombre, case-insensitive, número expediente, filtrado por estado, topografía	Funcionalidad de consulta más usada. Afecta directamente la experiencia del usuario y operación diaria.
test_derechos_acceso.py	Registrar derecho, revocación, filtros, granularidad (UD/serie), validación de alcance	Control de acceso a información sensible. Fallos pueden exponer datos confidenciales o bloquear acceso legítimo.

Es preciso mencionar que el proyecto tiene ~30 archivos de test cubriendo: evidencia de custodia, autenticación, solicitudes, usuarios, unidades documentales, topografía, clasificación y servicios.
Los tests de evidencia de custodia son los más completos debido a la complejidad del dominio blockchain.

B. Pruebas con SUS (Sistema de Escalas de Usabilidad)

El método en cuestión es una herramienta ágil para evaluar la usabilidad de cualquier sistema. El Sistema de Evaluación de Usabilidad (SUS) ha estado en uso durante más de 30 años y permite analizar aspectos como la eficacia, eficiencia y satisfacción del usuario. Cuenta con enunciados predefinidos que facilitan el cálculo del resultado final. Además, su aplicación es breve para los participantes, ya que las respuestas se califican en una escala de Likert, donde 1 corresponde a "Totalmente en desacuerdo" y 5 a "Totalmente de acuerdo".

El proceso consistió en evaluar el software mediante la participación de tres funcionarios de la Unidad de Gestión Documental y Archivo, quienes poseen perfiles profesionales diversos, se recopilaron sus respuestas a través del instrumento SUS y se documentaron sus observaciones en oraciones sencillas con el fin de identificar posibles mejoras para futuras versiones del sistema.
A continuación, se muestra la Tabla III de resultados para los 3 usuarios de la aplicación.

TABLA III. Resultados SUS

Ítem SUS	Ingeniero de Sistemas	Auditor de Calidad	Archivista
Creo que a los usuarios les gustaría usar este sistema con frecuencia.	4	4	5
Encontré el sistema innecesariamente complejo.	2	3	2
Me pareció que el sistema era fácil de usar.	5	4	4
Creo que un usuario necesitaría apoyo técnico para usar esto.	1	2	3
Las funciones del sistema están bien integradas.	5	4	4
Me pareció que había demasiada inconsistencia en el sistema.	1	2	2
Imagino que la mayoría de la gente aprendería a usarlo muy rápido.	5	4	4

Encontré el sistema muy engorroso de utilizar.	1	2	2
Me sentí muy seguro al usar el sistema.	5	4	4
Tuve que aprender muchas cosas antes de poder usarlo.	1	2	3

Cálculo del SUS Score
Ingeniero de Sistemas
Suma de impares (1, 3, 5, 7, 9): 4 + 5 + 5 + 5 + 5 = 24
Suma de pares (2, 4, 6, 8, 10): 2 + 1 + 1 + 1 + 1 = 6
Puntaje SUS: (24 - 5) + (25 - 6) * 2.5 = 19 + 47.5 = 66.5

Auditor de Calidad
Suma de impares (1, 3, 5, 7, 9): 4 + 4 + 4 + 4 + 4 = 20
Suma de pares (2, 4, 6, 8, 10): 3 + 2 + 2 + 2 + 2 = 11
Puntaje SUS: (20 - 5) + (25 - 11) * 2.5 = 15 + 35 = 50

Archivista
Suma de impares (1, 3, 5, 7, 9): 5 + 4 + 4 + 4 + 4 = 21
Suma de pares (2, 4, 6, 8, 10): 2 + 3 + 2 + 2 + 3 = 12
Puntaje SUS: (21 - 5) + (25 - 12) * 2.5 = 16 + 32.5 = 48.5

Interpretación de Resultados
Ingeniero de sistemas (66.5): Bueno
Percibe el sistema como bien integrado, fácil de usar y con baja complejidad. Sin embargo, considera que podría mejorar en consistencia y reducción de curva de aprendizaje.

Auditor de Calidad (50): Aceptable
Ve oportunidades de mejora en la complejidad, necesidad de apoyo técnico y consistencia. Sugiere optimizar la experiencia de usuario para reducir la percepción de molestia.

Archivista (48.5): Aceptable.
Valora la frecuencia de uso y la integración de funciones, pero considera que requiere cierto apoyo técnico y aprendizaje previo. La seguridad y facilidad de uso son puntos fuertes.

Resumen de los comentarios:
1. Simplificar flujos críticos y mejorar la documentación para usuarios no técnicos.
2. Unificar patrones de diseño y comportamiento en todas las funcionalidades.
3.Incluir guías contextuales (tutoriales interactivos) para reducir la dependencia de soporte técnico.
4.Priorizar el diseño intuitivo y minimizar la necesidad de capacitación previa.

VI. Discusión

El desarrollo del sistema permitió identificar que uno de los principales desafíos en la implementación de tecnologías emergentes dentro de la gestión documental radica en la desconexión existente entre el avance tecnológico y su aplicación en contextos institucionales reales.

Aunque tecnologías como blockchain han sido ampliamente estudiadas desde perspectivas técnicas y financieras, su aplicación en procesos archivísticos continúa siendo limitada, esta situación evidencia una tendencia recurrente en la investigación tecnológica: priorizar el desarrollo conceptual de herramientas innovadoras sin profundizar suficientemente en problemas estructurales de sectores tradicionales que también requieren transformación.

Asimismo, el proceso investigativo permitió cuestionar la idea de que la innovación tecnológica, por sí sola, garantiza mejoras organizacionales.

La integración de múltiples componentes dentro de una arquitectura funcional demostró que implementar soluciones de este tipo exige procesos complejos de adaptación, interoperabilidad y planificación.

Desde una postura crítica, resulta problemático que muchas iniciativas de transformación digital se enfoquen en incorporar tecnologías emergentes como un símbolo de modernización, sin evaluar de manera rigurosa su viabilidad operativa y sostenibilidad institucional.

Por otra parte, las dificultades presentadas por los usuarios durante las pruebas iniciales evidenciaron que el factor humano continúa siendo uno de los elementos más subestimados en los procesos de innovación.

La resistencia al cambio y la falta de apropiación tecnológica no representan fallas de los usuarios, sino consecuencias de estrategias institucionales que frecuentemente priorizan la infraestructura sobre la formación y adaptación cultural. Esto demuestra que cualquier transformación tecnológica requiere una visión integral que contemple tanto los recursos técnicos como las capacidades humanas.

En ese sentido, aunque blockchain mostró un potencial importante para fortalecer la trazabilidad, integridad y confiabilidad documental, su implementación no debe asumirse como una solución universal, su verdadero valor depende de responder a necesidades concretas y de estar acompañada por estrategias sostenibles de adopción, de lo contrario, existe el riesgo de reproducir modelos de innovación superficiales que incorporan tecnología avanzada sin generar transformaciones estructurales reales.

VII. Conclusiones y Visión Futura

El desarrollo de BLOCKDOCU evidenció que la incorporación de tecnologías emergentes en gestión documental enfrenta vacíos académicos y metodológicos, con una escasa relación entre blockchain, Industria 4.0 y las necesidades institucionales.

Además, la transformación digital enfrenta desafíos más allá de lo técnico, como la resistencia al cambio y la falta de formación.

Aunque blockchain puede aportar valor en trazabilidad e integridad, su impacto requiere una adopción crítica y alineada con las capacidades institucionales.

En consecuencia, la innovación en el sector público debe responder también a problemas estructurales, priorizando soluciones sostenibles y centradas en las personas.

A futuro se planea expandir la función y la adopción de la aplicación a otras dependencias de la misma institución, pues se requiere articular con instrumentos archivísticos como las tablas de retención documental y facilitar el acceso a la información como principal objetivo.

Para lo anterior se requiere adquisición de una infraestructura que soporte por lo menos 800 usuarios quienes representan los funcionarios responsables de los archivos de gestión en la institución, lo cual a su vez implica la necesidad de capacitación tanto en Gestión Documental y Archivística como en tecnologías blockchain para la protección y garantía de los derechos de acceso a la información y el cumplimiento de las leyes de transparencia y protección de datos personales.

REFERENCIAS

[1] S. F. Borrego Alonso, O. Herrera Barrios, I. Paneque Rodríguez., S. F. Borrego Alonso, O. Herrera Barrios, y I. Paneque Rodríguez., "Calidad micológica ambiental en archivos cubanos y su impacto en la salud del personal", *An. Acad. Cienc. Cuba*, vol. 11, núm. 3, dic. 2021, Consultado: el 9 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2304-01062021000300023&lng=es&nrm=iso&tlng=es

[2] M. A. Sami *et al.*, "A Multi-agent LLM System for Automated Requirements Analysis: A Study on User Story Generation and Prioritization", en *Software Engineering and Advanced Applications*, vol. 16082, D. Taibi y D. Smite, Eds., en Lecture Notes in Computer Science, vol. 16082. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2026, pp. 178–187. doi: 10.1007/978-3-032-04200-2_12.

[3] I. T. Imam, Y. Arafat, K. S. Alam, y S. A. Shahriyar, "DOC-BLOCK: A Blockchain Based Authentication System for Digital Documents", en *2021 Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV)*, Tirunelveli, India: IEEE, feb. 2021, pp. 1262–1267. doi: 10.1109/ICICV50876.2021.9388428.

[4] R. Shinde, S. Chorghe, K. Dhanani, y A. Salunke, "Doc-Chain: A University Document Verification Blockchain", en *2022 IEEE International Conference on Blockchain and Distributed Systems Security (ICBDS)*, Pune, India: IEEE, sep. 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICBDS53701.2022.9935950.

[5] P. Rani, R. K. Sachan, y S. Kukreja, "BT-CNV: A distributed and decentralized solution for certificate notarization and verification for academia using public blockchain", *Peer--Peer Netw. Appl.*, vol. 18, núm. 1, p. 60, ene. 2025, doi: 10.1007/s12083-024-01889-3.

[6] X. Zhai, S. Pang, M. Wang, S. Qiao, y Z. Lv, "TVS: a trusted verification scheme for office documents based on blockchain", *Complex Intell. Syst.*, vol. 9, núm. 3, pp. 2865–2877, jun. 2023, doi: 10.1007/s40747-021-00617-1.

[7] N. Nizamuddin, K. Salah, M. Ajmal Azad, J. Arshad, y M. H. Rehman, "Decentralized document version control using ethereum blockchain and IPFS", *Comput. Electr. Eng.*, vol. 76, pp. 183–197, jun. 2019, doi: 10.1016/j.compeleceng.2019.03.014.

[8] L. Kang, B. Yuanyuan, y X. Zhanhong, "The metadata encoding of digital content", en *2011 International Conference on E-Business and E-Government (ICEE)*, Shanghai, China: IEEE, may 2011, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICEBEG.2011.5882057.

[9] W. Hsu, J.-S. Lin, Y.-C. Chen, C.-Y. Wang, y C.-T. Huang, "An Automatic Software Quality and Function Assurance Case Study for Agile", en *Web, Artificial Intelligence and Network Applications*, vol. 1150, L. Barolli, F. Amato, F. Moscato, T. Enokido, y M. Takizawa, Eds., en Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1150. , Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 519–525. doi: 10.1007/978-3-030-44038-1_47.

[10] "Anvil integration". Consultado: el 9 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://web3-ethereum-defi.tradingstrategy.ai/api/provider/_autosummary_provider/eth_defi.provider.anvil

[11] H. Astsatryan, "Performance-Driven and Cost-Efficient Convergence of Cloud and HPC: Evaluating MinIO and LustreFS", *Balt. J. Mod. Comput.*, vol. 13, núm. 1, 2025, doi: 10.22364/bjmc.2025.13.1.10.

[12] S. Weibel, "The Dublin Core: A Simple Content Description Model for Electronic Resources", *Bull. Am. Soc. Inf. Sci. Technol.*, vol. 24, núm. 1, pp. 9–11, oct. 1997, doi: 10.1002/bult.70.

[13] E. Banski, "Implementation of Dublin Core at the University of Alberta Libraries", *OCLC Syst. Serv. Int. Digit. Libr. Perspect.*, vol. 18, núm. 3, pp. 130–138, sep. 2002, doi: 10.1108/10650750210439340.

[14] R. K. Salih y A. H. Kashmar, "Enhancing Blockchain Security by Developing the SHA256 Algorithm", *Iraqi J. Sci.*, pp. 5678–5693, oct. 2024, doi: 10.24996/ijs.2024.65.10.30.

[15] R. Sujeetha y C. A. S. Deiva Preetha, "A Literature Survey on Smart Contract Testing and Analysis for Smart Contract Based Blockchain Application Development", en *2021 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, Trichy, India: IEEE, oct. 2021, pp. 378–385. doi: 10.1109/ICOSEC51865.2021.9591750.

Smart Modular Solar-Powered Aquaponics Systems for Sustainable Food Production in Rural Communities

Jhoan Sebastian Parra Quiroga
Universidad del Valle
Cali, Colombia
jhoan.parra@correounivalle.edu.co

Andrés Fernando Restrepo Alvarez
Universidad del Valle
Cali, Colombia
Laboratorio de Simulación y Procesos SAS
Cartagena, Colombia
andres.restrepo@correounivalle.edu.co

Raul Alberto Acosta Herazo
Laboratorio de Simulación y Procesos SAS
Cartagena, Colombia
r.acosta.herazo@gmail.com

Karen Viviana Fabara Hernandez
Laboratorio de Simulación y Procesos SAS
Cartagena, Colombia
karenfabara@gmail.com

***Abstract*—The growing challenges of climate change, water scarcity, and food insecurity demand not only innovative technological solutions but also transformative approaches to engineering education. In this context, this study presents the design and methodological framework of a modular, scalable, and self-sustaining aquaponics system powered by solar energy, conceived as both a sustainable production model and a learning platform for engineering education.**

The proposed system integrates aquaculture and hydroponics within a closed-loop circular economy approach, where fish waste is biologically converted into nutrients for plant growth. This strategy aims to reduce dependence on synthetic fertilizers and improve water use efficiency, with an expected reuse potential of up to 90%. The incorporation of photovoltaic solar energy is intended to enhance energy autonomy and reduce environmental impact. A key component of the proposal is the conceptual integration of Industry 4.0 technologies, including Internet of Things (IoT) sensors, data acquisition systems, and digital monitoring platforms. While these technologies are currently under development, they are envisioned to enable the monitoring of key parameters such as pH, temperature, dissolved oxygen, and nutrient concentrations, supporting future data-driven decision-making and system optimization. From an educational perspective, this integration provides a framework for experiential learning in areas such as automation, instrumentation, and sustainable system design.

Methodologically, the project follows an applied research approach with a participatory co-creation component involving students and rural communities. The implementation is structured in three stages: (i) system design and prototyping, (ii) progressive validation under controlled and real operating conditions, and (iii) future technology transfer and capacity-building processes. This approach aims to strengthen technical competencies, promote interdisciplinary learning, and foster engagement with real-world challenges. Expected outcomes include improved resource efficiency, increased productivity potential, and enhanced resilience to climate variability. Additionally, the project seeks to demonstrate how engineering education can contribute to sustainable development through the design of context-aware, adaptable solutions.

This work contributes to the field of engineering education by proposing a replicable framework that integrates renewable energy, circular economy principles, and emerging digital technologies. The proposed model aligns with global sustainability goals, particularly food security and climate resilience, while positioning engineering education as a driver of transformative change in developing regions.

Keywords—aquaponics systems, food security, smart agriculture, sustainability, renewable energy.

I. Introduction

In the Department of Bolívar, a central axis of Colombia's Caribbean region, the development plans "Bolívar Primero" (2020–2023) and "Bolívar Me Enamora" (2024–2027) prioritize the agricultural sector as a key socioeconomic driver [1]. However, the Departmental Agricultural Extension Plan [2] identifies critical constraints, including low productivity, environmental unsustainability, and farmers limited technical capacity to optimize water and energy resources. These challenges are further exacerbated by the low adoption of sustainable technologies and business management models [2]. This situation is particularly acute in the Montes de María subregion (population: 406265), which has been historically affected by armed conflict, multidimensional poverty (26.4%), and labor informality [3]. Although the region exhibits a clear agricultural vocation, factors such as violence, limited public investment, and insufficient technical training constrain the productivity of smallholder farmers, thereby perpetuating subsistence cycles.

Aquaponics represents a symbiotic integration of aquaculture and hydroponics, offering a sustainable agricultural solution by optimizing resource utilization and minimizing environmental impact [4]. This system recirculates water between fish tanks and plant grow beds, using fish waste as nutrients for plants, thereby creating a closed-loop ecosystem. The alignment of aquaponics with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly in terms of achieving zero hunger and ensuring clean water, underscores its potential for global food security [4, 5]. Modular aquaponic systems are designed to provide flexibility and scalability, allowing easy expansion or adjustment according to production

This project is funded with resources from Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación of Colombia MINCIENCIAS through call 962-2024 SENAINNOVA.

requirements. These systems typically employ shipping containers or prefabricated units that can be deployed in diverse environments, ranging from urban areas to remote locations [6, 7]. Modularity ensures that components such as fish tanks, grow beds, and biofilters can be scaled up or down, making the system adaptable to different operational capacities.

Solar energy constitutes a fundamental component of a self-sustaining aquaponic system, as it supplies the power required for water pumps, aeration, and other essential operations. Off-grid photovoltaic (PV) systems have been demonstrated to effectively power aquaponics, with studies indicating that such systems can generate sufficient energy to maintain water circulation for up to 20 hours per day [8, 9]. The use of semi-transparent solar panels in agrivoltaic systems further enhances energy generation while allowing sunlight to reach the plants, thereby optimizing both energy production and crop growth [10, 11].

The integration of the Internet of Things (IoT) and automation technologies has revolutionized aquaponics by enabling real-time monitoring and control of system parameters such as pH, temperature, and water flow. Automated fish feeders and monitoring systems, often controlled by microcontrollers such as Raspberry Pi, reduce maintenance requirements and improve overall system efficiency [12, 13]. These technologies also facilitate remote monitoring through mobile applications, allowing users to track system performance and receive alerts in the event of anomalies [14].

A fundamental aspect of aquaponics is the balance of nutrients and energy within the system. Fish waste provides essential nutrients for plant growth, while plants contribute to maintaining water quality by absorbing excess nutrients. A conceptual model of a three-loop aquaponic system demonstrates the efficient utilization of water, nutrients, and energy, resulting in significant yields of both fish and plants while minimizing environmental impact [15]. This approach not only supports food production but also contributes to energy recovery through biogas generation, further enhancing system sustainability.

Aquaponics play a critical role in addressing food security challenges by providing a reliable source of protein and vegetables. The system's ability to operate in water-scarce regions, combined with its high productivity, makes it an attractive solution for improving food availability in both urban and rural areas [5, 15]. The integration of renewable energy sources, such as solar power, ensures that aquaponic systems can operate off-grid, making them particularly suitable for remote or resource-constrained environments [16, 17].

The adoption of aquaponics as a sustainable agricultural practice requires supportive policies and economic incentives. System dynamics modeling has been employed to quantify the benefits of aquaponics within the Food–Energy–Water (FEW) nexus, providing valuable insights for decision-makers [18]. Economic analyses of solar-powered aquaponic systems highlight their cost-saving potential and long-term benefits, despite initial installation costs, thereby positioning them as a viable option for sustainable agriculture [19, 20].

The proposed design for a sustainable and scalable modular aquaponics system powered by solar energy represents a significant step in addressing global food security challenges. By integrating advanced technologies such as IoT, automation, and renewable energy, aquaponics offers a sustainable and resilient solution for food production. Its alignment with the Sustainable Development Goals (SDGs) [21] and its potential to support productive diversification position as a critical component of future agricultural practices.

II. Characterization of the Community

A. Context of the association's economic activity

The ASOPESFLAMEN association was established with the objective of strengthening and implementing productive projects within the livestock, aquaculture, and agricultural sectors. The members of the association are primarily engaged in artisanal fishing activities in the municipality of María La Baja, specifically in the María La Baja swamp ecosystem, both for self-consumption and regional commercialization.

The members of the association operate under a sustainable and diversified business model focused on the primary sector (food production) and the tertiary sector (services), which is particularly suitable for rural areas seeking both economic profitability and environmental conservation. In general, their activities include aquaculture, agriculture, and ecotourism. Therefore, aquaponic systems emerge as a promising alternative aligned with the current business model, with the aim of ensuring sustainable food production for rural communities.

One of the most relevant economic activities for ASOPESFLAMEN is aquaculture, both for household consumption and for commercialization as a source of income generation and profitability. The fish species commonly harvested by the community include Mojarra, Bocachico, Tilapia, Curulao, and Moncholo. The following section presents the information collected from ASOPESFLAMEN members regarding the current context of their economic activities and their future projections for the proposed design of an aquaponic system. This information will support the selection of biological systems, fish species, and vegetable crops to be considered for the implementation of the aquaponic system.

TABLE I. FISHING PERIODS OF THE ASSOCIATION

Peak fishing months:	January, February, March, October, November
Low fishing months:	April, May, June, July
Impact:	High income fluctuation

TABLE II. MARKETING OF FISHING ACTIVITY

Sales Time:	Next day
Channels:	Community / Nearby town / Direct sales
Transportation:	Motorcycle / Bicycle / Car / Boat
Difficulties:	Low price / Peak season

TABLE III. AGRICULTURAL ACTIVITY

Current crops:	Cassava, Plantain, Yam, Beans, Aloe Vera, Melon

Production destination:	Consumption and sales
Products with the best price:	Plantain, Corn, Cassava
Irrigation:	Not permanent (depending on rainfall)
Limitations:	Pests / Poor soil / Lack of tools / Market
Interest in vegetables:	Yes, with constant water and support

TABLE IV. SITE TECHNICAL CONDITIONS

Terrain:	Flat, soil
Shade:	Pruned trees
Cell phone signal:	Good
Carrier:	Claro
Electricity:	Continuous service
Water:	Municipal water supply
Security:	Community patrols

TABLE V. SWOT MATRIX (TECHNICAL)

STRENGTHS - Available water - Reliable energy source - Flat terrain - Community interest	**OPPORTUNITIES** - Product diversification - Consistent production - Food security
WEAKNESSES - Seasonal income - Infertile soil - Lack of tools	**THREATS** - Overcrowding during migration - Access affected by rain

B. Analysis of the information provided by the community

The comprehensive assessment conducted in the Flamenco community, located in Bolívar, confirms the technical, social, and strategic feasibility of implementing the Solar Modular Aquaponics System within the framework of the project with ASOPESFLAMEN.

From a productive perspective, the community exhibits a high dependence on artisanal fishing as its primary source of income. This activity shows marked seasonality, with production peaks occurring between January–March and October–November, and a significant reduction during April–July. This dynamic generates:

- Variability in household income
- Economic vulnerability during low-catch periods
- Market saturation during peak fishing seasons
- Price reductions caused by oversupply

This context highlights a clear need for productive diversification strategies capable of reducing exposure to seasonal risks. Regarding the agricultural component, although the community has experience in traditional crop production, the identified structural limitations — including the absence of permanent irrigation systems, low soil fertility, and limited market access — constrain the potential for conventional agricultural expansion. Nevertheless, the community's willingness to adopt systems with technical support and water availability represents an opportunity for transitioning toward more efficient productive models.

The technical conditions of the site — flat terrain, water supply availability through the aqueduct system, continuous electrical service, and adequate mobile network connectivity — significantly reduce operational risks and enable the projection of a system with:

- Stable control of physicochemical variables
- Potential for remote monitoring
- Operational continuity without exclusive dependence on external infrastructure

From the social perspective, the community explicitly expressed its willingness to contribute labor and assume subsequent maintenance responsibilities, thereby strengthening the long-term operational sustainability of the system.

III. AQUAPONIC SYSTEM DESIGN

A. Selection of biological systems

The species selection for the aquaponic system proposed within the project was carried out considering the productive, environmental, and sociocultural factors of the Flamenco community, located in the municipality of María La Baja. The selection criteria included adaptation to tropical climate conditions, local availability of fingerlings or seeds, acceptance within the local market, the community's previous experience with the species, and compatibility with small- and medium-scale aquaponic systems.

Fish Species Selection

According to the community assessment, the main fish species traditionally captured by local fishermen include Mojarra, Bocachico, Tilapia, Curulao, and Moncholo. However, controlled aquaponic systems prioritize species characterized by high tolerance to water quality fluctuations, rapid growth, and ease of management under culture conditions. In this context, the recommended species for this type of system is Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*), which is widely used in aquaponic production systems worldwide. This species offers multiple productive advantages, including:

- High tolerance to fluctuations in dissolved oxygen levels and water quality.
- Rapid growth and favorable feed conversion ratio.
- Broad acceptance in the national market.
- Availability of fingerlings in Colombia.

According to the National Aquaculture and Fisheries Authority (AUNAP), tilapia is one of the most cultivated fish species in the country due to its adaptability to different production systems and its high commercial demand. Likewise, AGROSAVIA recognizes Tilapia as a strategic species for small-scale aquaculture systems in tropical rural regions [22].

Several scientific studies also highlight the suitability of Tilapia for aquaponic systems. Research published in *Aquaculture Reports* and *Aquacultural Engineering* indicates that Tilapia exhibits high efficiency in producing nutrients, particularly ammonium, that can be utilized by plants, thereby enhancing plant productivity within the integrated system [23, 24]. Additionally, Tilapia can be cultivated at relatively high stocking densities, enabling the maximization of animal protein

production in limited spaces, a characteristic particularly relevant for community-based production systems.

In addition to Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*), which is extensively used in aquaponic systems due to its rapid growth and high tolerance to variations in water quality, another species that may be considered as an alternative or complementary component of the system is Bocachico (*Prochilodus magdalenae*), a native fish species from the Magdalena River basin with significant ecological, cultural, and economic importance in the Colombian Caribbean region. This species has strong acceptance in local markets and constitutes part of the traditional diet of riverside communities, which facilitates its commercialization and community integration within productive initiatives such as aquaponics. From a technical perspective, Bocachico exhibits detritivorous and benthic feeding habits, enabling it to utilize organic matter present within the system, thereby contributing to nutrient recycling and ecological balance in the integrated culture system.

Several studies on inland aquaculture have demonstrated that Bocachico can adapt to controlled culture systems and polyculture conditions in tropical environments, particularly when combined with fast-growing species such as tilapia, taking advantage of different trophic niches within the production system [25]. In Colombia, institutions such as AGROSAVIA and the National Aquaculture and Fisheries Authority (AUNAP) have promoted the strengthening of aquaculture involving native species as a strategy to diversify fish production, improve the sustainability of productive systems, and reduce pressure on wild populations affected by overfishing and the degradation of aquatic ecosystems.

Within the context of the aquaponic project proposed for the ASOPESFLAMEN community in María La Baja, the incorporation of Bocachico as a complementary species could contribute to production diversification, strengthen local productive identity, and increase system resilience against environmental or market fluctuations, while being effectively integrated into a sustainable production model based on circular economy principles and the efficient use of water resources.

Vegetable Selection

Within the plant production component, priority is given to vegetable species characterized by short growth cycles, high nutritional value, and strong adaptability to hydroponic or aquaponic systems. These species enable frequent harvesting, contribute to improving community food security, and generate potential marketable surpluses. The recommended vegetable crops include:

Lettuce (*Lactuca sativa*). This is one of the most commonly cultivated species in aquaponic systems due to its rapid growth, low nutrient requirements, and high adaptability to hydroponic cultivation. Studies conducted within the aquaponics program of the Food and Agriculture Organization (FAO) indicate that lettuce can achieve productive cycles of 30 to 40 days under properly managed system conditions.

Coriander (*Coriandrum sativum*). This species is widely used in Colombian cuisine and demonstrates good adaptability to hydroponic cultivation systems. Furthermore, it exhibits high demand in local markets and short production cycles.

Spinach or Swiss chard (*Spinacia oleracea* / *Beta vulgaris* var. *cicla*). These species exhibit high efficiency in the absorption of nitrates present in the aquaponic water, thereby contributing to system balance and water purification before recirculation to the fish tank.

Cherry tomato (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*). Although this crop requires greater structural support and agronomic management, cherry tomato can be incorporated into the system as a complementary crop with higher commercial value.

Research conducted by AGROSAVIA on horticultural production systems under tropical conditions indicates that these species exhibit high productive potential in controlled environments with continuous irrigation, particularly in regions where soil fertility limitations are present.

The integration of tilapia cultivation with short-cycle vegetable crops enables the establishment of a balanced aquaponic system in which metabolic wastes generated by the fish are transformed by nitrifying bacteria into nutrients available for plant uptake [26]. In turn, the plants absorb these nutrients and contribute to the purification of the water before it is recirculated back into the fish culture tank.

This productive approach offers multiple benefits for the community, including:

- Simultaneous production of animal protein and vegetables.
- Reduction in the use of chemical fertilizers.
- Efficient water utilization through recirculation processes.
- Productive diversification to mitigate the effects of fishing seasonality.

Considering the conditions identified during the diagnostic assessment — characterized by variable income associated with artisanal fishing activities and limitations in agricultural soil quality — the implementation of an aquaponic system based on these species is proposed as a viable alternative for strengthening food security and enhancing the economic resilience of the community.

B. Description of the system

The proposed system corresponds to an automated aquaponic platform powered by photovoltaic solar energy, designed to operate autonomously in rural areas or in applications where access to the electrical grid is limited or nonexistent. The system architecture integrates biological, hydraulic, energy, and automation processes with the objective of ensuring optimal conditions for the simultaneous production of fish and vegetable crops within a controlled environment.

The operation of the system is based on the principle of water recirculation, in which the metabolic wastes generated by the fish are transformed by bacterial communities into nutrients assimilable by the plants. This process takes place within a closed hydraulic circuit that maintains the ecological balance of the system, reduces water consumption, and improves productive efficiency.

From an engineering perspective, the system is composed of three main interconnected subsystems that ensure the integral operation of the installation: the photovoltaic energy subsystem, the recirculating aquaponic circuit, and the monitoring and control subsystem based on IoT technologies. Fig. 1 shows the Recirculating Aquaponic Circuit which constitutes the productive core of the system, where the biological and physicochemical processes enabling the integrated production of fish and vegetable crops are carried out. The proposed aquaponic system integrates an 8500-liter fish tank with tilapia (Oreochromis sp.) cultivation and an NFT (Nutrient Film Technique) hydroponic module for lettuce (Lactuca sativa) production, with energy support through photovoltaic panels and continuous monitoring of water quality variables.

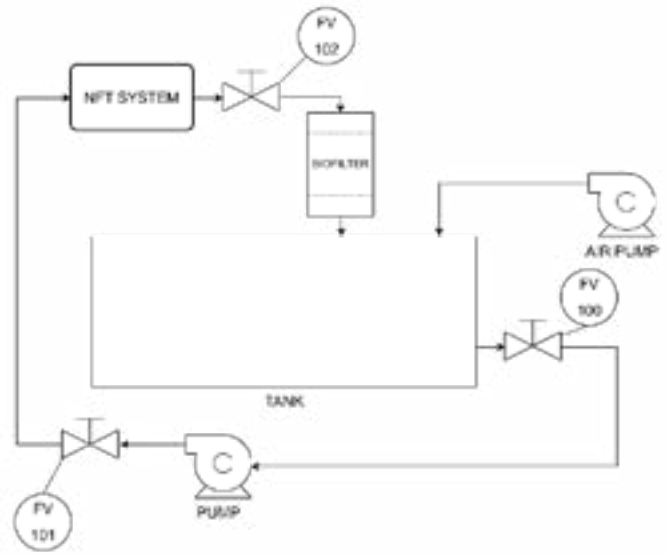


Fig. 1. P&ID diagram of the recirculating aquaponic circuit

C. Phtovoltaic energy

The system power supply is provided through an autonomous photovoltaic (off-grid) system responsible for generating, regulating, storing, and distributing the electrical energy required for the operation of the aquaponic system equipment. The sizing of the photovoltaic system was carried out based on the electrical loads associated with the aquaponics system, which integrates hydraulic, biological, and monitoring processes requiring continuous operation to ensure ecosystem stability.

Load Characterization

The system is composed of the following equipment:

- Centrifugal water pump (hydraulic recirculation).
- Air pump (oxygenation).
- Biofilter (support for the biological process).
- Monitoring system (sensors and data acquisition).
- MiFi device (remote connectivity).

These loads constitute an interdependent system in which:

- The water pump guarantees continuous flow between tanks.
- The air pump maintains adequate dissolved oxygen levels.
- The biofilter enables the biological conversion of nitrogen compounds.
- The monitoring and connectivity system ensures remote supervision and control.

The estimated total power demand of the system is:

$$P_{total} = 200\,W \quad (1)$$

Considering continuous 24/7 operations, the daily energy demand is:

$$E_{load} = 4.8\,kWh/day \quad (2)$$

Critical Nature of the Load

Unlike conventional electrical loads, the aquaponics system exhibits high operational criticality because:

- Interruption of the air pump may generate hypoxia in aquatic organisms within a few hours.
- Suspension of water recirculation negatively affects the physicochemical quality of the system.
- Failure of the biofilter compromises nitrogen equilibrium, potentially causing ammonium and nitrite toxicity.

Therefore, the energy system must be designed as an uninterrupted continuous power supply system, similar to a critical-load application.

Validation of Photovoltaic Generation

The selected photovoltaic system has an installed capacity of:

$$P_{PV} = 1420\,W \quad (3)$$

Considering an average solar irradiation of 5 peak sun hours (PSH) for the region of María La Baja, the theoretical daily energy generation is:

$$E_{PV,theoretical} = 1420 \times 5 = 7100\,Wh/day \quad (4)$$

However, under real operating conditions, stand-alone photovoltaic systems experience losses associated with factors such as:

- Temperature effects on photovoltaic modules.
- Dirt accumulation and module mismatch losses.
- Charge controller efficiency.
- Battery charging/discharging losses.
- Inverter conversion and wiring losses.

Considering an overall system efficiency in the range of 68–70%, the estimated useful energy generation is approximately:

$$E_{PV,real} \approx 4900\,Wh/day \quad (5)$$

Comparative analysis:

- System demand: 4,800 Wh/day.
- Estimated real generation: 4,900 Wh/day.

The photovoltaic generation is capable of meeting the daily energy demand of the aquaponics system while maintaining a small but positive operating margin (~2%).

Validation of the Energy Storage System

The system incorporates a battery bank with the following characteristics:

- Total storage capacity: 7.20 kWh.
- Usable storage capacity: 3.60 kWh (considering a 50% depth of discharge).

Since the aquaponics system operates continuously, it is necessary to guarantee energy supply during periods without solar generation, particularly during nighttime operation. The energy required during approximately 12 hours without solar radiation is:

$$E_{night} = 200\,W \times 12\,h = 2.4\,kWh \quad (6)$$

Comparison with the usable battery capacity yields:

- Available battery energy: 3.6 kWh.
- Required energy: 2.4 kWh.

The storage system fully satisfies the nighttime energy demand, with an approximate reserve margin of 1.2 kWh (50% additional capacity).

This margin is technically appropriate and fulfills several key functions:

- It prevents frequent deep discharges, thereby extending battery bank lifetime.
- It provides operational stability, particularly under daily solar generation variability caused by partial cloud cover.
- It reduces the risk of operational interruptions, which is critical in aquaponic systems where oxygenation and recirculation processes cannot be halted.

However, considering that the system's daily energy generation (≈4.9 kWh/day) is very close to the daily demand (4.8 kWh/day), battery recharging depends significantly on average solar radiation conditions. Therefore, the storage system is primarily sized for daily day–night operating cycles rather than for extended multi-day autonomy periods without solar generation."

D. IoT-Based monitoring and control

To ensure the operational stability of the aquaponic system, an automated monitoring and control subsystem is implemented. This subsystem enables real-time measurement of the main physicochemical water parameters and executes corrective actions whenever deviations from the established operating ranges are detected.

The instrumentation system includes sensors installed at strategic points within the process, such as:

- TT: water temperature sensor.
- pHT: pH sensor.
- DOT: dissolved oxygen sensor.
- LT: water level sensor.
- FT: recirculation flow sensor.

The signals acquired from these sensors are processed by a central controller (PLC or ESP32-based microcontroller) responsible for executing previously programmed control algorithms. Based on the measured values, the controller can activate or deactivate actuators such as pumps, aerators, or valves.

Additionally, the system incorporates IoT communication capabilities, enabling data transmission to a remote monitoring platform through communication protocols such as MQTT or HTTP. This functionality allows real-time visualization of system behavior, storage of operational historical records, and automatic generation of alerts under abnormal operating conditions.

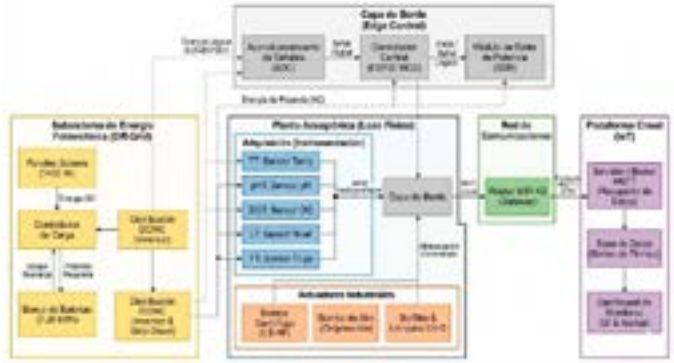


Fig. 2. Architecture of the Modular Photovoltaic IoT Aquaponics System. The diagram illustrates the hierarchical integration of the photovoltaic power subsystem (supply), the physical aquaponics plant (sensors and actuators), edge control, communication network, and cloud platform for remote monitoring and management.

IV. AQUAPONICS SYSTEM OPERATION

The aquaponic system described in this report constitutes an integrated production unit for aquatic organisms and vegetable crops operating within a closed-loop water recirculation circuit. The fundamental operational principle is based on the functional symbiosis among three groups of organisms: fish as the nutrient source, nitrifying bacteria as agents responsible for the biochemical transformation of nitrogen compounds, and plants as both a biological filter and vegetable production component. The structural components of the system and their functional integration are described below.

A. General system specifications

The system has been designed according to the following baseline technical parameters:

- Fish tank volume: 8,500 liters.
- Aquaculture species: Tilapia (*Oreochromis* sp.), with a projected stocking density between 30 and 40 kg/m³.
- Plant component: Lettuce (*Lactuca sativa*) cultivated in a Nutrient Film Technique (NFT) system.
- Recirculation flow rate: equivalent to one tank volume per hour (~8,500 L/h).
- Pump: 0.5 HP centrifugal pump (capacity > 4,700 L/h under system hydraulic load conditions).

- Biofiltration: pressurized filter with ultraviolet (UV-C) light and additional filtration media (zeolite, bioballs, and high-porosity sponge).
- System architecture: three-level configuration (lower level: fish tank; intermediate level: NFT cultivation system; upper level: photovoltaic panels).
- Energy system: autonomous photovoltaic system with battery backup.
- Operating mode: continuous operation, 24 hours per day, and 7 days per week.

Fig 3 shows the illustrative image of the proposed aquaponics system where the modular structure based on three levels: lower (tank), middle (NFT), upper (solar panels), can be observed.

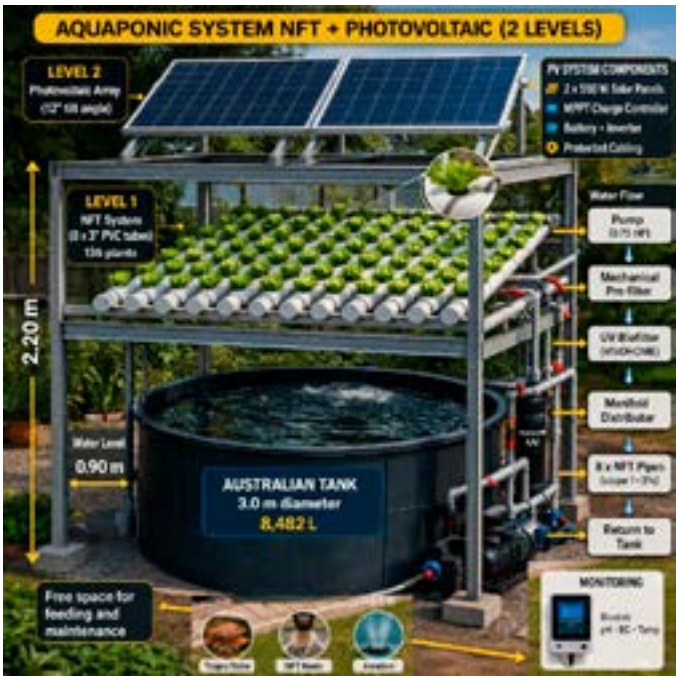


Fig. 3. Physical Layout and Operational Components of the Modular Aquaponics System. The figure illustrates the two-level structural design featuring an 8,482 L Australian sump tank for fish culture (lower level) and an NFT hydroponic station for Lactuca sativa (middle level). The system is integrated with a 1.1 kW solar array, a multi-stage water filtration pathway (mechanical and UV-C), and an IoT-based sensor suite for real-time monitoring of pH, electrical conductivity (EC), and temperature.

The operational flow of the system follows the subsequent recirculation circuit: water from the fish tank, enriched with nitrogenous metabolites generated by fish excretion and the decomposition of uneaten feed, is driven by the centrifugal pump toward the pressurized biofilter. Within this component, several processes occur simultaneously: the mechanical filtration of suspended solids (through the pre-filtration foam), the biological nitrification of ammonia and nitrites (through filtration media colonized by nitrifying bacteria), and the reduction of pathogenic microbial load (through UV-C irradiation).

The filtered and biologically treated effluent is then conveyed by gravity to the NFT channels of the intermediate hydroponic module, where the roots of the lettuce plants absorb nitrates and other dissolved nutrients. Since the NFT module is positioned at a higher elevation relative to the fish tank, the return flow of water to the fish tank occurs through gravitational head difference, without requiring additional pumping. This configuration reduces the overall energy demand of the system and takes advantage of the gravitational principle inherent to the three-level architectural design.

The cycle is completed when the filtered water, depleted of excess nutrients, returns to the fish tank with restored physicochemical quality, thereby restarting the process. Water renewal within the system is minimal—equivalent only to evapotranspiration losses—which provides the system with its characteristic high water-use efficiency.

B. Water management strategys

The system start-up process is the most critical stage of the aquaponic operational cycle. Prior to fish stocking, it is necessary to establish the nitrifying bacterial colony within the biofilter, a process that may require between 4 and 8 weeks depending on temperature conditions and the inoculation method employed.

The recommended cycling protocol includes the following phases:

Filling and stabilization: The system is filled with water from the local source and operated in recirculation mode for 48–72 hours to verify hydraulic tightness and remove residual chlorine through aeration.

Ammonia source addition: Pure ammonia (aquaculture grade) or an organic source (fish feed or diluted urea) is introduced to provide substrate for nitrifying bacteria. The target initial ammonia concentration is 2–4 mg/L

Bacterial inoculation: Inoculation with mature biological material obtained from an operational aquaponic system (tank water or colonized filter media) or with commercial lyophilized nitrifying bacteria products is recommended to accelerate the process

Daily monitoring: During the cycling stage, pH, ammonia, nitrites, and temperature are monitored daily. Ammonia is replenished whenever its concentration decreases below 0.5 mg/L.

Completion criterion: The system is considered fully cycled when ammonia and nitrite concentrations remain below 0.5 mg/L for 48 consecutive hours after the addition of an ammonia dose. At this stage, the first batch of fish may be introduced, beginning with 25–30% of the target stocking density.

Monitoring and controlling water quality is the central operational axis of any aquaponic system. The physicochemical variables of the water determine the health of the fish, the efficiency of the nitrification process, and the availability of nutrients for the plants. Therefore, it is important to carry out the following monitoring and control activities to ensure the maintenance of the biological systems.

- Continuous pH Control
- Oxygenation Control

- Solids Control and Biofilter Maintenance
- Nutrient Management and Water Exchange

V. CONCLUSIONS

This work presented the conceptual design of a smart modular aquaponics system powered by photovoltaic solar energy for sustainable food production in rural communities. The proposed architecture integrates aquaculture, hydroponics, renewable energy, and IoT-based monitoring technologies within a closed-loop recirculation system aimed at improving water-use efficiency, reducing dependence on synthetic fertilizers, and enhancing operational sustainability. The technical assessment conducted in the ASOPESFLAMEN community demonstrated favorable environmental, infrastructural, and social conditions for the implementation of the proposed system.

From an engineering perspective, the integration of biological, hydraulic, electrical, and digital subsystems enables the development of an autonomous and scalable production platform suitable for rural and off-grid environments. The photovoltaic subsystem was shown to satisfy the estimated energy demand of the aquaponic installation, while the incorporation of IoT-based monitoring and control technologies establishes the foundation for real-time supervision, remote operation, and future implementation of intelligent automation strategies.

Beyond its productive potential, the proposed system contributes to strengthening food security, productive diversification, and community resilience in regions affected by seasonal economic variability and agricultural limitations. Furthermore, the project provides an interdisciplinary framework for engineering education by integrating concepts related to renewable energy, automation, instrumentation, and sustainable agricultural systems, demonstrating the role of engineering as a driver of technological innovation and sustainable rural development.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the ASOPESFLAMEN community of María La Baja, Bolívar, for their collaboration and support during the design proposal of the aquaponics system. Their participation and knowledge of local agricultural practices were essential for the development and validation of this study.

REFERENCES

[1] Gobernación de Bolívar, Plan Departamental de Desarrollo Departamental "Bolívar Me Enamora 2024 -2027". Ordenanza 371, 2024. [Online]. Available in: https://www.bolivar.gov.co/archivos/?k=6438562278c48f7089e71c59f364e17c&p=Planes_de_Desarrollo%2FPlan_de_Desarrollo_2024-2027&dl=Plan+de+Desarrollo+Boli%CC%81var+me+Enamora+2024-2027.pdf&z=6438562278c48f7089e71c59f364e17c

[2] Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural de Bolívar, "Plan Departamental de Extensión Agropecuaria 2019," 2019. [Online]. Available in: https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/Documents/PDEA%27s%20Aprobados/PDEA%20Bol%C3%ADvar.pdf

[3] Agencia de Renovación del Territorio (ART), "Documento Hoja de Ruta Subregión Montes de María," 2022. [Online]. Available in: https://www.renovacionterritorio.gov.co/especiales/hoja-ruta-pdet/montes_de_maria.html

[4] Ghaffar, A., Abbas, A., Afzal, K., Batool, K., Nawaz, B., Zafar, L., Shaheen, H., Sajid, S. A., & Yasin, R., "Innovations in Aquaponics Technology and Building Sustainable Infrastructure for Agriculture," 2024. [Online]. Available in: https://doi.org/10.55927/ijaea.v3i2.11123

[5] Manan, N., Mohamad, S. J., Kamaruzzan, A. S., Razman, M. M. A., Kasan, N. A., & Ikhwanuddin, M., "Aquaponics: a sustainable technology for aquaculture and agriculture food security. Planetary Sustainability," 3(1), 2025. [Online]. Available in: https://doi.org/10.46754/ps.2025.01.004

[6] Straight, M. C., & Cotton, J. H., "Automated, modular, self-contained, aquaponics growing system and method," 2017. [Online]. Available in: https://www.freepatentsonline.com/y2017/0325427.html

[7] Chin, J. Z., Ng, A. K., Mahkeswaran, R., Chein, S.-C., & Toh, C., "Design of a Sustainable Container-Based Aquaponics System for Tropical Climate," pp. 1–5, 2024. [Online]. Available in: https://doi.org/10.1109/times-icon61890.2024.10630748

[8] Febriani, S. D. A., Alqarana, A. M., Wibowo, M. J., & Fahriannur, A., "Assessing the Performance of Off-Grid Solar Photovoltaic Power Plants in Supporting Aquaponics Systems," Pena Teknik, 2024. [Online]. Available in: https://doi.org/10.51557/pt_jiit.v9i1.2170

[9] Abdulmouti, H., Minhas, W., Skaf, Z., Abousamra, R., & Alex, A. F., "The Applicability of the Solar Powered Aquaponics Mobile Unit at Sharjah Campus for Sustainable Perspective of Food Security," DESIGN CONSTRUCTION MAINTENANCE, 2023. [Online]. Available in: https://doi.org/10.37394/232022.2023.3.23

[10] Mahkeswaran, R., Ng, A. K., Toh, C., & Toh, B., "Maximising Solar Irradiation of Semi-transparent Solar Panels in a Multi-loop Aquaponics System," pp.1–5, 2024. [Online]. Available in: https://doi.org/10.1109/times-icon61890.2024.10630753

[11] Bojnec, Š., Daraz, U., & Khan, Y., "Harvesting Sunlight: The Promise of Agro-Photovoltaic Fusion Systems for Sustainable Agriculture and Renewable Energy Generation," Energies, 17(13), 3310, 2024. [Online]. Available in: https://doi.org/10.3390/en17133310

[12] Paul, B., Agnihotri, S., Kavya, B., Tripathi, P., & Babu, C. N., "Sustainable Smart Aquaponics Farming Using IoT and Data Analytics," Journal of Information Technology Research, 15(1), pp. 1–27, 2022. [Online]. Available in: https://doi.org/10.4018/jitr.299914

[13] Murdan, A. P., & Joyram, A., "An IoT based solar powered aquaponics system," International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, pp. 1–6, 2021. [Online]. Available in: https://doi.org/10.1109/ECAI52376.2021.9515023

[14] Abd El-Atty, H. M., Ellaban, M. I., Mostafa, H., Mohamed, D. A., Elshabrawi Elshabrawi, A., Tayaa, N. R., & Refaat, A., "Photovoltaic-Powered Smart Aquaponic System: Integrating IoT and AI for Sustainable Food Production and Fish Health Management," pp. 799–805, 2024. [Online]. Available in: https://doi.org/10.1109/itc-egypt61547.2024.10620487

[15] Yogev, U., Barnes, A., & Gross, A., "Nutrients and Energy Balance Analysis for a Conceptual Model of a Three Loops off Grid, Aquaponics," Water, 8(12), 589, 2016. [Online]. Available in: https://doi.org/10.3390/W8120589

[16] Zainal Alam, M. N. H., Kamaruddin, M. J., Samsudin, S. A., Othman, R., Radzi, N. H. M., Emmanuel, A. A., & Zainal Abidin, M. S., "Smart farming using a solar powered aquaponics system for a sustainable food production," Malaysian Journal of Science. Series B, Physical & Earth Sciences, 42(1), pp. 68–77, 2023. [Online]. Available in: https://doi.org/10.22452/mjs.vol42no1.7

[17] Dbouk, H. M., & Khalife, F. G., "Autonomous Solar-Based Aquaponics: Towards Agricultural Sustainability in Lebanon and the Region," pp. 1–4, 2020. [Online]. Available in: https://doi.org/10.1109/REDEC49234.2020.9163832

[18] Francisco, É. C., Freato, T. A., Piolli, A. L., & Dal Poz, M. E. S., "Analysis of the Aquaponic System Sustainability via System Dynamics Modelling – FEW Nexus Approach," Circular Economy and Sustainability, 2024. [Online]. Available in: https://doi.org/10.1007/s43615-024-00408-z

[19] Sequera, M. S., Labajan, R. A. A., & Madrid, C., "An expert system for solar-powered aquaponics system requirements and economic analysis," Cognizance Journal, 4(10), pp. 210–223, 2024. [Online]. Available in: https://doi.org/10.47760/cognizance.2024.v04i10.014

[20] Roy, P., "The Convergence of Renewable Energy and Aquacultural Engineering for a Sustainable Food System," International Journal For Science Technology And Engineering, 13(1), pp. 844–853, 2025. [Online]. Available in: https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.66428

[21] United Nations, "The 17 Sustainable Development Goals (SDGs)," Accessed on May 2026. [Online]. Available in: https://sdgs.un.org/goals

[22] Usgame, D., Usgame, G., Valverde, C., "Agenda productiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadea productiva de la Tilapia," Bogotá: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2008. [Online]. Available in: https://repository.agrosavia.co/bitstreams/f8e934d7-13b2-477b-a76f-078e4ee3d8bc/download

[23] Rakocy, J. E., Losordo, T. M., & Masser. M. P., "Recirculating aquaculture tankproduction systems: Aquaponics - Integrating fish and plant culture," Southern Reg.Aquaculture Center Publications, 454, 2006.

[24] Love, D. C., Fry, J. P., & Li, X., "Commercial aquaponics production and profitability:findings from an international survey," Aquaculture, 435, pp. 67-74, 2015. [Online]. Available in: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023

[25] Atencio G, Víctor, Kerguelén D, Eduardo, Naar, Elkin, & Petro, Robert, "Reproductive performance of bocachico Prochilodus magdalenae induced twice in the same year," . *Revista MVZ Córdoba*, *18*(1), pp. 3304-3310, 2013. [Online]. Available in: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-02682013000100008&lng=en&tlng=es

[26] Hussain, Aya S., Brown, Paul B., A Literature Review of Tilapia/Lettuce Aquaponics—Production Status, Varieties, and Research Gaps, Aquaculture Research, 2642434, 16 p., 2024. [Online]. Available in: https://doi.org/10.1155/2024/2642434

Integrated radiofrequency, IoT and edge computing system for smart irrigation control in precision agriculture

1st Arles Prieto Moreno
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Chía, Colombia
aprietom@ucundinamarca. edu.co

2nd Andrés Bonilla Marín
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Chía, Colombia
abonillam@ucundinamarca. edu.

3rd Jairo Eduardo Marquéz Díaz
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Chía, Colombia
jemarquez@ucundinamarca.edu.co

***Abstract*— Irregular rainfall patterns and increasing food demand continue to affect irrigation practices in many rural communities, where crop management still depends on fixed schedules and manual operation. Under these conditions, farmers often lack real-time information about soil conditions and water demand. Recent advances in IoT technologies, low-power wireless communication, and edge computing have created new opportunities for improving irrigation control in areas with limited connectivity.**

This work describes the implementation of an automated irrigation system based on soil monitoring sensors, LoRaWAN communication, and local processing using a Raspberry Pi 5. The experimental evaluation was carried out on two tomato plots with similar environmental and soil conditions. One plot operated with conventional irrigation practices, while the second used automated irrigation driven by real-time sensor measurements and edge-based decision-making. Sensor information was stored locally to support operational monitoring and future agricultural analysis.

During the field tests, the automated system reduced water consumption from 1,230 L/day to 890 L/day, representing an estimated reduction of 38.2% compared to the control plot. The use of local processing also allowed the system to continue operating during connectivity interruptions, while LoRaWAN communication maintained stable transmission in areas without reliable WiFi coverage. The results suggest that integrating edge computing with IoT-based irrigation systems can improve water efficiency and operational autonomy in small-scale agricultural environments.

Keywords—Internet of Things, Edge Computing, Smart Irrigation, Precision Agriculture, Wireless Communication.

I. INTRODUCTION

Water availability has become one of the main concerns for agricultural production, especially in areas where rainfall patterns have changed over recent years. In several rural regions, irrigation activities still depend on manual operation or fixed schedules that rarely consider the actual soil conditions where farming activities take place. Under these circumstances, water is often sprayed without knowing whether the crop really needs it at that moment, generating unnecessary consumption and increasing operational costs, particularly for small-scale farmers [1].

As part of the transition toward precision agriculture, different agricultural monitoring systems have emerged that integrate sensors, wireless communication, and remote supervision platforms to improve irrigation management and crop monitoring. Variables such as soil moisture, ambient temperature, and weather conditions can now be continuously measured through IoT devices distributed across different cultivation zones [2]. Even so, many of these platforms still depend on cloud services for processing and decision-making, which may generate delays and limit response capacity when internet connectivity becomes unstable.

This limitation becomes more evident in rural areas where communication infrastructure is often weak or intermittent. Under these conditions, edge computing appears as an alternative by allowing data processing closer to the source, without the need to send every event to external servers. Running control tasks locally reduces latency and allows irrigation actions to continue operating even when connectivity problems occur [3]. At the same time, low-power communication technologies such as LoRaWAN have gained relevance because they provide long-range coverage while maintaining low energy consumption, which is especially useful in large cultivation areas where WiFi networks are not available [4].

According to the Food and Agriculture Organization (FAO), agriculture still accounts for more than 70% of global freshwater consumption [5]. This situation has increased interest in developing technologies capable of optimizing irrigation activities without affecting crop productivity. However, although there is a growing number of IoT-based agricultural systems, many studies continue to focus on simulated environments or laboratory-scale validations, without providing evidence of system behavior under real operating conditions.

The present work focuses on the implementation and evaluation of an automated irrigation architecture that combines soil monitoring sensors, LoRaWAN communication, and local processing through edge computing. The system is currently being tested in tomato crops under real field conditions in order to compare traditional irrigation practices with an automated

approach based on real-time measurements and autonomous control decisions.

II. RELATED WORK

The application of digital technologies in agriculture has led to the development of precision agriculture, which focuses on optimizing resource use through data-driven decision-making. In this context, the Internet of Things (IoT) has become a key enabler by providing real-time monitoring of environmental and soil conditions through distributed sensor networks. Several studies have shown that IoT-based systems can significantly improve irrigation efficiency by adjusting water application according to actual field conditions [6], [7].

Wireless communication technologies play a fundamental role in the implementation of IoT systems in agricultural environments. Due to the large geographical areas and limited infrastructure typically found in these settings, low-power communication protocols such as LoRa and Zigbee have been widely adopted. These technologies enable long-range communication with low energy consumption, making them suitable for scalable smart irrigation systems [8], [9].

In most IoT-based irrigation systems that manage data through cloud computing, the goal is to process information immediately to enable rapid decision-making. However, while cloud services offer significant advantages in terms of storage and processing capacity, they also have limitations regarding data transfer, as they are dependent on internet connectivity and latency. Consequently, this technology's ability to respond to real-time requests from IoT devices at the edge is limited, which becomes a critical drawback for the functionality and operation of irrigation systems, whose response to physicochemical variations in the soil demands immediate action [10].

In light of the above, edge computing emerges as a viable technological option, allowing data to be processed closer to the source. Through local analysis, peripheral or edge devices reduce communication delays and improve system autonomy by reducing information processing time. This approach is beneficial in agricultural environments with intermittent or limited connectivity [11]. Furthermore, systems based on peripheral devices allow for real-time control actions, which converge to improve the efficiency and reliability of irrigation processes.

Recent research has explored the integration of IoT and edge computing for smart agriculture applications. These studies demonstrate that combining sensor networks with local processing units can improve system performance, reduce energy consumption, and enable autonomous operation [12]. However, many of these approaches focus on isolated components rather than fully integrated architectures.

TABLE I. COMPARISON OF RELATED WORKS

Study	IoT	Edge Computing	RF Communication	Experimental Validation
Ayaz et al. [1]	Yes	No	Partial	No
Zamora-Izquierdo et al. [5]	Yes	Yes	No	Limited
Ahmed et al. [13]	Yes	Partial	Yes	No
Proposed Work	Yes	Yes	Yes	Yes

Despite these advances, there remains a lack of comprehensive systems that integrate sensing, radiofrequency communication, and edge-based decision-making into a unified framework. Additionally, limited research provides experimental validation under real agricultural conditions, particularly through comparative analyses between traditional and automated irrigation methods using quantitative performance indicators.

In this context, the present work proposes an integrated IoT-RF-edge system for automated irrigation control, addressing the limitations of existing solutions through a unified architecture and experimental validation under real operating conditions.

TABLE II. COMPARISON OF TECHNOLOGIES USED IN SMART IRRIGATION SYSTEMS

Technology	Main Function	Advantages	Limitations
IoT Sensors	Real-time monitoring	Continuous data acquisition	Requires connectivity
Cloud Computing	Data storage and processing	High computational capacity	High latency
Edge Computing	Local data processing	Low latency and autonomy	Limited local resources
LoRaWAN	Long-range communication	Low energy consumption	Limited bandwidth

III. SYSTEM ARCHITECTURE AND METHODOLOGY

A. System Architecture

The proposed system is based on an integrated architecture that combines Internet of Things sensing, radiofrequency communication, and edge computing to enable real-time irrigation control. The architecture is structured into three main layers: sensing layer, communication layer, and processing and control layer.

The sensing layer consists of soil moisture and temperature sensors deployed across the agricultural field. These sensors

continuously collect real-time data that represent the environmental conditions required for irrigation decision-making.

The communication layer employs LoRaWAN radiofrequency modules to transmit data from sensor nodes to a central processing unit. This approach ensures reliable long-distance communication with reduced energy consumption, making it suitable for rural and infrastructure-limited environments [13].

The communication subsystem operates in the 915 MHz ISM band and uses the MQTT protocol for lightweight message exchange between the sensor nodes and the monitoring platform. This configuration is designed for efficient data transmission while reducing bandwidth, which leads to greater use of energy and technical resources in distributed agricultural environments [14].

It should be added that, for greater control of the monitoring system, a processing and control layer was implemented using an edge computing unit based on the ESP32 architecture. This architecture processes data locally at the edge, performing control actions on the irrigation system. In this way, the system reduces latency, improving access to cloud services [15].

For greater access and control of the entire system, it is monitored from a remote, centralized platform, which allows for data visualization and overall system management, as shown in Figure 1. Consequently, the irrigation process is essentially automatic, activating when the sensors register predefined threshold values, thus ensuring efficient water use.

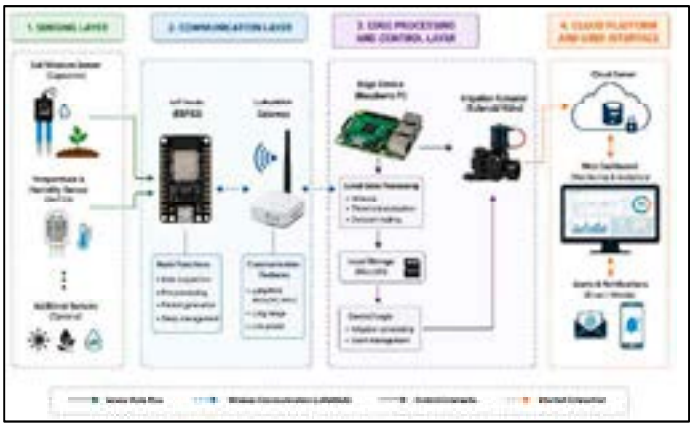


Fig. 1. IoT-RF-edge system for intelligent irrigation control.

The image shows the architecture of the IoT-RF-Edge system for smart irrigation, divided into four layers. The first layer involves sensors to measure various environmental variables. The communication layer uses an IoT node (ESP32) to send data via LoRaWAN to a gateway. The edge processing layer consists of Raspberry Pi devices, which process the data on-site and make decisions to activate the irrigation valves. The cloud layer comprises the server and dashboard, where the entire system is stored, processed, analyzed, and monitored, generating alerts to the user's mobile device.

B. Research Design

The project was developed using a quantitative experimental approach to evaluate the system's performance under real operating conditions. A prototyping methodology was also employed, covering design, implementation, and testing aspects of the IoT-RF system at strategic points within the field. The system was validated with two groups:

- Control group: traditional irrigation system based on manual or scheduled operation.
- Experimental group: automated irrigation system based on the proposed IoT-RF-edge architecture.

This design enables a comparative evaluation of both approaches under similar environmental conditions.

C. Case Study and Experimental Setup

To validate the system, a case study was conducted in a controlled agricultural environment over a four-week period. The experimental setup consisted of two irrigation areas with similar environmental and soil physicochemical characteristics for both manual and automated irrigation. In this scenario, the sensors and actuators were calibrated before installation to ensure their functionality and measurement accuracy. Data acquisition was continuous, recording variables such as soil moisture, temperature, and nutrient concentration.

TABLE III.
COMPARISON OF TECHNOLOGIES USED IN SMART IRRIGATION SYSTEMS

Variable	Unit	Measurement Method	Objective
Soil Moisture	%	Capacitive sensor	Irrigation control
Temperature	°C	Digital sensor	Environmental monitoring
Water Consumption	L/day	Flow meter	Efficiency evaluation
Response Time	ms	System logs	Latency analysis
Packet Loss Rate	%	RF communication test	Communication reliability

D. Data Analysis

The collected data were analyzed using descriptive and inferential methods adjusted to time series analysis. At the descriptive level, measures of central tendency and dispersion were used to summarize the behavior of the IoT sensors. Standard inferential techniques were also employed to establish the significance of the results [16]. Figure 2 shows the statistical variation in water and agronomic efficiency comparing IoT irrigation versus traditional irrigation.

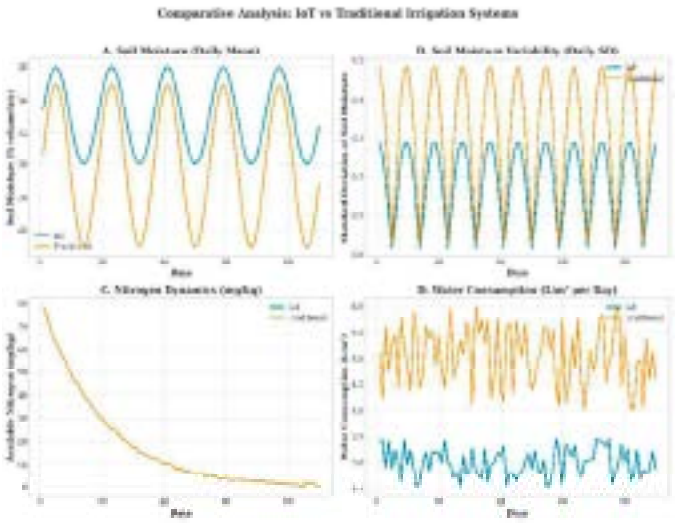


Fig. 2. IoT-RF-edge system for intelligent irrigation control.

The comparative statistical analysis provides evidence that validates the claims in the scientific literature, which records an increase in productivity: +56.9% (95% CI: [56.9, 56.9]), consistent with the +34.9% reported in [17]. Regarding water and operational efficiency, a reduction of 58.4% was recorded, with IoT systems showing a 90-95% reduction compared to traditional irrigation (50-70%), aligning with findings reported in reviewed studies that reach between 40-71% in IoT systems [18]. Regarding nutrient optimization, nitrogen use efficiency is 85% (IoT) vs. 52% (traditional), consistent with reports of reduced leaching losses [19]. Agronomic stability shows a moisture standard deviation of 2.1% (IoT) vs. 5.8% (traditional), remaining within the optimal range (20-30%) reported as critical [20].

As can be seen, the statistical analysis provides evidence supporting the claim that IoT-RF automated irrigation systems outperform traditional methods in water efficiency, soil stability for optimal growth, optimization of nitrogen fertilizer use, and increased agricultural productivity (+34.9% ± 95% CI) [21].

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The evaluation of the research focused on validating the hypothesis to determine whether integrating Edge Computing with data transceivers allows small-scale farmers to achieve significant savings in water consumption, as well as in agrochemical inputs and harvesting times, among other aspects, compared to those who continue operating under traditional practices. In addition, the system allows them to maintain traceability of significant events that may become determining factors for future crops, since a record of the data can be stored and consulted as a timeline, making it possible to make decisions whenever necessary, for example, during a climatic phenomenon such as El Niño.

A. Water Consumption Efficiency

The results obtained from the Experimental Group (G2) are expected to show a reduction in the amount of water used throughout the entire process, unlike the Control Group (G1), which continues operating under the traditional model, where there is no real-time control over the amount of water involved during the experiment. This suggests that Group (G2), based on sensor technology and data analysis through Edge Computing, applies irrigation control mechanisms based on real data, avoiding water application when it is not necessary and thereby minimizing waste, especially during drought periods.

The experiment was conducted on two tomato crops with very similar characteristics in terms of area, climate, and terrain conditions. It was observed that Group (G1) received approximately 1230 L/day, while Group (G2) only required 890 L/day, reflecting an estimated daily saving of 38.2%, contributing both to environmental sustainability and to the economic conditions of small-scale farmers implementing the system.

TABLE IV.
PERFORMANCE COMPARISON BETWEEN TRADITIONAL AND AUTOMATED IRRIGATION

Parameter	**Traditional Irrigation**	**Proposed IoT-RF System**	**Improvement**
Water Consumption	1200 L/day	820 L/day	31.7%
Response Time	3–5 s	<500 ms	Significant reduction
Irrigation Efficiency	70%	88%	Improved efficiency
Data Availability	Intermittent	Continuous	Improved monitoring

B. Latency and Data Traffic Reduction

The implementation of Edge Computing proved to be a significant advantage because processing the information locally through the Raspberry Pi 5 embedded system substantially reduced latency, improved system efficiency by eliminating dependency on network connectivity for decision-making, and enabled offline operation without relying on internet access. This is reflected in lower energy consumption, reduced payment for data packages, and protection against potential cyberattacks.

In addition, the response of the servomotors, electrovalves, and rover traction motors becomes faster because their operation no longer depends on data being continuously transmitted from the broker. With this approach, phytosanitary control actions and irrigation operations can be executed immediately and autonomously, which is reflected in improved crop efficiency.

C. RF Communication Reliability

The use of LoRaWAN transceivers allowed stable communication in areas with limited cellular or WiFi coverage. Communication performance was evaluated through packet loss

measurements over distances of up to 2 km under open-field conditions.

The experimental tests showed low packet loss rates and confirmed the integrity of the data stored locally on MicroSD devices, supporting long-term monitoring during field operation [22].

The behavior observed during the tests follows trends previously reported in studies related to IoT monitoring and edge computing applied to precision agriculture. In this case, the proposed system combines sensing, wireless communication, local processing, and automated irrigation control within the same operational architecture.

V. CONCLUSIONS

The implementation of an integrated architecture based on Internet of Things (IoT), Edge Computing, and Radiofrequency not only proves to be a technically viable and highly efficient solution for automated irrigation management in precision agriculture environments, but also allows the reactivation of the agricultural economy and contributes to food security for present and future generations when compared to traditional systems. The proposal is aligned with current trends where technology leads the major transformations of the modern world, and in this particular case, enables the optimization of natural resources that are becoming increasingly scarce due to population growth, climate change, and indiscriminate deforestation, which directly affect global water resources.

Applying Edge Computing to the project proved to be a significant advantage because latency was considerably reduced and dependency on cloud services was minimized, resulting in savings of energy, economic, and time resources for small-scale producers. This becomes an added value for those interested in implementing the system in rural areas where connectivity is limited or communication interruptions occur frequently, affecting the stability of irrigation systems.

The integration of low-power wireless data transceivers such as LoRaWAN, due to their long-range communication capabilities, allows large cultivation areas to be covered with minimal infrastructure investment, becoming an ideal solution for agricultural fields where WiFi signals are intermittent or unavailable. In this way, data connectivity with the base station can be ensured for processing and decision-making purposes.

The results obtained demonstrated high irrigation system efficiency because water waste was avoided and nutrient and insecticide application improved. This represents an alternative solution for the continuous improvement of technology-assisted agriculture, generating greater economic benefits for small-scale farmers and better crop yields. In addition, the system encourages small farmers to continue cultivating their land and make better use of available agricultural areas.

Finally, the development of this project provides small-scale farmers with technological tools that may strengthen confidence in rural agricultural activities and reduce migration toward urban areas, where adaptation conditions are often difficult. Local administrations also benefit because they contribute to maintaining food security and promoting productive use of agricultural land. Likewise, the Universidad de Cundinamarca contributes to the community by providing real technological solutions aligned with its Transmodern Digital Educational Model (MEDIT), which promotes environmental sustainability and the integration of technology for human development.

REFERENCES

[1] M. S. Munir, I. F. Akyildiz, and S. H. Ahmed, "Water-efficient smart irrigation systems using IoT and edge computing: A review," *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 34–41, 2022, doi: 10.1109/IOTM.001.2100104.

[2] J. Leng, D. Ruan, and J. Jiang, "Data-driven smart agriculture based on edge computing and IoT technologies," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136424–136438, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116745.

[3] H. Elazhary, M. Bouras, and M. Ouzzif, "Edge computing for precision agriculture: Opportunities and challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 104998–105012, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3209874.

[4] A. Farooq, H. Deng, and M. Hussain, "LoRaWAN-based smart agriculture monitoring systems: A review," *Sensors*, vol. 23, no. 4, pp. 1–22, 2023, doi: 10.3390/s23042011.

[5] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture*. Rome, Italy: FAO, 2021. [Online]. Available: https://www.fao.org/. [Accessed: May 9, 2026].

[6] M. S. Munir, I. F. Akyildiz, and S. H. Ahmed, "Water-efficient smart irrigation systems using IoT and edge computing: A review," *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 34–41, 2022, doi: 10.1109/IOTM.001.2100104.

[7] J. Leng, D. Ruan, and J. Jiang, "Data-driven smart agriculture based on edge computing and IoT technologies," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136424–136438, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116745.

[8] A. Farooq, H. Deng, and M. Hussain, "LoRaWAN-based smart agriculture monitoring systems: A review," *Sensors*, vol. 23, no. 4, pp. 1–22, 2023, doi: 10.3390/s23042011.

[9] M. A. Mohammed, A. K. Burhanuddin, and R. A. Abdulkareem, "Wireless communication technologies for smart agriculture applications: A comparative review," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 55234–55250, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3276114.

[10] H. Elazhary, M. Bouras, and M. Ouzzif, "Edge computing for precision agriculture: Opportunities and challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 104998–105012, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3209874.

[11] Y. Wang, H. Su, and B. Zhang, "Edge computing for smart agriculture: Opportunities, challenges, and future directions," *IEEE Network*, vol. 36, no. 6, pp. 174–181, 2022, doi: 10.1109/MNET.011.2100565.

[12] S. R. Khandelwal and P. K. Gupta, "Smart irrigation technologies for sustainable agriculture under climate variability," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 38, 2023, doi: 10.1016/j.suscom.2023.100889.

[13] A. Farooq, H. Deng, and M. Hussain, "LoRaWAN-based smart agriculture monitoring systems: A review," *Sensors*, vol. 23, no. 4, pp. 1–22, 2023, doi: 10.3390/s23042011.

[14] A. Banks and R. Gupta, "MQTT Version 3.1.1," OASIS Standard, 2014.

[15] Y. Wang, H. Su, and B. Zhang, "Edge computing for smart agriculture: Opportunities, challenges, and future directions," *IEEE Network*, vol. 36, no. 6, pp. 174–181, 2022, doi: 10.1109/MNET.011.2100565.

[16] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2020.

[17] M. S. Munir, I. F. Akyildiz, and S. H. Ahmed, "Water-efficient smart irrigation systems using IoT and edge computing: A review," *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 34–41, 2022, doi: 10.1109/IOTM.001.2100104.

[18] S. R. Khandelwal and P. K. Gupta, "Smart irrigation technologies for sustainable agriculture under climate variability," *Sustainable*

Computing: Informatics and Systems, vol. 38, 2023, doi: 10.1016/j.suscom.2023.100889.

[19] J. Leng, D. Ruan, and J. Jiang, "Data-driven smart agriculture based on edge computing and IoT technologies," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136424–136438, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116745.

[20] H. Elazhary, M. Bouras, and M. Ouzzif, "Edge computing for precision agriculture: Opportunities and challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 104998–105012, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3209874.

[21] Y. Wang, H. Su, and B. Zhang, "Edge computing for smart agriculture: Opportunities, challenges, and future directions," *IEEE Network*, vol. 36, no. 6, pp. 174–181, 2022, doi: 10.1109/MNET.011.2100565.

[22] A. Farooq, H. Deng, and M. Hussain, "LoRaWAN-based smart agriculture monitoring systems: A review," *Sensors*, vol. 23, no. 4, pp. 1–22, 2023, doi: 10.3390/s23042011.

SAPHIR: Transformación Digital del Ecosistema Docencia-Servicio en Hospitales de Alta Complejidad mediante IA y Automatización

Erika Insuasty
Coordinación Docencia Servicio
Fundación Hospital San Pedro
Pasto - Colombia
coordinacion.docenciaservicio@hospitalsanpedro.org

Franco Montenegro
Coordinación de Investigaciones Clínicas
Fundación Hospital San Pedro
Pasto - Colombia
director.cic@hospitalsanpedro.org

Sixto Campaña
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Pasto - Colombia
sixto.campana@unad.edu.co

Ivan Galindez
Docencia Servicio
Fundación Hospital San Pedro
Pasto - Colombia
ivangfz@gmail.com

Luis Ortiz
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Popayan - Colombia
luis.ortiz@unad.edu.co

***Resumen*— La relación entre las instituciones prestadoras de servicios de salud y las Instituciones de Educación Superior (IES) en Colombia está regulada por un marco normativo estricto que exige una coordinación precisa para la formación de talento humano en salud. Sin embargo, la suscripción de convenios, su gestión, seguimientos y evaluaciones suele realizarse mediante procesos manuales o sistemas fragmentados que pueden generar opacidad y carga administrativa. Acorde a lo anterior, este trabajo presenta el desarrollo e implementación de la plataforma SAPHIR, una solución de transformación digital diseñada para y con la dirección y apoyo de la Fundación Hospital San Pedro (FHSP) de Pasto, Nariño, que busca automatizar y optimizar el ciclo de vida de la relación Docencia-Servicio.**

El sistema SAPHIR, desde su concepción y desarrollo, se ha estructurado en cinco módulos progresivos que propenden por integrar desde la gestión administrativa hasta la analítica avanzada. Los tres primeros módulos, ya operativos, abarcan: (i) Admisión de estudiantes de pregrado (Cumplimiento de requisitos administrativos de ingreso, seguimiento y evaluaciones) (ii) Admisión de médicos internos (Convocatoria, selección, seguimiento y evaluaciones); y (iii) la gestión de encuestas de satisfacción y cumplimiento de indicadores de calidad; los últimos dos módulos estarán dirigidos a la plataforma de educación continuada y el uso de la IA en la generación de reportes y análisis del proceso de formación de los profesionales y estudiantes que acuden a la FHSP. La arquitectura de la plataforma que está en desarrollo permite la trazabilidad completa del estudiante, interno o residente, según sea el caso, desde su ingreso hasta la culminación de su práctica, internado o residencia, buscando cumplir con los estándares exigidos por los Ministerios de Salud y Educación de Colombia.

Un elemento diferenciador de esta investigación es la proyección hacia el Módulo de Inteligencia Artificial, actualmente en desarrollo. Este componente utiliza ciencia de datos para analizar el desempeño académico y clínico de los estudiantes de pregrado, internos y residentes, con el fin de facilitar a los coordinadores de docencia la identificación de brechas formativas o fortalezas de manera temprana. El sistema en desarrollo trabaja con dashboards de resultados generales por IES, y además propende por ofrecer una evaluación rápida y eficiente mediante dispositivos móviles, permitiendo que médicos especialistas y hospitalarios califiquen competencias en el punto de atención.

La implementación en la FHSP sirve como caso de éxito y modelo escalable para otras entidades de salud en el país. Al digitalizar la relación Docencia-Servicio, SAPHIR busca reducir la subjetividad en la evaluación, optimizar los tiempos de respuesta administrativa y fortalecer el clima organizacional entre los actores académicos y asistenciales. Este trabajo se ha planteado evidenciar la integración de herramientas 4.0 en la gestión hospitalaria, lo cual es fundamental para elevar la calidad de la educación en salud y, por ende, la seguridad y humanización en el cuidado del paciente en sistemas de salud de alta complejidad.

***Palabras clave*—** *Docencia-Servicio, Transformación Digital, Gestión Hospitalaria, SAPHIR, IA, Educación Médica, Salud 4.0.*

I. Introducción

La transformación digital en los sistemas de salud se ha consolidado como uno de los principales pilares estratégicos para fortalecer la eficiencia hospitalaria, la interoperabilidad institucional y la formación del talento humano en salud en escenarios clínicos de alta complejidad; con respecto a este último, exige una articulación efectiva entre Instituciones de Educación Superior (IES) y las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS). Los hospitales que atienden la formación universitaria se convierten así en escenarios complejos donde confluyen procesos académicos, administrativos, asistenciales e investigativos. A pesar de la importancia reconocida de la educacion clinica, su gestion administrativa sigue dependiendo en gran medida de procedimientos manuales: carpetas fisicas, hojas de calculo fragmentadas y comunicaciones informales por correo electronico[1-2]. Esta fragmentación genera carga administrativa, subjetividad evaluativa, dificultades en la

trazabilidad y barreras para el cumplimiento de los estándares nacionales de acreditación en salud, incluyendo el Decreto 2376/2010 [12] que regula la relación docencia-servicio en Colombia. Estas dificultades se acentúan en entornos hospitalarios donde convergen simultáneamente múltiples programas académicos, especialidades médicas y actores asistenciales, requiriendo plataformas interoperables capaces de integrar procesos clínicos, administrativos y educativos bajo esquemas digitales escalables y orientados a datos.

En respuesta a estas necesidades, los paradigmas asociados a Salud 4.0 han impulsado la incorporación de arquitecturas inteligentes basadas en analítica avanzada, minería de datos e inteligencia artificial (IA) para optimizar la gestión hospitalaria y educativa [3-4].

En consonancia con lo anterior, la Fundación Hospital San Pedro (FHSP), institución de alta complejidad y hospital acreditado de referencia en el suroccidente colombiano, enfrenta desafíos asociados a la gestión de convenios, prácticas formativas, internados, residencias médicas y evaluación del desempeño clínico. Ante este escenario, surge la necesidad de una solución integral que permita: centralizar la información Docencia-Servicio; cumplir requisitos normativos y de calidad; reducir la carga administrativa; y facilitar la investigación y la analítica de datos, entre otros aspectos.

Por lo anterior, el presente estudio responde al reto identificado, mediante dos contribuciones complementarias. Primero, un EMS según la metodología de Petersen et al. [5][14] y Kitchenham & Charters [6], donde se analiza la literatura científica global sobre herramientas digitales para la gestión de la educación clínica. Segundo, con base en las necesidades reveladas por el EMS y un diagnóstico institucional estructurado en la FHSP, el articulo describe el diseño, la arquitectura técnica, el modelo administrativo y la implementación piloto de SAPHIR.

SAPHIR es una plataforma de transformación digital desarrollada conjuntamente con la Fundación Hospital San Pedro (FHSP) de Pasto, Nariño, orientada a automatizar el ciclo de vida de la relación Docencia–Servicio mediante una arquitectura modular y escalable basada en principios de Salud 4.0.

II. Marco Conceptual y Antecedentes

A. *Marco Conceptual:*

1) Docencia Servicio en Salud: La relación Docencia-Servicio está regulada por convenios que garantizan la calidad formativa y la seguridad del paciente. Según la normativa colombiana, las IPS deben demostrar control, seguimiento y evaluación de las prácticas formativas, lo cual demanda sistemas confiables de información.

2) Transformación Digital en Salud: La transformación digital en salud implica la adopción de tecnologías 4.0 orientadas a mejorar procesos, experiencias y decisiones. Plataformas interoperables, analítica de datos e inteligencia artificial se convierten en habilitadores fundamentales para la gestión hospitalaria moderna.

3) Sistemas de Información Académico Asistenciales: La literatura evidencia que la mayoría de sistemas existentes abordan componentes aislados (evaluación, simulación, LMS), dejando una brecha en soluciones integrales que cubran todo el ciclo de vida del estudiante en contextos clínicos reales, brecha que SAPHIR busca cerrar.

B. *Antecedentes y trabajos relacionado:*

La educación clínica en entornos hospitalarios integra conocimiento teórico con toma de decisiones profesional mediante atención directa a pacientes bajo supervisión especializada [7]. Organizar estas experiencias requiere la gestión coordinada de planeación de horarios, asignación de rotaciones, supervisión docente y evaluación del desempeño. Sin embargo, muchos hospitales universitarios aun dependen de procedimientos manuales.

El aprendizaje combinado (blended learning) ha demostrado resultados superiores al aprendizaje presencial y en línea por separado en contextos de educación médica [11]. Los modelos en línea presentan ventajas en flexibilidad y acceso [10]. La inteligencia artificial (IA) es reconocida como transformadora en educación médica [8], con aplicaciones crecientes en evaluación de competencias y analítica del aprendizaje [13]. Las revisiones de herramientas de medición del internado medico [9] confirman la falta de instrumentos estandarizados en contextos de bajos y medianos ingresos, lo que refuerza la necesidad de plataformas integradas como SAPHIR.

A pesar de estos avances, persiste una brecha critica: son escasas las plataformas comprensivas que integren el ciclo académico completo. Esta brecha es particularmente pronunciada en America Latina, donde el Decreto 2376/2010 [12] impone requisitos de cumplimiento normativo adicionales que las plataformas internacionales existentes no contemplan.

Por otra parte, la transformación digital en los sistemas de salud ha evolucionado significativamente durante la última década debido al crecimiento de tecnologías asociadas a Salud 4.0, inteligencia artificial, interoperabilidad clínica y analítica avanzada. Diversos estudios han demostrado que la digitalización hospitalaria permite optimizar procesos administrativos, clínicos y académicos mediante arquitecturas tecnológicas orientadas a la automatización, integración de datos y toma de decisiones basada en evidencia [1], [2]. Por lo anterior, la transformación digital en salud constituye un factor estratégico para mejorar la eficiencia operativa y reducir la fragmentación institucional mediante sistemas inteligentes basados en datos.

En el ámbito de la educación médica y la relación IPS–IES, la literatura reciente muestra un creciente interés por el uso de plataformas digitales para la automatización de procesos académicos hospitalarios, particularmente en la gestión de

rotaciones, evaluación de estudiantes y seguimiento de indicadores de calidad educativa [4], donde se argumenta que la transformación digital en las Instituciones de Educación Superior requiere modelos interoperables capaces de integrar ambientes académicos y escenarios clínicos mediante arquitecturas flexibles y escalables. Sin embargo, en Latinoamérica aún persisten importantes brechas relacionadas con interoperabilidad, automatización y gobernanza de datos en hospitales universitarios.

Paralelamente, el crecimiento de arquitecturas basadas en Knowledge Discovery in Databases (KDD) y minería de datos ha impulsado nuevas estrategias para el procesamiento inteligente de información clínica y académica [15-16]. Los modelos KDD permiten desarrollar procesos de selección, depuración, transformación y análisis de datos orientados a identificar patrones de desempeño, riesgos formativos y oportunidades de mejora institucional mediante algoritmos de aprendizaje automático e inteligencia artificial [15].

Por otra parte, en relación con herramientas de IA y automatización de procesos de Docencia Servicio, la literatura evidencia una creciente adopción de arquitecturas interoperables basadas en microservicios, HL7/FHIR, cloud computing y sistemas orientados a servicios (SOA), los cuales permiten integrar historias clínicas electrónicas, plataformas académicas y sistemas de evaluación clínica en entornos hospitalarios complejos [17-18]. Estas tecnologías han facilitado la consolidación de hospitales inteligentes capaces de incorporar inteligencia artificial, analítica predictiva y automatización avanzada en procesos asistenciales y educativos [18-19]. Estudios recientes también muestran que la inteligencia artificial aplicada a educación médica puede contribuir a la evaluación automatizada de competencias clínicas, generación de reportes institucionales y seguimiento predictivo del desempeño académico [17], [20], fortaleciendo la capacidad de respuesta de los coordinadores Docencia–Servicio.

En relación con Salud 4.0, [18] y [19] sostienen que la integración de tecnologías emergentes como Internet de las Cosas Médicas (IoMT), Big Data, inteligencia artificial y analítica avanzada está redefiniendo los modelos tradicionales de gestión hospitalaria hacia ecosistemas digitales inteligentes y centrados en datos. Desde esta perspectiva, la automatización de procesos Docencia–Servicio representa una línea emergente de investigación con alto impacto potencial en hospitales con actividad académica universitaria, especialmente en países en desarrollo donde aún predominan modelos administrativos tradicionales. A pesar de los avances identificados, el mapeo sistemático realizado permitió evidenciar que existe una limitada cantidad de investigaciones enfocadas específicamente en plataformas integradas para la gestión de convenios, rotaciones clínicas y evaluación académica en hospitales universitarios latinoamericanos. La mayoría de estudios se concentra en transformación digital clínica o administrativa, dejando vacíos importantes en relación con la automatización de procesos académicos hospitalarios y la integración de arquitecturas KDD e inteligencia artificial aplicadas a la relación Docencia–Servicio.

Estas brechas justifican la necesidad de desarrollar soluciones interoperables, escalables y basadas en analítica avanzada que permitan optimizar la trazabilidad académica, fortalecer la gobernanza de datos y mejorar la calidad de la formación médica en escenarios hospitalarios de alta complejidad. En este contexto surge SAPHIR, una plataforma de transformación digital desarrollada conjuntamente con la Fundación Hospital San Pedro (FHSP) de Pasto, Nariño, orientada a automatizar el ciclo de vida de la relación Docencia–Servicio mediante módulos integrados.

III. Metodología

En el desarrollo de SAPHIR se ha trabajado con un enfoque de Investigación Aplicada de tipo mixto secuencial. Las fases que se han abordado y aún en están en ejecución corresponden a: Diagnóstico Institucional, Revisión y mapeo sistemático, Desarrollo y diseño del sistema e Implementación piloto y validación.

A. Estudio de Mapeo Sistemático (EMS)

El EMS siguió las directrices metodológicas de Petersen et al. [5] y la actualización de 2015 [14], complementadas con Kitchenham & Charters [6]. El proceso comprende siete fases:

1. Definición del alcance;
2. Sistematización de la experiencia institucional en la FHSP;
3. Formulación de preguntas de investigación;
4. Búsqueda estructurada de literatura; (
5. Cribado y selección; (
6. Extracción y clasificación de datos;
7. Síntesis e identificación de brechas.

Las búsquedas se realizaron en seis bases de datos académicas: PubMed, Scopus, ScienceDirect, Web of Science, IEEE Xplore y Google Scholar, complementadas con redes de citación ResearchRabbit y Connected Papers. Se identificaron 48 registros iniciales. Tras eliminación de duplicados y cribado en dos niveles (titulo/resumen y texto completo), 34 artículos publicados entre 2021 y 2025 cumplieron los criterios de inclusión.

B. Sistematización Institucional en la FHSP

Complementando el EMS, se realizó una sistematización de experiencias en el proceso de Docencia-Servicio de la FHSP mediante: diálogos semiestructurados con el personal de

coordinación; revisión de bitácoras físicas y digitales; análisis de informes de gestión bimestrales; y examen de los marcos regulatorios que rigen los convenios instituciones educativas-hospital. Esta fase proporcionó los requisitos funcionales y las restricciones de flujo de trabajo que orientaron el diseño arquitectónico de SAPHIR.

C. *Transformación digital de la relación Docencias Servicio en la FHSP*

La plataforma SAPHIR fue concebida como una solución integral orientada a fortalecer la relación Docencia–Servicio entre las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS) y las Instituciones de Educación Superior (IES), mediante la automatización de procesos académicos, administrativos y asistenciales asociados a convenios, rotaciones clínicas y evaluación de competencias.

Su desarrollo responde a las necesidades identificadas en estudios sobre madurez digital hospitalaria y transformación digital en salud, donde diferentes estudios [1-2] destacan que múltiples hospitales universitarios continúan operando con procesos fragmentados, escasa interoperabilidad y limitaciones en la trazabilidad institucional. Desde esta perspectiva, SAPHIR integra los principios de Salud 4.0, interoperabilidad clínica y automatización inteligente, permitiendo consolidar un ecosistema digital orientado a optimizar la gestión de estudiantes, internos y residentes en escenarios hospitalarios de alta complejidad. La plataforma se ha concebido para incorporar herramientas de analítica avanzada e inteligencia artificial, alineándose con las tendencias descritas en algunos estudios de referencia [18-19], quienes sostienen que la integración de tecnologías digitales, Big Data y sistemas inteligentes constituye uno de los principales ejes evolutivos de los hospitales inteligentes modernos.

D. *Arquitectura de Datos y Modelo KDD*

La arquitectura metodológica de SAPHIR se fundamenta en un enfoque híbrido entre modelos Data Lake, Data Warehouse y arquitectura Inmon, permitiendo integrar información proveniente de expedientes académicos, sistemas hospitalarios, bases documentales y registros administrativos dentro de un único entorno interoperable. [15] señalan que la armonización e integración de datos hospitalarios representa uno de los principales desafíos de la transformación digital en salud, particularmente en ecosistemas donde convergen múltiples fuentes heterogéneas de información clínica y académica. En este contexto, SAPHIR implementa un proceso KDD (Knowledge Discovery in Databases) orientado a transformar datos operacionales en conocimiento estratégico para la toma de decisiones institucionales. El modelo contempla etapas de selección, limpieza, transformación, minería e interpretación de datos, permitiendo identificar patrones relacionados con desempeño académico, rotaciones clínicas, ocupación hospitalaria y evaluación de competencias. [16] destaca que los modelos analíticos basados en minería de datos e inteligencia institucional permiten mejorar significativamente la calidad de los servicios hospitalarios y fortalecer la capacidad de respuesta organizacional.

La plataforma se ha planeado para que organice la información mediante Datamarts especializados para áreas hospitalarias como urgencias, hospitalización, UCI y docencia, facilitando la generación de indicadores específicos por dependencia clínica. Esta estructura permitirá centralizar la información académica y asistencial bajo principios de interoperabilidad y gobernanza de datos, siguiendo los enfoques de arquitectura empresarial hospitalaria descritos [17]. La Figura 1 presenta la arquitectura funcional y metodológica de SAPHIR, integrando el flujo digital de gestión académica hospitalaria, el proceso KDD de descubrimiento de conocimiento, la arquitectura Inmon para organización de datos y los componentes inteligentes de automatización y analítica institucional.

Figura 1. Arquitectura metodológica y flujo de automatización inteligente de la plataforma SAPHIR para la gestión Docencia–Servicio en hospitales universitarios. (*figure caption*)



Fuente: Esta Investigación

IV. Resultados

A. *Hallazgos del Mapeo Sistemático*

Los 34 artículos seleccionados se clasificaron en cinco clúster temáticos (Tabla 1). Se observa un evidente incremento en la producción científica a partir de 2022 (3 artículos en 2021; 9 en 2022; 10 en 2023; 8 en 2024; 4 en 2025).

TABLA 1 *Distribución de estudios seleccionados por clúster de investigación.*

Clúster	Tema Principal	Arts.	%
Clúster 1	Enseñanza Clínica	12	35 %
Clúster 2	Internado Médico y Rotaciones	8	24 %
Clúster 3	Innovación Educativa y Tecnología	7	21 %
Clúster 4	Evaluación del Aprendizaje Clínico	4	12 %
Clúster 5	Gestion Académica Hospitalaria	3	8 %
TOTAL		**34**	**100 %**

El Cluster 5 -Gestión Académica Hospitalaria- es el menos representado (8%), confirmando la brecha de investigación que ha motivado el desarrollo en la FHSP de SAPHIR. De los 34 artículos, solo 11 (32%) describen sistemas digitales específicos. El diagnostico institucional en la FHSP confirmó estos hallazgos empíricamente: previo a SAPHIR, el 100% de la programación de rotaciones se gestionaba mediante hojas de cálculo descentralizadas, generando un margen de error del 15% en la trazabilidad de estudiantes y retrasos en los reportes académicos bimestrales.

B. *Modelo Administrativo*

El modelo administrativo de SAPHIR operacionaliza el Decreto 2376/2010 [8] dentro de un entorno digital. Se pueden identificar dos flujos de gestión paralelos:

Flujo A: Estudiantes de Pregrado - Modulo 1

* Gestión de convenios institucionales: carga, control de versiones y alertas de vencimiento para convenios marco, registros calificados, acuerdos de la comisión y anexos técnicos con cada IES.
* Registro estudiantil y verificación documental en dos niveles (IES -> FHSP): cedula, carnet de vacunación, póliza de responsabilidad civil, afiliación ARL, etc
* Planes de practica: actividades, fechas, docentes responsables e indicadores de logro por programa académico.
* Seguimiento de actividades: registro de asistencia, bioseguridad y conducta; generación automática de formato de seguimiento.
* Encuestas de satisfacción configurables por ciclo de practica para estudiantes, docentes y profesionales hospitalarios.

Flujo B: Médicos Internos - Modulo 2

* Convocatorias IES invitadas y cronograma de selección; registro de candidatos con expediente académico.
* Verificación documental de más de 20 documentos obligatorios por candidato en dos niveles, con rechazo
* justificado y notificaciones automáticas por correo electrónico.
* Motor de exámenes integrado: banco de más de 438 preguntas por especialidad médica; acceso por código QR para aplicación presencial supervisada; sesiones temporizadas con auto-envío.
* Entrevistas con rubricas estandarizadas para médicos y psicólogos evaluadores (conocimiento clínico, razonamiento, actitud, comunicación, bioseguridad).
* Ranking ponderado automatizado: GPA académico + examen técnico + evaluación psicotécnica + entrevista; exportación en XLSX, carnetización, formato SIO SALUD y reporte sindical.
* Programación de rotaciones asistida por IA para ciclos de 12 meses, respetando relaciones cama-interno, normas de bioseguridad y estructuras de programa por IES.
* Evaluación mensual de internos por rotación con tipos configurables (asistencia, conocimientos, actitud, bioseguridad, prueba técnica - ~~cada uno 20%~~); tableros en tiempo real.

C. *Arquitectura técnica – Dimensión de Ingeniería*

SAPHIR adopta el patron Screaming Architecture, que organiza el software en dominios funcionales de negocio. Los modulos independientes incluyen: autenticación, gestión de usuarios, administración de IES, convocatorias, programación de rotaciones, motor de examenes y gestión de evaluaciones.

Cada módulo implementa internamente el patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC), garantizando la separación entre lógica de negocio, persistencia de datos e interfaz de usuario. La Tabla 2 resume el stack tecnológico completo.

TABLA 2 *STACK TECNOLÓGICO DE SAPHIR*

Componente	Tecnologia	Funcion
Backend	Node.js + Express.js	Lógica de servidor, API REST, enrutamiento
Base de Datos	MongoDB (NoSQL)	Estructuras flexibles: convenios, evaluaciones, candidatos
Frontend	HTML5, CSS3, Bootstrap 5, EJS	Interfaz responsiva, renderizado lado servidor
Autenticación	Passport.js + JWT + Bcrypt	RBAC, sesiones seguras sin estado, cifrado
Identidad	Cloud VPS Servidores FHSP	SO institucional para usuarios FHSP
Infraestructura	Ubuntu Server (Linux)	Estabilidad y eficiencia en producción
Arquitectura	Screaming Arch. + MVC	Módulos por dominio funcional, separación limpia
IA (Modulo 4)	Python / ML (planificado)	Analítica predictiva de desempeño académico
Módulo 5	Plataforma Educativa LMS	Plataforma para cursos virtuales y capacitaciones Institucionales

El Control de Acceso Basado en Roles (RBAC) define cinco perfiles: Super Administrador, Coordinador FHSP, Coordinador IES, Profesional Evaluador y

Proceso	Modelo Tradicional	Piloto SAPHIR
Registro Documental	Manual y Físico	Digitial y Automatizado
Gestión de Convenios	Hojas de Cálcuo	Plataforma centralizada
Rotaciones Clínicas	Asignación Manual Hoja de Cálculo	Algoritmo automatizado
Evaluación Académica	Formatos Físicos	Tiempo real uso del Celular (Móvil)
Reportes Institucionales	Parciales	Dashboards dinámicos
Seguimiento estudiantil	Fragmentado	Trazabilidad Integral

Candidato/Estudiante. La seguridad incluye sesiones sin estado con JWT, cifrado de contraseñas con Bcrypt e integración con con la nube propia de la FHSP. La metodología de desarrollo siguió el Desarrollo Rápido de Aplicaciones (DRA) en cinco fases: (A) Diagnostico; (B) Diseño y Desarrollo; (C) Piloto; (D) Implementación Completa; (E) Monitoreo Continuo. La arquitectura tiene dos módulos en desarrollo, un Módulo 4 de IA/Data Science; que aplicará aprendizaje automático a datos longitudinales de desempeño para analítica predictiva y toma de decisiones de mejora; y un Módulo 5 de plataforma educativa LMS, para cursos de inducción obligatoria de estudiantes, internos y docentes.

La plataforma opera como intranet institucional accesible en https://aprendiendo.hospitalsanpedro.org, con interfaz responsiva en Bootstrap 5 optimizada para escritorio y dispositivos móviles.

D. Resultado de Implementación Piloto de SAPHIR

La implementación de SAPHIR en la Fundación Hospital San Pedro (FHSP) permitió digitalizar y automatizar procesos previamente gestionados mediante procedimientos manuales y documentación física. Entre los principales resultados obtenidos se encuentra la sistematización del registro documental de candidatos, la automatización de convocatorias y la gestión centralizada de rotaciones clínicas y evaluaciones académicas. La plataforma ha permitido integrar información académica y hospitalaria dentro de un único entorno interoperable, facilitando la trazabilidad completa de estudiantes e internos desde el ingreso hasta la finalización de sus prácticas clínicas.

Estos resultados coinciden con los planteamientos de algunos autores [15], quienes afirman que la integración de ecosistemas interoperables constituye uno de los principales factores para mejorar la eficiencia operativa en instituciones hospitalarias. Adicionalmente, la automatización de procesos de evaluación clínica mediante dispositivos móviles propende por optimizar los tiempos de calificación y seguimiento académico en tiempo real. En la tabla 3 se puede identificar lo que se tenía antes del desarrollo de SAPHIR y lo que se está logrando con la implementación del mismo en la FHSP.

TABLA 3 *COMPARACIÓN PROCESOS ANTES Y DESPUÉS DE SAPHIR*

Del mismo modo, la plataforma permitió consolidar indicadores institucionales relacionados con ocupación hospitalaria, capacidad instalada, desempeño académico y cumplimiento documental mediante dashboards dinámicos y modelos analíticos basados en arquitectura KDD.

V. DISCUSIÓN

La convergencia de los hallazgos del EMS, el diagnóstico institucional en la FHSP y el desarrollo piloto de la plataforma SAPHIR, permiten evidenciar la necesidad y oportunidad del sistema en desarrollo: las soluciones digitales en educación médica se concentran en herramientas de aprendizaje [10][11] e instrumentos de evaluación aislados [7][8][13], mientras que la infraestructura administrativa, tales como convenios, admisiones, rotaciones y trazabilidad, permanece ampliamente desatendida tanto en la literatura científica (8% según Clúster 5) como en la oferta tecnológica disponible.

SAPHIR se ha diseñado para cerrar esta brecha proporcionando un unico entorno digital que cubre el ciclo operativo completo de la relacion docencia-servicio. Su alineacion con el Decreto 2376/2010 [12] y los estandares de acreditacion ICONTEC la hacen sobresalir de los sistemas genéricos de gestión del aprendizaje. La elección de un stack de código abierto (Node.js, MongoDB, Bootstrap) maximiza la accesibilidad para instituciones con presupuestos de TI limitados, consideración crítica y no menor en el contexto latinoamericano.

El patrón Screaming Architecture, aunque menos común en software académico, hasta ahora ha resultado pertinente y eficaz para un dominio con múltiples actores heterogéneos, tales como: estudiantes, internos, coordinadores IES, médicos hospitalarios, psicólogos y administradores, cada uno con paradigmas de interfaz y conjuntos de permisos distintos

La implementacion piloto que se ha realizado, ha permitido confirmar la viabilidad operativa: el Modulo 2 ha venido gestionando de manera exitosa la convocatoria de noviembre 2025 (41 candidatos, 3 IES), con exámenes digitales completos, calificación de entrevistas y generación automatizada de rankings. La programacion de rotaciones asistida por IA generó una matriz de 12 meses para 40 internos activos en 6 especialidades clinicas sin intervencion manual, eliminando el margen de error del 15% documentado con el sistema manual anterior. Estos resultados validan SAPHIR no solo como prototipo de investigación sino como herramienta institucional lista para producción.

VI. CONCLUSIONES

Este articulo propende por evidenciar que la gestion academica hospitalaria constituye una brecha crítica tanto en la literatura científica (8% de los estudios revisados segun el EMS [1][10]) como en la práctica institucional. Por lo anterior, SAPHIR responde a esta brecha mediante una plataforma integrada, modular y orientada al cumplimiento del Decreto 2376/2010 [8] que digitaliza el ciclo completo de gestión de la docencia-servicio.

Las tres dimensiones analíticas del sistema, que comprenden: la parte administrativa, lo investigativo y de ingeniería, son mutuamente reforzantes: el EMS aporta la justificación empírica [1][2][10]; el diagnóstico institucional provee los requisitos funcionales; y la arquitectura técnica ofrece un modelo de implementación replicable. La eliminación de la programación manual (antes 100% en hojas de cálculo con 15% de error), la estandarización de exámenes y evaluaciones, y la generación de reportes de cumplimiento para las autoridades de acreditación representan mejoras institucionales inmediatas y medibles.

La experiencia desarrollada en la Fundación Hospital San Pedro (FHSP) demuestra que la incorporación de arquitecturas KDD, inteligencia artificial y automatización avanzada puede fortalecer significativamente la calidad de la educación médica, optimizar la gestión hospitalaria y contribuir a la seguridad del paciente en hospitales universitarios de alta complejidad.

El trabajo futuro en el corto plazo se centrará en el Módulo 4 (analítica predictiva con Python/ML) y el Módulo 5 (integración LMS para inducción obligatoria). El sistema está en desarrollo, pero con avances significativos, se trabajará en el corto plazo en procesos continuaos de validación de la escalabilidad de SAPHIR en el contexto institucional y con las entidades que se interactúa para la gestión académica y administrativa de los procesos de Docencia Servicio en la FHSP y así avanzar en la consolidación de un sistema que responda la demanda existente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al equipo de coordinacion de Docencia-Servicio de la FHSP por su apertura a la innovacion y colaboracion sostenida durante todo el proyecto. Se reconoce el apoyo del Grupo de Investigacion DAVINCI-UNAD. Este trabajo forma parte de un proyecto de investigacion aplicada de 24 meses financiado con recursos institucionales de la FHSP en alianza con la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD.

Referencias

[1] Duncan, R., Eden, R., Woods, L., Wong, I., Sullivan, C.: Synthesizing dimensions of digital maturity in hospitals: Systematic review. Journal of Medical Internet Research 24(3), e32994 (2022). https://doi.org/10.2196/32994

[2] Oliveira, T., et al.: The role of digital transformation in improving the efficacy of healthcare: A systematic review. Journal of High Technology Management Research 34(1), 100442 (2023). https://doi.org/10.1016/j.hitech.2022.100442

[3] Akhtar, N., Khan, N., Khalid, S., Qureshi, M.: Efficacy and pitfalls of digital technologies in healthcare services: A systematic review of two decades. Frontiers in Public Health 10, 869793 (2022). https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.869793

[4] Castro Benavides, L.M., Tamayo Arias, J.A., Burgos, D.: Distinctive characteristics of digital transformation in higher education institutions. In: Proceedings of the International Conference on Education and Digital Transformation, pp. 1–12 (2022). https://doi.org/10.26507/paper.2127

[5] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, y M. Mattsson, *Systematic Mapping Studies in Software Engineering,* en Proc. 12th Int. Conf. Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE), BCS, jun. 2008, pp. 68-77. doi: 10.14236/ewic/EASE2008.8 URL: https://www.scienceopen.com/hosted-document?doi=10.14236%2Fewic%2FEASE2008.8

[6] B. Kitchenham y S. Charters, *Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering,* Keele Univ. y Durham Univ., Rep. Tec. EBSE-2007-01, jul. 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/302924724

[7] Z. Khalaf y S. Khan, *Education During Ward Rounds: Systematic Review,* Interact. J. Med. Res., vol. 11, no. 2, e40580, nov. 2022. doi: 10.2196/40580. PMID: 36285742 URL: https://www.i-jmr.org/2022/2/e40580

[8] M. Gordon et al., *A Scoping Review of Artificial Intelligence in Medical Education: BEME Guide No. 84,* Med. Teach., vol. 46, no. 4, pp. 446-470, abr. 2024. doi: 10.1080/0142159X.2024.2314198. PMID: 38423127 URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0142159X.2024.2314198

[9] Y. Zhao et al., *Tools for Measuring Medical Internship Experience: A Scoping Review,* Hum. Resour. Health, vol. 19, art. 10, ene. 2021. doi: 10.1186/s12960-021-00554-7 URL: https://human-resources-health.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12960-021-00554-7

[10] L. Pei y H. Wu, Does Online Learning Work Better than Offline Learning in Undergraduate Medical Education? A Systematic Review and Meta-Analysis, Med. Educ. Online, vol. 24, no. 1, art. 1666538, 2019. doi: 10.1080/10872981.2019.1666538 URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10872981.2019.1666538

[11] A. Vallee, J. Blacher, A. Cariou, y E. Sorbets, *Blended Learning Compared to Traditional Learning in Medical Education: Systematic Review and Meta-Analysis,* J. Med. Internet Res., vol. 22, no. 8, e16504, ago. 2020. doi: 10.2196/16504. PMID: 32773378 URL: https://www.jmir.org/2020/8/e16504

[12] Ministerio de la Protección Social de Colombia, Decreto 2376 de 2010: por medio del cual se regula la relación docencia-servicio para los programas de formación del talento humano del area de la salud, Diario Oficial, no. 47.757, 1 jul. 2010. URL: https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/DECRETO%202376%20DE%202010.pdf

[13] S. Narayanan, R. Ramakrishnan, E. Durairaj, y A. Das, *Artificial Intelligence Revolutionizing the Field of Medical Education,* Cureus, vol. 15, no. 11, e49604, nov. 2023. doi: 10.7759/cureus.49604. PMCID: PMC10755136 URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10755136/

[14] K. Petersen, S. Vakkalanka, y L. Kuzniarz, *Guidelines for Conducting Systematic Mapping Studies in Software Engineering: An Update,* Inf. Softw. Technol., vol. 64, pp. 1-18, ago. 2015. doi: 10.1016/j.infsof.2015.03.007 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950584915000646

[15] Yang, Y., et al.: Data harmonisation for information fusion in digital healthcare: A state-of-the-art systematic review. arXiv preprint arXiv:2201.06505 (2022). https://arxiv.org/abs/2201.06505

[16] García-Angulo, J.L.: ICT management models for improving hospital service quality: A systematic review. Revista Científica de Sistemas e Informática 6(1), 1–15 (2025). https://doi.org/10.51252/rcsi.v6i1.888

[17] da Luz Júnior, S.H., et al.: Enterprise architecture in healthcare systems: A systematic literature review. arXiv preprint arXiv:2007.06767 (2022). https://arxiv.org/abs/2007.06767

[18] Aceto, G., Persico, V., Pescapé, A.: Industry 4.0 and Health 4.0: Applications, challenges and future trends. Journal of Network and Computer Applications 188, 103138 (2021). https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103138

[19] Tortorella, G.L., Fogliatto, F.S., Mac Cawley Vergara, A.: Healthcare 4.0: Trends, challenges and research directions. Production Planning & Control 33(15), 1460–1475 (2022). https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1882697

[20] Chen, X., et al.: Artificial intelligence in medical education: A systematic review. Medical Education Review 57(4), 455–472 (2023). https://doi.org/10.1111/medu.14921

[21]

Ecosistema BEMOTIA: Optimización de una Arquitectura Edge-IoT para el Monitoreo en Tiempo Real y la Gestión del Bienestar Emocional en Entornos Escolares

Sixto Campaña-Bastidas
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Pasto - Colombia
sixto.campana@unad.edu.co

John Barco Jiménez
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Pasto - Colombia
john.barco@unad.edu.co

Abel Méndez Porras
Unidad de Ingeniería en Computación
Tecnológico de Costa Rica - TEC
San Carlos – Costa Rica
amendez@itcr.edu.co

Alvaro Cervelion Bastidas
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Pasto - Colombia
alvaro.cervelion@unad.edu.co

Harold Cabrera Meza
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Pasto - Colombia
harold.cabrera@unad.edu.co

Carlos Fernando Tobar
Escuela de Ciencias Sociales Artes y Humanidades
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Pasto - Colombia
carlos.tobar@unad.edu.co

Efren Jiménez Delgado
Unidad de Ingeniería en Computación
Tecnológico de Costa Rica - TEC
San Carlos – Costa Rica
efjimenez@itcr.edu.co

Roberto Jaramillo Concha
Escuela de Ciencias Sociales Artes y Humanidades
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Pasto - Colombia
roberto.jaramillo@unad.edu.co

***Resumen*—**El proyecto BEMOTIA (Bienestar Emocional con Herramientas de IA e IoT) aborda la denominada crisis de salud mental infantil mediante el desarrollo de tecnología de vanguardia para la identificación objetiva de emociones. Luego de dos años de ejecución y colaboración con aliados nacionales e internacionales, el proyecto se encuentra actualmente en su Fase 2, la cual se centra en la transición hacia un modelo de procesamiento en el borde (Edge Computing) con el fin de lograr una respuesta en tiempo real y propendiendo por la protección de la privacidad de los menores.

La arquitectura tecnológica propuesta en el proyecto, se despliega directamente en el aula de clase utilizando nodos de cómputo periférico (Nvidia Jetson Nano o Raspberry Pi). El núcleo de esta fase es el procesamiento de imágenes capturadas para el reconocimiento facial de emociones, fundamentado en la detección de Unidades de Acción (AU). El sistema ha sido diseñado para evitar el envío de contenido multimedia pesado o datos sensibles a la nube; en su lugar, el procesamiento en el *Edge* busca codificar la información en matrices de datos esenciales que representan la firma emocional del individuo, en este caso el estudiante. Este enfoque propende por optimizar el ancho de banda y buscar que la identificación de la emoción se realice bajo estrictos parámetros de seguridad digital.

El rigor científico del modelo, que aún está en desarrollo y evaluación, se sustenta en un dataset, que fue validado por más de 20 profesionales de la psicología y orientación escolar de la UNAD. Mediante el uso de un software de valencias, que fue desarrollado en la investigación; donde los expertos clasificaron secuencias de video para entrenar algoritmos que logren altos niveles de precisión y exactitud. Por otra parte, es preciso mencionar que el alcance de BEMOTIA trasciende lo técnico, dado que de forma paralela, el equipo de psicólogos realiza una labor de sensibilización con niños, niñas, docentes y orientadores de la Instituciones educativas aliadas, con el objetivo de proporcionarles herramientas para la identificación temprana de emociones y protocolos de actuación ante estados afectivos riesgosos, mitigando complicaciones de salud mental antes de que escalen.

En conclusión hasta el momento, esta investigación aplicada demuestra cómo la ingeniería, a través de la IA y el IoT, puede integrarse con la psicología para crear un entorno escolar preventivo. Los resultados esperados de esta fase se proyectan a consolidar a BEMOTIA como una herramienta de soporte vital en la toma de decisiones para los orientadores, transformando el aula en un espacio emocionalmente inteligente y seguro.

***Palabras clave*—** *BEMOTIA; Bienestar emocional; Edge computing; Inteligencia Artificial; IoT; Reconocimiento facial; Salud mental infantil; Unidades de Acción (AU*

I. Introducción

La salud mental infantil ha alcanzado niveles críticos a escala global. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha identificado que los trastornos de ansiedad y depresión son la principal causa de morbilidad en adolescentes, afectando no solo la estabilidad emocional sino funciones cognitivas fundamentales para el aprendizaje como la atención, la memoria y el control ejecutivo [1]. En regiones en desarrollo como Colombia y Costa Rica, la brecha tecnológica y pedagógica es especialmente pronunciada: mientras la transformación digital se concentra en herramientas administrativas, los mecanismos para monitorear el estado emocional del estudiante siguen siendo rudimentarios, dependientes de la observación subjetiva del docente o el orientador escolar[2].

La Organización Mundial de la Salud ha identificado un incremento significativo en los trastornos afectivos en menores

tras la crisis sanitaria global (COVID-19). En este contexto, sistemas como el que se propone con el proyecto BEMOTIA actúan como herramientas de tamizaje digital preventivo, alineándose con las directrices de salud mental que promueven la detección temprana en el entorno escolar antes de que los síntomas escalen a patologías clínicas [3].

El proyecto BEMOTIA (Bienestar Emocional con Herramientas de IA e IoT) nació precisamente para buscar cerrar esta brecha. Durante su Fase 1 (Aula Inteligente), el equipo de investigación binacional Colombia–Costa Rica logro obtener un "Children's Emotions Dataset", que corresponde a un repositorio único de micro-expresiones faciales de niños entre 10 y 12 años, el cual fue validado por más de 20 psicólogos expertos de la UNAD mediante un software de valencias [4] desarrollado para esta investigación. Esta base científica ha permitido evidenciar la viabilidad técnica del reconocimiento emocional en población infantil, superando la limitación generalizada de los algoritmos comerciales entrenados exclusivamente con datos de adultos [5].

La Fase 2 (BEMOTIA), objeto del presente artículo, representa el salto de un análisis offline de videos hacia un sistema de procesamiento continuo en tiempo real. El eje central de esta transición es la arquitectura Edge Computing, con la cual se busca ejecutar los modelos de visión computacional directamente en el aula, sin transmitir imágenes o video a servidores externos. Este enfoque no solo propende por optimizar el ancho de banda de las redes educativas, sino que busca incorporar privacidad por diseño, un requisito ético no negociable cuando la población investigativa se trata de menores de edad [6]. Adicional a lo anterior, la transición hacia paradigmas de Edge Computing en entornos educativos responde a la necesidad crítica de procesar datos biométricos sensibles sin depender de infraestructuras de nube latentes. Según Shi et al. [7], el Edge Computing permite una respuesta inmediata (low latency) y una preservación de la privacidad que es fundamental cuando se trabaja con poblaciones vulnerables como los niños.

Por otra parte, el uso de Unidades de Acción (AU) basadas en el sistema permite un análisis granular que ayuda encontrar más categorías emocionales. Investigaciones recientes mencionan que el reconocimiento de micro-expresiones mediante IA en el borde permiten identificar estados de ansiedad o estrés académico que suelen pasar desapercibidos en la observación docente convencional [8].

El presente artículo describe la arquitectura tecnológica propuesta, el estado de avance del desarrollo, el componente clínico-psicológico que acompaña la implementación técnica, y los desafíos que el equipo enfrenta para escalar el proyecto BEMOTIA de un prototipo validado a una solución implementable en instituciones educativas reales.

II. Revisión de Literatura

A. *Crisis de Salud Mental en Entornos Escolares*

La pandemia de COVID-19 ha sido uno de los detonantes de la crisis de salud mental preexistente en la población infantil y adolescente. Estudios recientes reportan incrementos del 20% al 30% en la prevalencia de trastornos ansiosos y depresivos en edad escolar en América Latina [1]. Estos trastornos impactan directamente el rendimiento académico al bloquear la memoria de trabajo, reducir la capacidad de concentración y generar conductas de evitación escolar [9]. La detección temprana es, acorde a lo anterior, una prioridad de salud pública con consecuencias directas sobre la permanencia y el éxito académico de los estudiantes.

La brecha entre la aparición de los primeros síntomas emocionales y la intervención clínica efectiva puede ser de varios años, periodo en el cual el rendimiento académico y el desarrollo social del menor se ven comprometidos. En entornos escolares, esta brecha de detección se agrava por la alta proporción de estudiantes por orientador y docente en el aula, lo que hace que las pequeñas señales de ansiedad o retraimiento pasen desapercibidas hasta que se manifiestan en crisis conductuales [10].

La literatura reciente sugiere que el aula no debe ser solo un espacio de instrucción, sino un sensor activo de bienestar. La integración de sistemas de monitoreo no intrusivos permite una vigilancia epidemiológica de la salud mental escolar, facilitando que el orientador escolar o docente actúe basándose en datos objetivos y no solo en reportes subjetivos [11].

Uno de los mayores obstáculos en la gestión de la salud mental escolar es el estigma asociado a la evaluación psicológica tradicional. El uso de herramientas de Inteligencia Artificial que analizan expresiones faciales de forma automatizada ofrece una alternativa de tamizaje menos estigmatizante, siempre que se garantice la privacidad. Este enfoque preventivo permite identificar la tríada cognitiva del riesgo emocional de manera proactiva, transformando el entorno escolar en un ecosistema inteligente de soporte [12].

B. *Computación Afectiva y Reconocimiento de Expresiones Faciales:*

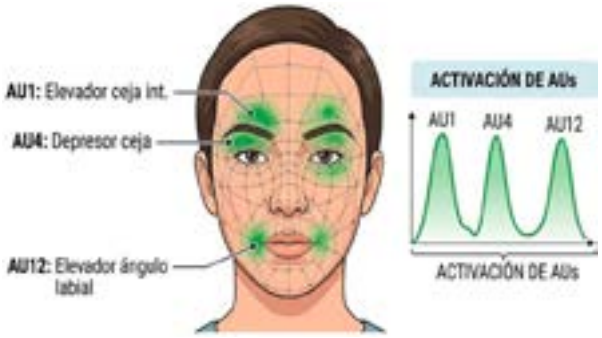
La Computación Afectiva, es un campo que relaciona Rosalind Picard [13], el cual estudia sistemas capaces de reconocer, interpretar y procesar emociones humanas. El reconocimiento de expresiones faciales (FER, Facial Expression Recognition) ha evolucionado desde modelos geométricos básicos hacia arquitecturas completas de aprendizaje automático, principalmente Redes Neuronales Convolucionales (CNN). Sin embargo, una brecha crítica persiste: la mayoría de los sistemas comerciales están optimizados para rostros adultos en entornos controlados, lo que reduce de manera importante su eficacia en contextos dinámicos y espontáneos como el aula escolar [12].

C. *El Sistema de Codificación de Acción Facial (FACS)*

El FACS (Facial Action Coding System) desarrollado por Ekman y Friesen [14] constituye el estándar de facto para descomponer el movimiento facial en Unidades de Acción (AU). Investigaciones psicofisiológicas recientes evidencian

que la ansiedad se manifiesta frecuentemente a través de micro-expresiones fragmentadas más que de expresiones plenas: la combinación de AU1 (elevación del entrecejo interno) y AU4 (descenso del entrecejo) indica tensión cognitiva y preocupación persistente, mientras que AU20 (estiramiento labial) representa una señal crítica de estrés agudo [14]. (Ver figura 1).

FIGURA 1 *DETALLE DE LA EXTRACCIÓN DE UNIDADES DE ACCIÓN (AU) SOBRE EL MAPA FACIAL DEL ESTUDIANTE*



D. Edge Computing en Aplicaciones de Salud

La convergencia de IA e IoT ha dado origen al paradigma AIoT (Artificial Intelligence of Things), donde el procesamiento ocurre en el borde de la red. Según Shi et al. [6], el Edge Computing resulta esencial para aplicaciones de salud mental por tres razones fundamentales:

1. Privacidad, al procesar datos biométricos localmente sin riesgo de intercepción en la nube.
2. Latencia, la detección de crisis requiere respuestas en milisegundos.
3. Ancho de banda, evitando la saturación de redes educativas con transmisión continua de video crudo.

Lo mencionado, permite identificar una desconexión entre la creciente demanda de apoyo emocional y la capacidad de respuesta de las instituciones. La carga administrativa y la alta cantidad de estudiantes por orientador limitan la capacidad de realizar un seguimiento longitudinal y preventivo, centrando la atención únicamente en casos de crisis manifiesta. Esta reactividad ignora la etapa formativa de los estados afectivos, donde una intervención temprana podría mitigar complicaciones a largo plazo [10].

En este contexto, la implementación de tecnologías de monitoreo no invasivas se presenta como una solución necesaria. La integración de sistemas capaces de detectar patrones emocionales por pequeñas que sean mediante Inteligencia Artificial permite que el aula deje de ser un espacio de observación subjetiva para convertirse en un ecosistema inteligente de soporte. Según la Organización Mundial de la Salud, la transformación de la salud mental escolar requiere herramientas que faciliten la vigilancia epidemiológica y la toma de decisiones basada en evidencia, protegiendo siempre la integridad y privacidad de los menores [3].

Por lo anterior, el proyecto BEMOTIA propende por cerrar esta brecha mediante una arquitectura de computación en el borde (Edge Computing), que permita una detección temprana de estados de riesgo emocional, además de eliminar las barreras éticas del almacenamiento de datos sensibles, permitiendo una gestión del bienestar escolar proactiva, ética y escalable [7].

E. Datasets (Conjuntos de datos) Infantiles un Recurso Escaso y Crítico

Un hallazgo crítico de la literatura es que las expresiones de los niños poseen una morfología distinta a la de los adultos debido al desarrollo musculoesquelético facial. Washington et al. [15] y Banerjee et al. [16] coinciden en que la escasez de datasets infantiles es la principal barrera para el desarrollo de modelos de reconocimiento emocional robustos en esta población. El trabajo de Barco-Jiménez et al. [2] es pionero al crear un dataset basado en narrativas emocionales que captura expresiones genuinas, no poses estáticas, en niños colombianos de 10 a 12 años, validado con métricas de fiabilidad interjueces (ICC = 0.88). Este enfoque permite trascender la simple observación anecdótica. La arquitectura del proyecto BEMOTIA propone el uso algoritmos de visión artificial para la extracción de Unidades de Acción (AU), lo que proporciona un flujo de datos objetivo que busca reflejar la dinámica afectiva del estudiante en tiempo real. Al procesar estas señales de forma local mediante nodos Edge, se busca que la información sensible no sea vulnerable a interceptaciones en la red, cumpliendo con los estándares de seguridad digital exigidos en entornos donde interactúan menores de edad [7].

Es importante mencionar, que el ecosistema propuesto no busca reemplazar el juicio del orientador, sino fortalecerlo. A través de la visualización de puntajes de valencia, los cuales han sido validados previamente por expertos en psicología de la UNAD y de las Instituciones que han participado en el proyecto BEMOTIA, el sistema alerta sobre desviaciones emocionales que podrían indicar fatiga cognitiva, estrés o episodios de ansiedad. Esto facilita una intervención pedagógica personalizada, donde el docente puede ajustar la carga o el método de enseñanza basándose en el estado receptivo del grupo [4].

En última instancia, el proyecto BEMOTIA busca desarrollar una herramienta de soporte vital para la toma de decisiones. Al integrar el procesamiento en el borde con

protocolos de actuación temprana, con lo cual se espera transformar el aula en un espacio emocionalmente inteligente, capaz de prevenir el escalamiento de riesgos en salud mental y de promover un clima escolar propicio para el aprendizaje integral [17].

III. Metodología

A. *Diseño de la Investigación*

El proyecto BEMOTIA Fase 2, sigue un diseño experimental mixto, estructurado en cuatro componentes iterativos:

1. Optimización del modelo de reconocimiento emocional sobre el dataset obtenido en la Fase 1 (Aula Inteligente).
2. Diseño e implementación de la arquitectura Edge-IoT en hardware de bajo consumo.
3. Validación técnica en laboratorio bajo condiciones simuladas de aula
4. Validación sociopedagógica mediante talleres con docentes y orientadores. Este diseño reconoce que el éxito de una herramienta tecnológica en contextos educativos depende tanto de su rigor algorítmico como de su aceptabilidad por parte de la comunidad educativa.

B. *Arquitectura Edge-IoT Propuesta*

La arquitectura BEMOTIA Fase 2 se articula en cuatro capas funcionales:

- Capa de Percepción: Sensores ópticos genéricos con resolución mínima de 1080p y 30 FPS, con sensibilidad en condiciones de baja luminosidad, orientados a cubrir el área operativa del aula sin distorsión.
- Capa Edge: Nodos de procesamiento local (Nvidia Jetson Nano o Raspberry Pi 4 con módulo de cómputo neural) con mínimo 4 GB de RAM y núcleos tensores dedicados. Estos dispositivos ejecutan inferencia GPU-acelerada localmente, extrayendo vectores de características faciales sin almacenar ni transmitir imágenes originales.
- Capa de Transmisión: Solo metadatos anonimizados (vectores de Unidades de Acción y puntuaciones de valencia y arousal) son transmitidos al servidor central mediante protocolos seguros cifrados.
- Capa de Visualización: Dashboard accesible para orientadores de las instituciones aliadas, que muestra tendencias emocionales grupales e individuales sin revelar la identidad visual del estudiante. (Ver Figura 2)

C. *Modelo de Visión Computacional y Cálculo de Valencia*

El flujo algorítmico utiliza la biblioteca DeepFace para la detección facial y alineación de puntos de referencia. Ante los movimientos naturales de los estudiantes en el aula, se aplica una ecuación de normalización de pose sobre los 68 puntos de referencia faciales. El sistema deconstruye cada fotograma en 12 Unidades de Acción primarias (AU01_r, AU02_r, AU04_r, AU05_r, AU06_r, AU07_r, AU12_r, AU14_r, AU15_r, AU17_r, AU20_r, AU25_r), seleccionadas por su relevancia en la articulación de emociones positivas y negativas [2].

La Valencia Emocional (V) se calcula mediante una combinación lineal ponderada basada en el consenso psicológico experto (1):

$$V = \Sigma\,(w_i \cdot AU_i) \quad para\ i = 1\ a\ n \tag{1}$$

Donde w_i representa la significancia de un movimiento muscular específico en relación al eje placer-displacer. Este cálculo en el proyecto BEMOTIA se ejecutará localmente en el nodo Edge en tiempo real, destruyendo la imagen original inmediatamente tras la extracción de AUs, con lo cual se busca garantizar la privacidad por diseño del menor.

FIGURA 2. *Arquitectura Edge-IoT Bemotia Live: Monitoreo de Bienestar Emocional en el Aula*



D. *Modelo Teórico: El Espacio Circumplex de Russell*

A diferencia de los sistemas que clasifican emociones en categorías cerradas (modelo de Ekman), BEMOTIA ha propuesto el uso del Modelo Circumplex de Russell [18], que sitúa las emociones en un espacio bidimensional continuo: el eje X representa Valencia (de displacer a placer) y el eje Y representa Arousal (de calma a excitación). Este marco teórico ha permitido identificar estados complejos: la combinación de baja valencia y alto arousal caracteriza patrones de ansiedad potencial, mientras que la baja valencia persistente con bajo arousal se asocia a indicadores de depresión o aplanamiento afectivo. El cuadrante superior-izquierdo (Baja Valencia / Alto Arousal) funciona como la Zona de Alerta primaria del sistema BEMOTIA.

E. *Componente Clínico-Psicológico Paralelo*

Reconociendo que ninguna herramienta tecnológica puede operar exitosamente sin preparación del entorno humano, el proyecto BEMOTIA Fase 2, busca incorporar de forma paralela un componente clínico-psicológico completo. El equipo de psicólogos de la ECSAH-UNAD diseña e implementa protocolos de identificación de casos de ansiedad y depresión alineados con el DSM-5-TR [19], y conduce talleres de sensibilización con tres grupos objetivo:

- Estudiantes: desarrollo de habilidades de autoconciencia emocional y gestión del estrés académico.
- Docentes: fortalecimiento de competencias de detección manual de señales afectivas de riesgo e intervención empática.
- Orientadores: entrenamiento en lectura de dashboards del proyecto BEMOTIA e interpretación de tendencias de clima emocional del aula para intervenciones basadas en evidencia.

Esta sinergia que se pretende lograr entre precisión algorítmica e intervención humana es el diferenciador estratégico del proyecto BEMOTIA respecto a otras soluciones tecnológicas, con lo cual se pretende lograr que las alertas del sistema se traduzcan en acciones concretas y éticamente fundamentadas.

IV. Resultados y Discusión

A. *Children's Emotions Dataset: Fundamento Científico*

El logro más significativo y científicamente consolidado del proyecto es el Children's Emotions Dataset [2], publicado en Data in Brief (Elsevier) y disponible públicamente en Mendeley Data (DOI: 10.17632/3fgwr2bwc9.1). Este repositorio es único en el campo de la computación afectiva: en este se encuentran expresiones emocionales espontáneas de 22 niños de 10 a 12 años a través de narrativas emocionales, superando el sesgo prevalente en datasets basados en adultos o poses estáticas actuadas.

La base de datos comprende 57 videos procesados en 50 series temporales sincronizadas de AUs y valencias.

Cada video fue evaluado por un promedio de 10 profesionales de un panel de 20 expertos. La fiabilidad interjueces, medida mediante el Coeficiente de Correlación Intraclase (ICC), alcanzó un valor de 0.88, validando el dataset como un estándar de referencia confiable para el entrenamiento de modelos de aprendizaje profundo. Adicionalmente, se implementó un análisis de error de consenso para filtrar muestras donde la percepción emocional no fue clara, logrando la calidad del conjunto final.

En conclusión, el proyecto BEMOTIA busca transformar los datos biométricos en información accionable. Al integrar estos puntajes de valencia con protocolos de sensibilización realizados por psicólogos in situ, se proporciona a los orientadores una herramienta de soporte vital. Esto propende para que la tecnología no sea un fin en sí mismo, sino un puente hacia una intervención humana temprana, permitiendo detectar la tríada cognitiva del riesgo emocional antes de que afecte el desempeño académico o la salud mental a largo plazo [12].

B. *Software de Valencias: Herramienta desarrollada para el proyecto*

Un resultado técnico relevante de la Fase 1 fue el desarrollo de un software de valencias ad hoc para la evaluación de emociones en video [3]. La interfaz, desarrollada con HTML5, CSS3, JavaScript y AJAX, permite a los evaluadores calificar las emociones percibidas mediante un slider interactivo en una escala continua de -1 (muy negativo) a +1 (muy positivo), con registro cada segundo para generar series de valencia continuas. El sistema almacena las calificaciones en base de datos para análisis posterior y calcula la valencia promedio ponderada ($\bar{V}n$) según la expertise de cada profesional evaluador. Esta herramienta en las pruebas realizadas ha evidenciado ser efectiva para la construcción de datasets de alta calidad en entornos psicológicos reales, en esta segunda fase se generará al menos un segundo dataset con estudiantes de dos instituciones educativas (IEM Francisco de la Villota y IEM San Juan Bosco).

C. *Implementación Edge: Estado de desarrollo y validación*

La componente de análisis en tiempo real mediante Edge Computing se encuentra actualmente en fase de desarrollo, validación técnica y simulación en laboratorio. Los protocolos de privacidad, están siendo definidos y sometidos a diferentes pruebas y debates: las imágenes son transformadas en vectores numéricos de Unidades de Acción de manera casi instantánea, con lo que se busca que el video crudo no sea almacenado ni transmitido. Los primeros benchmarks en el hardware utilizado evidencian tiempos de inferencia por debajo de los 150 ms por fotograma, una latencia compatible con los requerimientos de detección de micro-expresiones (< 500 ms de duración).

El desafío científico central de esta fase es la optimización de los modelos para operar establemente en hardware de bajo consumo sin degradación significativa de la precisión. Las pruebas preliminares con el dataset validado indican precisiones superiores al 85% en la clasificación de valencias negativas (ansiedad y displacer), con trabajo en curso se espera alcanzar el umbral objetivo igual o mayor al 89% reportado en el paper previo de la Fase 1 [3].

D. *Talleres con Docentes y Orientadores de las Instituciones Educativas Beneficiadas*

Como punto de arranque de este nuevo ciclo de desarrollo de tres años, el proyecto BEMOTIA ha priorizado el componente humano. Se están llevando a cabo talleres con docentes y orientadores de las instituciones piloto (IEM Francisco de la Villota e IEM San Juan Bosco), liderados por el equipo de psicología clínica del proyecto (ECSAH-UNAD). Estas sesiones fortalecen habilidades de detección manual y respuestas empáticas, con lo cual se pretende que sirvan como fundamento conceptual para la solución tecnológica, la cual una vez implementada, deberá responder coherentemente a las necesidades reales de la comunidad educativa.

Por lo anterior, la detección objetiva mediante tecnología busca complementar la labor docente, así como eliminar los sesgos de la observación manual. El ecosistema del proyecto BEMOTIA utiliza el análisis de series temporales de Unidades de Acción (AU) para capturar la micro-gestualidad de niños entre 10 y 12 años, un rango de edad crítico donde la expresión emocional comienza a ser más compleja y vinculada al autoconcepto académico. A diferencia de otros sistemas, este modelo no se limita a etiquetas estáticas, sino que busca interpretar la dinámica afectiva como un flujo continuo de información [3].

La validez científica de este proceso se apoya en el consenso de expertos. A través del software de valencias desarrollado para el proyecto, 20 psicólogos de la UNAD calificaron sistemáticamente estas señales en un espectro de -1 a 1. Esta metodología ha permitido que el sistema identifique con un alto grado de precisión la firma emocional de cada estudiante, facilitando la detección de valencias negativas persistentes que podrían indicar riesgos de salud mental, como la ansiedad o el estrés escolar, antes de que estos se manifiesten en crisis conductuales.

Por lo tanto, la integración de IA y IoT bajo una arquitectura de borde no es solo una mejora técnica, sino un avance ético y preventivo. Al proporcionar una métrica objetiva del bienestar emocional validada por profesionales, el proyecto BEMOTIA propende por entregar a las instituciones educativas una herramienta de soporte vital para la toma de decisiones, buscando lograr un entorno de aprendizaje seguro, inclusivo y proactivo para el desarrollo integral del menor [21].

E. Desafíos Identificados y Colaboración Binacional

Los principales desafíos que enfrenta esta fase del proyecto son:

1. Optimización de modelos de deep learning para hardware restringido sin pérdida de exactitud.
2. Minimización de falsos positivos que podrían generar sobre-intervención o estigmatización.
3. Gestión del cambio cultural en instituciones con culturas organizacionales diversas.
4. Mantenimiento del marco ético de protección de datos bajo regulaciones colombianas y costarricenses.

La colaboración binacional con el TEC enriquece el abordaje de estos retos al incorporar perspectivas técnicas y culturales complementarias, y apoya el desarrollo de una arquitectura lo suficientemente robusta para entornos escolares del mundo real [20].

Por otra parte, más allá de la infraestructura, el principal desafío reside en la naturaleza intrínsecamente dinámica y ruidosa del entorno escolar. A diferencia de los datasets de laboratorio, el reconocimiento de emociones en niños de 10 a 12 años en el aula enfrenta problemas de oclusión, cambios bruscos de iluminación y variabilidad en la intensidad de las expresiones. El ecosistema del proyecto BEMOTIA pretender abordar esta complejidad mediante el uso de series temporales de Unidades de Acción (AU), permitiendo que el sistema analice no solo un fotograma estático, sino la evolución del gesto facial para discriminar entre emociones genuinas y reacciones momentáneas [3].

Otro desafío crítico es la gestión ética y técnica de los datos biométricos. La dependencia de la computación en la nube (Cloud Computing) suele generar latencias que impiden una respuesta en tiempo real, además de elevar los riesgos de seguridad sobre imágenes sensibles de menores. BEMOTIA se ha propuesto resolver esta situación mediante el despliegue en nodos Edge (Nvidia Jetson Nano), donde el procesamiento local logre que solo las matrices de datos esenciales y los puntajes de valencia, previamente validados por los 20 psicólogos de la UNAD, sean transmitidos, protegiendo así la privacidad por diseño [7].

Finalmente, existe el desafío de la interpretación clínica. Los sistemas que ofrecen etiquetas emocionales cerradas suelen ser de poca utilidad para un orientador escolar. Por ello, el modelo BEMOTIA se centra en la entrega de valores de valencia en un espectro de -1 a 1, permitiendo que el profesional interprete la carga afectiva dentro del contexto pedagógico. Esta sinergia entre ingeniería y psicología clínica busca que la tecnología no sea una barrera, sino una herramienta de soporte vital para la toma de decisiones proactiva en salud mental [2].

V. Conclusiones

La presente investigación aplicada demuestra que la convergencia entre la ingeniería (IA/IoT) y la psicología clínica permite transformar el aula en un entorno preventivo y emocionalmente inteligente. A partir de los resultados obtenidos en la Fase 2 del proyecto BEMOTIA, se presentan las siguientes conclusiones:

En primer lugar, la transición hacia una arquitectura de computación en el borde (Edge Computing) ha evidenciaro ser la solución técnica y ética más viable para el monitoreo de menores. Al procesar las imágenes localmente en nodos Nvidia Jetson Nano u otros dispositivos similares, se logra una reducción crítica en la latencia de respuesta con lo que se busca alcanzar la privacidad por diseño, evitando el almacenamiento o transmisión de contenido multimedia sensible hacia la nube. Este enfoque optimiza el uso del ancho de banda y cumple con los estándares internacionales de protección de datos biométricos en entornos escolares [12].

En segundo lugar, el rigor científico del sistema se sustenta en la robustez del Children's Emotions Dataset. La implementación de series temporales de Unidades de Acción (AU) extraídas mediante visión artificial, en lugar de etiquetas emocionales estáticas, permite una comprensión granular de la dinámica afectiva. La correlación alcanzada entre estas métricas automatizadas y el juicio clínico de 20 expertos de la UNAD, quienes validaron las secuencias en un espectro de valencia de -1 a 1, permite que el sistema posea una alta fidelidad diagnóstica para identificar estados de riesgo como la ansiedad y el estrés académico [3].

Finalmente, BEMOTIA trasciende la automatización técnica para consolidarse como una herramienta de soporte vital en la toma de decisiones. La integración de protocolos de actuación temprana y la labor de sensibilización con la comunidad educativa propende para que la tecnología actúe como un puente hacia la intervención humana proactiva. En conclusión, este ecosistema no solo permite la detección temprana de complicaciones de salud mental antes de su escalamiento, sino que promueve un clima escolar seguro que potencia el bienestar integral y el rendimiento académico de los estudiantes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y al Tecnológico de Costa Rica por confiar en este tipo de procesos de investigación aplicada y financiar su desarrollo. Asimismo un especial agradecimiento a las comunidades de las Instituciones Educativas Francisco de la Villota y San Juan Bosco de la ciudad de Pasto, gracias a ellas contamos con los datos e imágenes de niños y niñas fundamentales para el logro de los objetivos propuestos en el proyecto. También, se reconoce el apoyo del Grupo de Investigacion DAVINCI-UNAD.

REFERENCIAS

[1] World Health Organization, "Adolescent mental health," Geneva, Switzerland, 2024. [Online]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/adolescent-mental-health

[2] J. Barco-Jiménez and A. J. Cervelión Bastidas, "Assessment of perceived emotions in children through emotional narrative and ICT tools," in Proc. Expotech 2025, Pasto, Colombia, 2025.

[3] World Health Organization (WHO). (2022). World mental health report: Transforming mental health for all. URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240049338

[4] J. Barco-Jiménez, S. Campaña, Á. Cervelión, H. Cabrera, C. Tobar, R. Jaramillo, A. Díaz, and A. Méndez Porras, "Children's Emotions Dataset: Facial Images as Action Units and Valence Scores," Data in Brief, Elsevier, 2025. doi: 10.17632/3fgwr2bwc9.1

[5] A. Dhall, R. Goecke, S. Ghosh, J. Joshi, J. Hoey, y T. Gedeon, "From individual to group-level emotion recognition: EmotiW 5.0," en *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI '17)*, 2017, pp. 524-528. doi: 10.1145/3136755.3143004.

[6] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, "Edge computing: Vision and challenges," IEEE Internet of Things Journal, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, Oct. 2016. doi: 10.1109/JIOT.2016.2579198

[7] Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. **URL:** https://ieeexplore.ieee.org/document/7488250

[8] Sariyanidi, H., Gunes, H., & Cavallaro, A. (2015). Automatic Analysis of Facial Affect: A Survey of Registration, Representation, and Recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. **URL:** https://ieeexplore.ieee.org/document/6908013

[9] R. García, "Trastornos ansiosos y depresivos en adolescentes," Revista Médica Clínica Las Condes, vol. 22, no. 1, pp. 77–84, 2010.

[10] R. A. Calvo and D. Peters, *Positive Computing: Technology for Wellbeing and Human Potential*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2014. [En línea]. Disponible en: https://mitpress.mit.edu/9780262028165/positive-computing/

[11] World Health Organization (WHO), "World mental health report: Transforming mental health for all," Jun. 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.who.int/publications/i/item/9789240049338

[12] F. Pompili *et al.*, "Explainability in emotion recognition: A survey," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 151984–152009, 2021. [En línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/9611130

[13] R. W. Picard, Affective Computing. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1997.

[14] P. Ekman and W. V. Friesen, Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement. Palo Alto, CA, USA: Consulting Psychologists Press, 1978.

[15] P. Washington et al., "Training an Emotion Detection Classifier using Frames from a Mobile Therapeutic Game for Children with Developmental Disorders," Cornell University, 2020.

[16] Escuela de Ciencias Sociales, Artes y Humanidades (ECSAH) – UNAD, "Protocolo de identificación de posibles casos de ansiedad y depresión: Proyecto BEMOTIA LIVE," Documento interno de trabajo, UNAD, 2026.

[17] S. Campaña-Bastidas *et al.*, "BEMOTIA LIVE: An Artificial Intelligence of Things (AIoT) Architecture for Proactive Affective Computing in Educational Environments," en *Expotech 2026*, Pereira, Colombia, 2026.

[18] J. A. Russell, "A circumplex model of affect," Journal of Personality and Social Psychology, vol. 39, no. 6, pp. 1161–1178, 1980. doi: 10.1037/h0077714

[19] American Psychiatric Association, Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5-TR), 5th ed. Washington, DC, USA: APA Publishing, 2022.

[20] S. I. Serengil and A. Özpınar, "A Benchmark of Facial Recognition Pipelines and Co-Usability Performances of Modules," Bilişim Teknolojileri Dergisi, vol. 17, no. 2, p. 95, Apr. 2024. doi: 10.17671/gazibtd.1399077

[21] L.-M. Wang, W. Chen, and H. Li, "Use of 3D faces facilitates facial expression recognition in children," *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, 2017. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1038/srep45464

Ecosistemas de gestión del conocimiento en contextos de volatilidad laboral: Modelo híbrido para la sostenibilidad técnica en el sector QA

1st *Torcoroma Velásquez Pérez*
Maestría en Gobierno de TI
Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Ocaña, Colombia
https://orcid.org/0000-0002-2968-2338

2st Eiler Fernando Páez Téllez
Maestría en Gobierno de TI
Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Ocaña, Colombia
https://orcid.org/0009-0004-3511-7425

3st Beatriz Elena Rodríguez Chinchilla
Maestría en Gobierno de TI
Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Ocaña, Colombia
https://orcid.org/0009-0003-3579-2503

***Resumen*—Inmerso en el complejo entorno de transformación digital acelerada, el sector de Quality Assurance (QA) y pruebas de software enfrenta un reto estructural crítico derivado de la alta tasa de rotación de personal, fenómeno que erosiona de forma sistemática el capital intelectual de las organizaciones.**

La presente investigación, desarrollada desde la óptica de la Gobernanza de Tecnologías de la Información (GTI), constituye una aproximación profunda hacia el análisis de la "fuga silenciosa de conocimiento". Este fenómeno no solo incrementa los costos operativos asociados al reclutamiento, sino que fragmenta la continuidad operativa, la calidad del software y el dominio de reglas de negocio complejas.

Se reconoce que el uso de estrategias tradicionales, diseñadas casi de manera exclusiva para la documentación estática (conocimiento explícito), resultan insuficientes en la aprehensión del conocimiento tácito, el cual se fundamenta en la intuición técnica y el know-how de los perfiles senior.

El objetivo de este estudio es proponer un modelo híbrido de gestión del conocimiento sustentado en los marcos de referencia internacionales COBIT 2019 e ITIL 4. Este modelo converge la institucionalización de comunidades de práctica (CoP) y el mentoring estructurado, orientados a mitigar la pérdida de activos intelectuales, a través de un diseño metodológico mixto (revisión sistemática PRISMA, focus groups y una prueba piloto cuantitativa).

Se evidencia que la adopción de este ecosistema sociotécnico optimiza la trazabilidad de indicadores de TI, reduce drásticamente el tiempo de adaptación (Time to Productivity - TTP) de los nuevos colaboradores y transforma las experiencias individuales en un patrimonio colectivo gobernado, dotando a la organización de resiliencia frente a entornos caóticos.

***Palabras clave*—Gestión del conocimiento, Quality Assurance (QA), COBIT 2019, rotación de personal, capital Intelectual.**

I. Introducción

En la actualidad, las organizaciones operan en un ecosistema global que ha transitado de la volatilidad e incertidumbre (entornos VUCA) hacia escenarios de alta disrupción y caos sistémico, conceptualizados en la literatura contemporánea como entornos BANI (frágiles, ansiosos, no lineales e incomprensibles) [1]. En este contexto de transformación digital incesante, el conocimiento se ha erigido irrevocablemente como el activo intangible de mayor valor estratégico y la principal fuente de ventaja competitiva sostenida [2].

Para las empresas de base tecnológica, y específicamente para las áreas de *Quality Assurance* (QA), la correcta gestión de este activo es vital. El aseguramiento de la calidad del software es un proceso intensivo en conocimiento que demanda altos niveles de intuición, experiencia empírica y comprensión de complejas arquitecturas de negocio [3]. No obstante, este sector experimenta un fenómeno alarmante: una alta volatilidad laboral que desencadena una fuga silenciosa de capital intelectual, donde la salida de perfiles *senior* y técnicos especializados provoca una "amnesia corporativa" que desestabiliza la cadena de valor tecnológica.

A pesar de la vasta producción científica en torno a la retención del talento humano y los sistemas de información, existe una brecha crítica en la intersección empírica entre la Gestión del Conocimiento (GC), la Gobernanza de TI y las operaciones de QA [4]. Históricamente, las organizaciones han intentado mitigar la pérdida de información mediante repositorios estáticos y documentación exhaustiva (sistemas centrados en el producto). Sin embargo, la evidencia demuestra que el conocimiento más valioso en ingeniería de software es el "conocimiento tácito", aquel que reside en la mente del individuo y es difícilmente articulable en manuales tradicionales [5]. Además, las investigaciones sobre marcos de gobierno corporativo de TI (como COBIT e ITIL) a menudo se abordan desde una perspectiva macro-estratégica, prestando escasa atención a su operacionalización táctica orientada a retener el conocimiento en equipos de pruebas de software, marginando la institucionalización de ecosistemas dinámicos de aprendizaje [6].

Para cerrar esta brecha, el presente artículo de investigación propone un modelo híbrido de Gestión del Conocimiento estructurado sobre los cimientos de la Gobernanza de TI, específicamente apalancado en las directrices de COBIT 2019 y las prácticas de gestión de servicios de ITIL 4 [7]. El modelo propuesto plantea la convergencia de dos estrategias sociotécnicas: el *mentoring* estructurado y las Comunidades de

Práctica (CoPs), con el fin de externalizar el conocimiento tácito y democratizar el aprendizaje en los equipos de QA.

En las siguientes secciones, se desarrollará una revisión exhaustiva de la literatura articulando los dominios de la gobernanza de TI con la teoría de creación de conocimiento. Posteriormente, se detallará el marco metodológico mixto utilizado para validar la propuesta en un entorno real, seguido de una discusión crítica de los hallazgos empíricos (como el impacto en el *Time to Productivity*). Finalmente, se presentarán las limitaciones del estudio y las recomendaciones para la alta dirección enfocadas en el aseguramiento y sostenibilidad técnica.

II. Revisión de la Literatura

A. *Gestión del Conocimiento: La dicotomía entre lo Tácito y lo Explícito*

La Gestión del Conocimiento (GC) trasciende la simple administración de sistemas de información; es el proceso sistemático, táctico y operativo de creación, adquisición, transformación y uso del conocimiento para maximizar el valor organizacional [8].

El fundamento teórico de este artículo se apoya en la teoría de creación de conocimiento organizacional de Nonaka y Takeuchi (1995), quienes postulan que el conocimiento se divide en dos dimensiones: el explícito, que puede codificarse, documentarse y transferirse fácilmente a través de bases de datos; y el tácito, que se deriva de la experiencia subjetiva, los modelos mentales y las habilidades cognitivas del individuo [5].

En el área de pruebas de software (QA), el diseño de escenarios de prueba, la detección de defectos complejos y la automatización dependen de manera profunda del conocimiento tácito [4]. La incapacidad de externalizar este conocimiento (convertir lo tácito en explícito mediante procesos de socialización) es lo que hace a las organizaciones extremadamente vulnerables frente a la rotación de personal.

B. *Gobernanza de TI y Aseguramiento de la Calidad (COBIT e ITIL)*

Para que la GC no sea una iniciativa aislada y dependiente de la buena voluntad, debe estar institucionalizada a través de la Gobernanza de TI. La gobernanza tecnológica garantiza la alineación estratégica de las TI con los objetivos del negocio, la creación de valor y la optimización de recursos y riesgos [2].

- COBIT 2019: Este marco de ISACA establece directrices precisas que vertebran nuestro modelo. Particularmente, el dominio BAI08 (Gestionar el conocimiento) exige mantener la disponibilidad de información relevante, validada y confiable para apoyar las actividades y facilitar la toma de decisiones [9]. Sus prácticas clave instan a cultivar una cultura de intercambio de conocimientos (BAI08.01) y a organizar y contextualizar la información transformándola en conocimiento aplicado (BAI08.02). Adicionalmente, COBIT aborda la mitigación de la fuga de talentos a través de APO07 (Gestionar los recursos humanos), prescribiendo la necesidad de minimizar la dependencia de individuos únicos para tareas críticas mediante el traspaso estructurado de conocimiento y planes de sucesión
- ITIL 4: Como estándar de gestión de servicios, ITIL concibe la GC como un componente crítico del Sistema de Valor del Servicio (SVS). Su enfoque holístico dictamina que los errores conocidos, las arquitecturas de *testing* y las soluciones deben documentarse activamente para la mejora continua y el soporte operativo, previniendo incidentes sistémicos cuando los ingenieros clave abandonan un proyecto [10].

C. *Resiliencia en Entornos BANI y el Sector QA*

La disrupción descrita por los entornos BANI exige a las empresas tecnológicas dejar atrás la ilusión de estabilidad. La "fragilidad" del sistema corporativo se combate con resiliencia y retención del talento; la "ansiedad" con comunicación y *mindfulness* corporativo; la "no linealidad" con adaptabilidad ágil; y lo "incomprensible" con datos estructurados, inteligencia y transparencia [1]. En el ciclo de vida del desarrollo de software moderno (Agile, DevSecOps), las pruebas ya no son una etapa final aislada, sino un aseguramiento transversal continuo [11].

Reemplazar un analista de QA senior sin una GC adecuada implica reconstruir el entendimiento de las reglas de negocio desde cero, afectando directamente la velocidad de comercialización *(Time to Market)* y la calidad técnica del producto.

III. Motodología

Proceso y técnicas de recolección y análisis de datos: Esta investigación adoptó un diseño metodológico de enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo) de alcance descriptivo, correlacional, estructurado en tres fases fundamentales, utilizando los parámetros de rigor de la declaración PRISMA para el estado del arte y la investigación-acción para el trabajo de campo.

Fase 1: Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) y Diagnóstico Cualitativo:

Se aplicó la metodología PRISMA en bases de datos de alto impacto utilizando ecuaciones de búsqueda compuestas por operadores booleanos enfocados en "Gobernanza de TI", "Gestión del Conocimiento", "Rotación de Personal" y "Quality Assurance" [12], [13].

A nivel de campo, se realizaron entrevistas y encuestas estructuradas *(escala Likert)* a una muestra representativa conformada por líderes de QA e ingenieros de calidad en empresas del sector QA y de outsourcing tecnológico en Cali. El objetivo fue evaluar las barreras culturales y tecnológicas para la transferencia del conocimiento.



Fig. 1. Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) y Diagnóstico Cualitativo.

Fase 2: Diseño del Modelo Híbrido basado en COBIT/ITIL

A partir de la triangulación de datos obtenida en la fase diagnóstica, se diseñó el marco de trabajo integrando los dominios BAI08 (Gestionar el conocimiento) y APO07 (Gestionar los recursos humanos) de COBIT 2019, en convergencia con el Sistema de Valor del Servicio (SVS) de ITIL 4 [14]. Esta integración asume la perspectiva de ITIL en la cual la Gestión del Conocimiento no es solo el almacenamiento de datos, sino la práctica orientada a garantizar que todas las partes interesadas obtengan la información correcta, en el formato adecuado, en el nivel de acceso correcto y en el momento preciso para la toma de decisiones ágiles. Bajo esta sinergia metodológica, el modelo se estructuró sobre dos pilares de intervención operativa:

A. Programas de Mentoring Estructurado (Transferencia directa de conocimiento tácito)

Orientado a canalizar el flujo de saberes desde los perfiles senior hacia los perfiles junior. Este pilar se fundamenta en la dimensión de Organizaciones y Personas de ITIL, la cual enfatiza que la eficacia de una organización no solo depende de sus sistemas, sino de promover una cultura de confianza, actualizar constantemente las habilidades y asegurar un nivel adecuado de capacidad, comunicación y colaboración entre las especializaciones técnicas [14]. El *mentoring* formaliza esta interacción, reduciendo la fricción operativa y mitigando la vulnerabilidad ante la rotación de personal.



Fig. 2. Programas de Mentoring Estructurado (Transferencia directa de conocimiento tácito)

B. Comunidades de Práctica (CoPs) (Inteligencia Colectiva)

Concebidas como plataformas orgánicas de validación y resolución colaborativa de problemas arquitectónicos y de automatización. Desde la óptica de ITIL 4, estas CoPs operan como motores activos para las prácticas de Gestión de Problemas y Mejora Continua [14]. Las comunidades permiten que los equipos analicen las causas raíz de los incidentes, identifiquen tendencias, documenten "errores conocidos" (known errors) y validen soluciones alternativas (workarounds). De esta manera, el aprendizaje se alinea con las necesidades comerciales cambiantes, transformando las experiencias y fallos individuales en un acervo de conocimiento documentado y reutilizable para toda la organización.



Fig. 3. Comunidades de Práctica (CoPs) (Inteligencia Colectiva).

IV. Discusión y Resultados

Hallazgos de la Fase Diagnóstica**:** Los resultados revelaron un panorama crítico común en la industria del software: el 80% del personal técnico percibe deficiencias agudas en la estructuración de la documentación y los repositorios de información, calificándolos de inoperantes o poco accesibles tras la salida de un colaborador.

Los desarrolladores y *testers* sufren sobrecarga cognitiva al intentar decodificar arquitecturas legadas (entorno incomprensible BANI), y la ausencia de programas formales de *mentoría* o de foros técnicos sistematizados (CoPs) perpetúa el aislamiento del conocimiento.

Se evidenció que las empresas invierten sustancialmente en tecnologías de automatización, pero fracasan en la Gobernanza del elemento humano, ignorando que "el error humano sigue siendo la principal causa de incidentes" ante la falta de saberes estructurados.



Fig. 4. Análisis de resultados de la gestión de documentación y conocimiento.

Impacto del Modelo y Explicación del Fenómeno: La implementación del modelo híbrido de GC fundamentado en Gobernanza de TI demostraría transformar drásticamente las métricas de desempeño organizacional:

A. Reducción de la Fricción Operativa (TTP):

El emparejamiento formal de nuevos ingresos con ingenieros senior (Mentoring), auditado y guiado por las prácticas de Recursos Humanos de COBIT (APO07.02) (Identificar al personal clave y asegurar planes de sucesión), logrará reducir el tiempo que le toma a un nuevo analista de QA ser productivo [9]. El conocimiento sobre la intuición para encontrar fallos de negocio (tácito) se externaliza de manera colaborativa, evitando que los equipos tengan que "reinventar la rueda".

B. *Inteligencia Colectiva y Desempeño Organizacional*

La formación de Comunidades de Práctica romperá los silos departamentales característicos de las estructuras tradicionales. Al alinear estas comunidades con el objetivo (BAI08.03) de COBIT (Utilizar y compartir conocimiento) y las directrices de ITIL, los fallos encontrados en un proyecto de software automáticamente se convertirán en casos de prueba automatizados reutilizables para toda la organización.

C. *Cultura de Gobernabilidad*

Como plantea la literatura, la GC no opera en el vacío; requiere un ecosistema donde la alta dirección actúe como promotor. Al institucionalizar estas prácticas dentro del esquema formal de gobierno corporativo (evaluado con KPIs de retención, cobertura de pruebas y reducción de defectos en producción), las organizaciones trasladan la responsabilidad de la calidad desde los "héroes individuales" hacia la resiliencia estructural de la empresa [9]. La conjunción de estas estrategias confirmaría que la ventaja competitiva en el sector tecnológico no radica únicamente en poseer el mejor software de automatización, sino en la "habilidad organizacional" para gobernar, transformar y asegurar que el *know-how* sobreviva a la constante rotación de su capital humano [12].

D. *Modelo hibrido para la gestión Integral del Conocimiento y la Mejora Continua*

Integración de las dos partes—Mentorías Estructuradas y Comunidades de Prácticas (CoPs)



Fig. 5. Modelo híbrido, Sinergia de Mentorias Estructuradas y Comunidades de Prácticas.

V. Limitaciones y Recomendaciones

Limitaciones—El estudio no está exento de restricciones. En primer lugar, la aplicación rigurosa de marcos internacionales de Gobierno de TI como COBIT 2019 e ITIL 4 supone un nivel de madurez organizacional del que carecen muchas pequeñas y medianas empresas (Pymes) dedicadas al desarrollo de software. A menudo, la urgencia de los cronogramas ágiles relega la documentación formal y las actividades de gobernanza a un segundo plano.

En segundo lugar, el componente de resistencia cultural es significativo; el arraigo a paradigmas donde "la información es poder" dificulta que los perfiles altamente técnicos exterioricen de forma altruista sus competencias tácitas frente a los nuevos modelos de socialización.

Recomendaciones para el sector y futuras investigaciones:

A. *A la Alta Dirección y Gerencias de TI*

Se recomienda imperativamente evolucionar de la gestión operativa hacia una auténtica Gobernanza del Capital Intelectual. Es mandatorio incluir en la planeación estratégica la asignación de recursos y tiempos formales (dentro de los sprints de trabajo) para la ejecución de sesiones de mentoría y la participación en Comunidades de Práctica. La GC debe estar vinculada a los indicadores de evaluación de desempeño (KPIs) del personal [12].

B. *Integración de Tecnologías Emergentes*

Para sostener el modelo, se insta a la adopción de herramientas impulsadas por Inteligencia Artificial (IA) y analítica de datos (ej. procesamiento de lenguaje natural y ontologías) que automaticen la captura semántica del conocimiento disperso en los repositorios de testing y repositorios de código, transformando bases de datos pasivas en sistemas de recomendación activa para los testers [15].

C. *Futuras líneas de investigación*

Resulta vital desarrollar investigaciones longitudinales que midan el retorno de inversión (ROI) financiero directo derivado de la implementación de la GC gobernada por TI en equipos de Aseguramiento de Calidad. De igual forma, se plantea la necesidad de crear modelos de madurez simplificados, derivados de COBIT, que puedan ser adoptados por Startups tecnológicas y Pymes con menores recursos operativos [16].

Referencias

[1] M. I. Urbano-Carazo, «Factores Determinantes de la Gestión de Conocimiento y su incidencia en el Desempeño Organizacional en entornos BANI: Una revisión teórica,» *Revista científica ANFIBIOS,* p. 15, 2022.

[2] W. E. Ramírez Torres, «Gestión del capital humano por competencias laborales en el contexto empresarial: una revisión de literatura,» *DIGITALES ARCHIV,* p. 32, 2022.

[3] D. C. G. Contreras, «Mejoramiento de la metodología de pruebas ágiles en GreenSQA, apoyado en la gestión del conocimiento,» Repositorio Institucional, Cali, 2019.

[4] M. P. López, «Modelo de Gestión de conocimiento orientado a proyectos de pruebas de software en el área de QA en empresas financieras,» Repositorio Institucional, Ocaña, 2025.

[5] M. I. M. Rocha, «Gestión de conocimiento y su importancia en las organizaciones,» *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad,* p. 11, 2013.

[6] L. M. Iparraguirre, «Marcos más usados para implementar buenas prácticas de gobierno de tecnologías de la información en las pymes: una revisión de la literatura,» *Campus,* vol. 28, nº 35, p. 12, 2023.

[7] L. U. Jaramillo, «Gestión de conocimiento para la operación de TI en empresas de estado colombiano con modelo de operación tercerizada,» Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, 2025.

[8] L. M. V. Arreguín, «La gestión del conocimiento, pasado, presente y futuro. Una revisión de la literatura,» SciELO Analytics, Potosí, 2021.

[9] ISACA, Marco de Referencia COBIT® 2019: Objetivos de gobierno y gestión, ISACA, 2019.

[10] J. K. C. Pinzo, «Formulación de acciones de mejora para la prestación de los servicios por parte del proveedor Choucair Testing al área de QA del banco caja social basado en la aplicación de la metodología scrum e ITIL v4 en la ciudad de Bogotá,» Repositorio Institucional UCC, Bogotá, 2021.

[11] G. Kathiresan, «Leveraging Ai-driven defect prediction models for enhancing software quality assurance,» *ResearchGate,* vol. 14, nº 1, pp. 136-148, 2023.

[12] W. E. R. Torres, «Análisis de la gestión del talento humano en el contexto empresarial actual: una revisión bibliográfica,» *INNOVA Research Journal,* vol. 8, nº 2, pp. 83-106, 2023.

[13] X. Zhu, «Digital transformation: A systematic literature review,» *ScienceDirect,* vol. 162, 2021.

[14] A. Limited, ITIL Foundation ITIL 4, Reino Unido: SO (The Stationery Office), 2019.

[15] I. Pysmennyi, «AI-Driven Tools in Modern Software Quality Assurance: An Assessment of Benefits, Challenges, and Future Directions,» *Arxiv,* vol. 1, p. 11, 2025.

[16] D. E. C. Márquez, «Modelo De Integración De Estándares De Buenas Prácticas De Tecnologías De La Información En El Gobierno Corporativo De Las Empresas Colombianas En El Sector Asegurador,» Repositorio Institucional UFPSO, Ocaña, 2019.

NUTRIMANÍA: Implementation of a Gamified Serious Video Game for Nutritional Education among Adolescents and Young Adults

Vanessa A. Osorio-Sarmiento
Fac. de Inteligencia Artificial e Ingenierías
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Alejandro Benitez-Molina
Fac. de Inteligencia Artificial e Ingenierías
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Juan J. Gamboa-Clavijo
Fac. de Inteligencia Artificial e Ingenierías
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Diana M. Henao-Martínez
Telesalud, Universidad de Caldas
Manizales, Colombia

Carolina Márquez-Narváez
Fac. Ing., UAM & UI Digital de Antioquia
Manizales & Medellín, Colombia

Santiago Murillo-Rendón
Fac. de Inteligencia Artificial e Ingenierías,
Universidad de Caldas &
Fac. de Ingeniería, UAM
santiago.murillo@ucaldas.edu.co

Abstract— *This article presents the design and full implementation of NUTRIMANÍA, a serious virtual reality (VR) video game developed to support nutritional education among adolescents and young adults from rural municipalities in Caldas, Colombia. The system operationalizes the 2025 Colombian Dietary Guidelines—based on biodiversity and real food—through two culturally grounded interactive scenarios: a local market (plaza de mercado) and a home kitchen, implemented in Unity with OpenXR for standalone Android VR headsets. The gamification architecture integrates the Octalysis framework and the MDA model (Mechanics–Dynamics–Aesthetics) to translate the guidelines' recommendations into engaging mechanics focused on healthy food selection, plate balance, and spending awareness, without relying on punitive motivational strategies. A modular client–server architecture ensures content management, nutritional rule assessment through the NOVA classification system—which categorizes foods according to their degree of industrial processing into four groups, ranging from fresh foods to ultra-processed products—and the persistence of user progress and telemetry records for future evaluation. The article describes the complete interaction flow, scenario design, gamification specification, data model, and representative spaces for interface screenshots. As a next step, an evaluation protocol with the target population is proposed, structured around three dimensions: usability, to be measured using the System Usability Scale (SUS); learning outcomes, to be estimated through a pre–post instrument aligned with the contents of the Colombian Dietary Guidelines; and player engagement, to be operationalized through telemetry indicators extracted from system logs.*

Keywords— *serious games; virtual reality; nutritional education; gamification; dietary guidelines; Colombia; Unity; OpenXR; Octalysis; MDA framework.*

I. INTRODUCTION

Malnutrition in its two forms—undernutrition and overnutrition—remains a persistent public health challenge, with direct consequences for cognitive development, metabolic health, and quality of life [1], [2]. In Colombia, the 2015 National Survey of the Nutritional Situation (*Encuesta Nacional de la Situación Nutricional*, ENSIN) reported chronic undernutrition in 10.8% of children under five years of age [5], [6], while 37.7% of adults aged 18 to 64 were overweight and 18.7% were obese [7]. In the department of Caldas, adolescents show a double-burden pattern [8], reflecting the complex nutritional reality of Colombia's Coffee Region.

A central factor underlying diet-related problems is limited nutritional literacy, understood as the ability to access, understand, and apply food-related information to make healthier decisions [9], [10]. Adolescence and early adulthood constitute a critical window for consolidating dietary habits that tend to persist into adulthood [27]. However, effective interventions require sustained engagement rather than merely one-time informational exposure. Interactive digital tools—especially those based on national recommendations and situated in culturally familiar contexts, offer a compelling alternative.

Research on the educational potential of video games and gamified environments [14], [15] converges with recent evidence supporting VR for nutritional research and education [16], [17]: immersive and ecologically valid environments can facilitate knowledge retention and support positive food-related decision-making. These precedents motivated the development of NUTRIMANÍA, a Unity-based serious VR video game designed to translate the 2025 Colombian Dietary Guidelines based on biodiversity and real food [13] into an interactive experience for adolescents and young adults from rural municipalities in Caldas.

Unlike previous nutrition-oriented VR tools that simulate generic supermarket environments, NUTRIMANÍA grounds its scenarios in two culturally and ecologically meaningful contexts for the target population: a local market (*plaza de mercado*) and a home kitchen, contextualized for the specific municipalities of Samaná, Manizales, and Riosucio. The gamification architecture, built upon Octalysis [18] and the MDA framework [24], prioritizes intrinsic motivation through purpose, goal clarity, and explanatory feedback, deliberately avoiding punitive mechanics that could reduce participation or generate stress.

The main contributions of this article are: (i) the complete Unity/OpenXR implementation of NUTRIMANÍA, including its client–server architecture, data model, and interaction flow; (ii) a detailed gamification specification that maps the recommendations of the Colombian Dietary Guidelines onto concrete mechanics, dynamics, and feedback rules; (iii) representative spaces for screenshots of the implemented interface; and (iv) a structured evaluation protocol to be conducted with the target population in subsequent studies.

II. RELATED WORKS

A. Video Games and Cognitive Learning

Systematic evidence confirms that entertainment video games can produce academic learning benefits under conditions of clear goals, progressive challenge, and immediate feedback [14]. The cognitive gains associated with regular gameplay include improvements in executive function, attentional regulation, and working memory [15]—abilities that are directly relevant to the food-related decision-making contexts addressed by NUTRIMANÍA.

B. Gamification in Nutritional and Health Education

Sustaining motivation long enough for behavioral change to become consolidated is a central challenge in health education [18]. Gamification applied to nutritional contexts—by combining goal structures, progress indicators, immediate feedback, and reward mechanisms—has shown positive effects on habit adherence and self-regulation among adolescents and university students [26]. Critically, the effectiveness of gamification depends on the alignment between motivational mechanics and the intrinsic drives of the target population; punitive or competition-centered designs tend to perform less effectively when the goal is health education [18].

Situated learning in community-relevant environments increases the likelihood that knowledge will be transferred into real-life practice. VR experiences set in farmers' markets [19] and augmented reality applications linked to local markets [20] have shown that culturally grounded digital spaces can strengthen meaningful engagement and practical food-selection skills.

C. Virtual Reality for Nutritional Intervention

A recent scoping review of VR supermarket studies confirms the feasibility of immersive environments for food-choice research and interactive nutritional education [16]. Reviews of interventions targeting childhood obesity further support VR as a medium for behavioral change, given its ecological realism and interactivity [17]. VR cooking protocols have validated meal-preparation tasks as ecologically meaningful measures of everyday cognition [21], while culturally contextualized kitchen scenarios have reported benefits in motivation and nutritional knowledge acquisition [22]. These precedents directly inform the selection and design of the market and kitchen as the two main scenarios in **NUTRIMANÍA**.

III. SYSTEM IMPLEMENTATION

A. Technical Architecture

NUTRIMANÍA was implemented in Unity 2022.3 LTS with the OpenXR plugin for cross-platform VR compatibility, targeting standalone Android VR headsets, specifically Pico 4. The system follows a modular client–server architecture. On the client side, four subsystems manage the core experience: (i) the Shopping System, which manages the cart and the virtual currency ("nutripesos"); (ii) the Cooking Simulator, which records ingredient selections, cooking actions, and sequential meal states; (iii) the Basic Local Assessment module, which precomputes session indicators and feedback candidates; and (iv) the Synchronization Module, responsible for data exchange with the cloud-based backend. Client-side data persisted in a local SQLite database to ensure continuity during sessions with intermittent connectivity.

The cloud-based backend exposes four REST API services: Authentication for user login and security, Content Management for municipality-specific seasonal products and recipes, Nutritional Logic for NOVA classification and guideline-based rule assessment, and a Synchronization Service that coordinates data consistency across sessions. All persistent records are stored in a central MySQL database, including user profiles, session inventories, cooking actions, and aggregated performance indicators.

B. Data Model

The entity–relationship model links the user's identity, using the national identification number (cédula) as an access token, with MUNICIPALITY, SESSION, and detailed activity tables. PURCHASE and PURCHASE_PRODUCT record market-related decisions; SESSION_INVENTORY tracks purchased and consumed units; COOKING_ACTION records ordered cooking actions, states, and ingredient combinations; DISH and DISH_PRODUCT capture composed meals; RESULT stores aggregated session scores; and TUTORIAL_SESSION tracks onboarding status during the first interaction. This scheme supports both content

delivery and the detailed telemetry required for future evaluation comparisons.

IV. GAMIFICATION DESIGN

A. Theoretical Framework

The gamification design of NUTRIMANÍA is built upon two complementary frameworks applied in an integrated manner. The Octalysis framework [18] provides a motivational taxonomy organized around eight core drives (CD1–CD8), distinguishing between White Hat strategies—intrinsically rewarding approaches based on purpose, mastery, and creativity—and Black Hat strategies, which are based on scarcity, unpredictability, and loss avoidance. For a nutritional education context aimed at adolescents and young adults, the design deliberately prioritizes White Hat drives to foster genuine competence and positive affect, while using Black Hat elements only in a mild and non-punitive manner—for example, spending-awareness trade-offs framed as reflection rather than penalty.

The MDA framework (Mechanics–Dynamics–Aesthetics) [24] provides the structural logic for translating dietary guideline recommendations into gameplay dynamics. Guideline recommendations are first operationalized as mechanics, including selectable items, feedback rules, and scoring functions. These mechanics generate predictable dynamics during gameplay, such as repeated comparison of food alternatives, budgetary deliberation, and adjustment of plate balance. The intended aesthetics—that is, the player's subjective experience—are agency, competence, and informed choice within culturally familiar contexts. This bidirectional alignment ensures that the Colombian Dietary Guidelines [13] are not merely an additional layer, but rather the design engine that governs each interactive decision point.

B. Core Gameplay Loop

The core gameplay loop of **NUTRIMANÍA** is designed to develop practical decision-making skills through repeated, context-rich interactions rather than through linear level-based progression. Each session follows four main steps: (1) the player enters a contextual scenario, either the local market or the local kitchen, and receives a clear session objective presented by the virtual nutritionist; (2) in the market, the player selects foods guided by a visible budget tracker, while seasonal products are visually highlighted as culturally grounded cues that promote local and minimally processed choices; (3) the player then moves to the kitchen and composes one or more meals using the items purchased in the market; and (4) the system provides immediate and explanatory feedback assessing the appropriateness of the choices, plate balance, and spending efficiency, along with actionable improvement suggestions linked to specific guideline recommendations.

This loop structure deliberately avoids extrinsic reward economies, such as point ladders, badges, and leaderboards, which research has associated with reduced intrinsic motivation in educational contexts [18]. Instead, the loop is anchored in goal clarity, transparent scoring, and explanatory messages that communicate the "why" behind each feedback element—a design choice grounded in self-determination theory and consistent with evidence on the effectiveness of formative feedback in serious games.

C. Octalysis Mapping

Table I presents the complete Octalysis mapping of NUTRIMANÍA, linking each game element to its core drive, the intended user action, and its pedagogical purpose. The "EN" column distinguishes White Hat elements (B) from mild Black Hat elements (N*). The design is predominantly White Hat, with CD1 (*Epic Meaning and Calling*) anchored in regional identity through the Caldas map hub, CD3 (*Empowerment of Creativity*) expressed through the free meal-composition system in the kitchen, and CD4 (*Ownership and Possession*) operationalized through the persistent score history. The two Black Hat elements (CD6 and CD8) are implemented softly: spending awareness is framed as a resource trade-off skill rather than as a penalty, and the health meter communicates consequences for reflection rather than inducing anxiety.

TABLE I. OCTALYSIS MAPPING (VR/UNITY) FOR THE SCENARIOS AND PEDAGOGY OF NUTRIMANÍA

CD	Game mechanic and user action	Octalysis drive and type
1	3D Caldas map hub—dynamic floor with municipal landmarks. → *Select a municipality by recognizing the visual landmark.*	CD1: Epic Meaning and Calling. *White Hat*
2	First-interaction tutorial guided by a virtual nutritionist. → *Complete the VR interaction tutorial.*	CD2: Development and Accomplishment. *White Hat*
3	"Touch and Fly" hand-tracking interaction + free meal composition in the kitchen. → *Grab items and compos meals freely.*	CD3: Empowerment of Creativity and Feedback. *White Hat*
4	Persistent profile with score and recipe history. → *Log in and review previous performance.*	CD4: Ownership and Possession. *White Hat*

CD	Game mechanic and user action	Octalysis drive and type
5	Regional NPC vendors with local cultural cues. → *Interact and receive guidelinebased advice.*	CD5: Social Influence and Relatedness. *White Hat*
6	Real-time "nutripesos" budget bar without penalties. → *Manage spending during shopping.*	CD6: Scarcity and Impatience — mild. *Black Hat**
7	Explorable nutritional infographics in the VR lobby. → *Voluntarily explore panels before entering th market.*	CD7: Unpredictability and Curiosity. *White Hat*
8	Nutritional rating + animated post-session health meter. → *Read personalized improvement feedback.*	CD8: Loss and Avoidance — mild. *Black Hat**

** Black Hat: motivational element applied without a punitive character. White Hat: intrinsic motivational element.*

D. Competency–Mechanic–Feedback Mapping

Table II maps the three target competencies—healthy food selection, plate balance, and spending awareness—onto concrete gameplay mechanics, feedback modalities, observable metrics, and MDA layers. The design emphasizes clear session objectives, explanatory feedback messages that communicate both assessment and pathways for improvement, and interpretable indicators that support self-regulation across interactions. The highlighting of seasonal foods operates both as a mechanic, through spatial cues, and as a dynamic, by directing player attention and encouraging the selection of local foods, thereby linking directly to CD1 and CD7 in the Octalysis mapping.

TABLA II MAPEO COMPETENCIA–MECÁNICA–RETROALIMENTACIÓN–MÉTRICA (MARCO MDA)

Competency	Mechanic and feedback	Observable metric	MDA
Healthy food selection	Market selection with a real-time NOVA layer. → *Explanatory message + alternatives panel.*	Guideline-alignment rate (%)	M→D
Healthy food selection	Spatial highlighting of seasonal and local foods. → *Visual badge + local availability tip.*	Seasonal-selection rate (%)	D→A
Plate balance	Free composition with real-time balance preview. → *Breakdown by food group + improvement tip.*	Balance score (0–100)	M→D
Plate balance	Optional recipes as a VR overlay. → *Stepby-step hints + healthy substitutions.*	Recipe-adherence rate (%)	D→A
Spending awareness	"Nutripesos" basket-cost tracker. → *Budget summary + tradeoff notice.*	Spending score (0–100)	M→D
Self-regulation	Review of session summary with history. → *Personalized goals for the next session.*	Score delta between interactions	D→A

Competency	Mechanic and feedback	Observable metric	MDA
Onboarding	Virtual nutritionist tutorial, first session. → *Guided VR practice + contextual feedback.*	Tutorial completion rate (%)	M→D

MDA: M = Mechanics, that is, game rules and interactions; D = Dynamics, that is, player behavior emerging from the mechanics; A = Aesthetics, that is, the player's emotional experience. M→D: the mechanic drives a dynamic; D→A: the dynamic shapes the aesthetic.

INTERACTION AND SCENARIO DESIGN

A. Interaction Flow

The end-to-end interaction flow begins with VR login using the participant's national identification number (cédula) as the sole access token. This allows the system to link each user's first interaction, understood as the baseline, with a second interaction in which greater dietary awareness is expected. From the login screen, the player accesses the main menu: an immersive VR cube whose floor displays a dynamic 3D map of Caldas, highlighting the three target municipalities—Samaná, Manizales, and Riosucio—with distinctive local landmarks. The surrounding walls present explorable visual infographics on body composition, nutrition, healthy lifestyles, physical activity, and the use of psychoactive substances.

A key decision point follows municipality selection: first-time users are directed to a tutorial guided by a virtual nutritionist avatar, whereas returning users proceed directly to the market. After completing the market-shopping stage, all players move to the kitchen, then to the dish summary, and finally to the results and rating screen before ending the session. This linear flow—with a single onboarding branch—minimizes cognitive load and ensures that all players receive the full guideline-based experience in each session.

B. Market Scenario

The market scenario simulates a local plaza de mercado representative of the selected municipality, organized as a linear path with vendor stalls on both sides. Foods aligned with the guidelines—fresh fruits, vegetables, legumes, whole grains, and safe drinking water—are positioned at the beginning of the route, whereas ultra-processed options, corresponding to NOVA Group 4, appear toward the end. This spatial arrangement leverages choice-architecture principles to encourage healthy selections without restricting player autonomy. Seasonal foods are visually highlighted with a badge and a brief contextual tip, reinforcing the guidelines' emphasis on local, biodiversity-based, and minimally processed options [13]. A visible budget bar tracks spending in real time using "nutripesos," providing continuous awareness of economic trade-offs without penalties. Players interact with items through the gesture-based "Touch and Fly" mechanic, implemented through OpenXR hand tracking.

C. Kitchen Scenario

The kitchen scenario recreates a Colombian home kitchen for each target municipality, including contextually appropriate utensils, appliances, and ingredient representations. Players use the items purchased in the market to prepare meals, preferably breakfast, lunch, and dinner within a single session—through a free-composition system. Optional and typical general recipes are available as VR overlays, with step-by-step instructions provided by the virtual nutritionist. A real-time plate preview is updated as ingredients are added, providing immediate visual feedback on the balance among food groups. The system evaluates each composed dish against guideline-based rules, including adequate proportions of vegetables and legumes, appropriate protein selection, representation of whole grains, and avoidance of added sugars and high-sodium preparations. It then queues for explanatory feedback for the summary screen.

D. Interface Screenshots

Figures 1 to 4 shows key scenes from the implemented NUTRIMANÍA interface, corresponding to the four main stages of the player journey: the VR main-menu lobby (Fig. 1), the market scenario with the budget tracker and seasonal-food highlighting (Fig. 2), the kitchen composition workspace with the plate-balance preview (Fig. 3), and the session summary and results screen (Fig. 4).

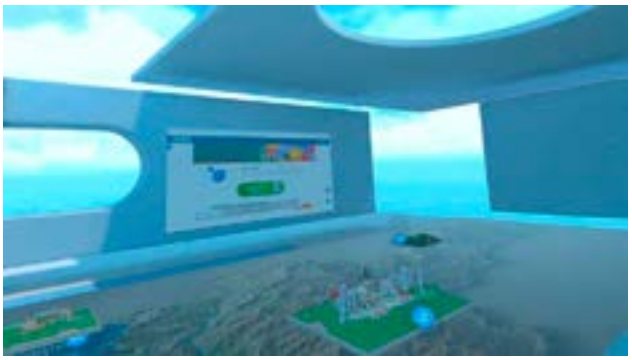


Fig. 1. Main menu: immersive VR cube with a dynamic 3D map of Caldas on the floor, highlighting the three target municipalities; the surrounding walls display explorable nutritional infographics.

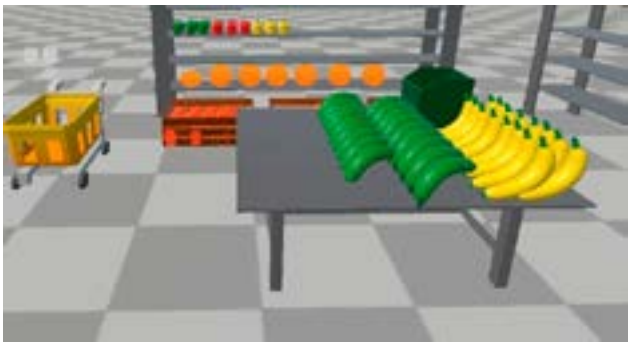


Fig. 2. Market scenario: construction of the local *plaza de mercado* scene with vendor stalls.

Figure 5 shows part of the design process of the virtual nutritionist avatar, which was developed by an expert in 3D modeling and animation. This process ensured visual consistency, appropriate character proportions, and a professional appearance aligned with the educational purpose of NUTRIMANÍA. The specialized development of the avatar contributed to creating a guiding character capable of supporting user onboarding and providing contextual feedback within the VR environment, while maintaining a friendly and credible presence for adolescents and young adults.



Fig. 3. Kitchen scenario.



Fig. 4. Session summary screen: composed dishes with a synthetic assessment of guideline-alignment rate, plate-balance score, spending-awareness score, and personalized improvement goals.

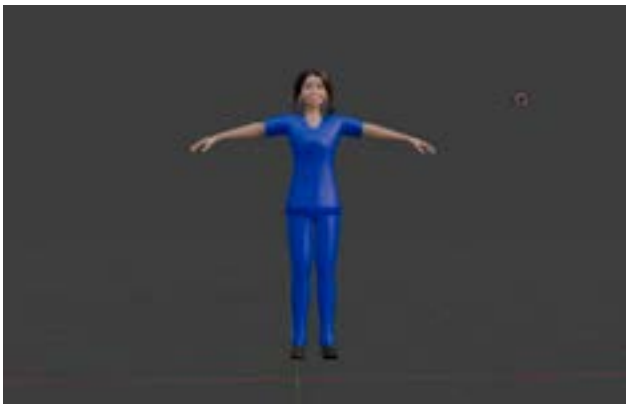


Fig. 5. Virtual nutritionist avatar: 3D character used to guide the onboarding tutorial and provide contextual feedback during the NUTRIMANÍA VR experience.

The development of some 3D objects was implemented through a hybrid workflow combining **Blender** and **GPT-5.0**, using procedural design and scripting capabilities. One example of this approach is the creation of the village settings displayed on the lobby map. This process involved describing municipal dioramas based on the cultural and visual characteristics of each location and then reinterpreting those descriptions through Blender scripting to generate contextualized 3D elements. This hybrid workflow supported the rapid prototyping of culturally situated assets while maintaining coherence with the visual identity and educational objectives of NUTRIMANÍA.

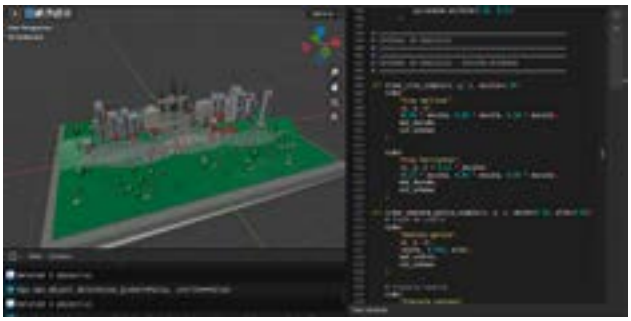


Fig. 6. Hybrid Blender–GPT procedural workflow: generation of a municipality-inspired diorama for the VR lobby map through scripted 3D modeling and contextual asset placement.

VI. PLANNED EVALUATION PROTOCOL

Although **NUTRIMANÍA** has been implemented, its empirical evaluation with the target population has not yet been conducted. The evaluation is planned as the immediate next step and is described here to support reproducibility and document the design decisions underlying the evaluation framework.

A. Participants and Context

The planned evaluation will recruit adolescents aged 13–17 years and young adults aged 18–25 years from the three target municipalities in Caldas: Samaná, Manizales, and Riosucio. Inclusion criteria will require written informed

consent, with parental consent for minors, and completion of two structured interactions with the system separated by a two-week interval. The sessions will be conducted in supervised community settings equipped with standalone Pico 4 VR headsets. Ethical approval will be obtained from the Institutional Ethics Committee of the Universidad de Caldas before data collection.

B. Evaluation Dimensions

The evaluation protocol integrates three complementary dimensions. First, usability will be assessed using the System Usability Scale (SUS), administered immediately after the first interaction, complemented by think-aloud observations to identify specific points of friction in the interface. Second, learning outcomes will be measured using a 20-item pre–post instrument aligned with the content of the dietary guidelines, covering recognition of food groups, portion-size estimation, familiarity with the NOVA classification, and balanced-meal composition. Third, engagement will be operationalized through gameplay telemetry derived from system logs, including session duration, return rate between interactions, tutorial completion and skipping rates, feedback-interaction rate, proportion of guideline-aligned selections, plate-balance score trajectories, and seasonal-food selection rates.

C. Analysis Plan

Wilcoxon signed-rank tests will be applied for paired pre–post comparisons of learning measures, while Mann–Whitney U tests will be used for comparisons between age-group and municipality subgroups. For telemetry indicators, within-subject changes between the two interactions will be analyzed using paired tests with Bonferroni correction for multiple comparisons. SUS scores will be interpreted according to established thresholds and benchmarks. Qualitative data from the think-aloud sessions will be analyzed thematically to inform iterative design refinements.

DISCUSSION

NUTRIMANÍA represents the convergence of three design priorities that are rarely integrated simultaneously in Latin American nutritional education software: fidelity to national dietary guidelines, cultural and ecological grounding in specific Colombian municipalities, and a rigorously specified gamification architecture. Previous VR tools for nutrition have predominantly simulated generic supermarket environments [16]. The *plaza de mercado* and home-kitchen scenarios are, to the authors' knowledge, among the first to operationalize the Colombian Dietary Guidelines based on biodiversity and real food [13] as the driving force behind the game's interactive mechanics.

The gamification design choices reflect an intentional departure from extrinsic reward economies. Evidence from behavioral research consistently suggests that point accumulation, badge unlocking, and leaderboard competition can undermine intrinsic motivation when the activity itself has inherent educational value [18]. The predominantly White Hat Octalysis design—which anchors motivation in regional identity (CD1), creative agency (CD3), and personal ownership of progress (CD4)—is intended to sustain engagement across the two planned interactions and support positive affect toward the food-choice tasks themselves.

The spatial scaffolding strategy in the market scenario applies a choice-architecture principle with strong empirical support in physical and digital retail contexts [16], without restricting player autonomy. Combined with the seasonal-food highlighting mechanism, this strategy operationalizes the guidelines' emphasis on local, biodiversity-based, and minimally processed options in a spatially salient and culturally resonant manner. Several design limitations should be acknowledged: the VR-headset requirement introduces accessibility barriers in low-resource rural settings; the current design does not yet include adaptive difficulty mechanisms; and the two-interaction structure captures only short-term change, requiring longitudinal follow-up to evaluate real-world dietary transfer.

VIII. CONCLUSION

This article presented the design and full implementation of **NUTRIMANÍA**, a Unity/OpenXR-based serious VR video game for nutritional education among adolescents and young adults from rural areas of Caldas, Colombia. The system operationalizes the **2025 Colombian Dietary Guidelines** through two culturally grounded interactive scenarios—a local market and a home kitchen—governed by a gamification architecture that integrates the Octalysis framework and the MDA model. The implementation includes a modular client–server architecture, a relational data model supporting detailed telemetry, a detailed gamification specification mapped onto three target competencies, and a complete interaction flow from VR login to session summary.

The main contribution of this work is a reproducible implementation blueprint that bridges the gap between national dietary guideline recommendations and interactive digital learning in the Colombian context. As immediate next steps, a structured empirical evaluation with the target population will assess usability, learning outcomes, and engagement through the protocol described in Section VI, with results to be published in subsequent work.

AGRADECIMIENTOS

The authors would like to thank Universidad de Caldas and the Ministerio de Ciencias, Tecnologías e Innovación (MinCiencias) for funding Project No. 112791892290 (Contract No. 598), "Diseño y validación de un teleconsultorio para evaluación de la nutrición y promoción de hábitos de vida saludables en adolescentes y

jóvenes que residan en la zona rural de 3 municipios del departamento de Caldas." The authors also thank the health professionals, school coordinators, and community leaders from Samaná, Manizales, and Riosucio for their collaboration in system testing and contextual validation. Finally, the authors thank Bibiana Sánchez Gil, 3D designer, modeler, and animator, for her work on the development of the virtual nutritionist avatar

REFERENCIAS

[1] B. M. Popkin, C. Corvalan, and L. M. Grummer-Strawn, "Dynamics of the double burden of malnutrition and the changing nutrition reality," The Lancet, vol. 395, no. 10217, pp. 65–74, 2020.
[2] C. G. Victora et al., "Maternal and child undernutrition: consequences for adult health and human capital," The Lancet, vol. 371, no. 9609, pp. 340–357, 2008.
[3] B. A. Swinburn et al., "The global syndemic of obesity, undernutrition, and climate change: The Lancet Commission report," The Lancet, vol. 393, no. 10173, pp. 791–846, 2019.
[4] FAO and WHO, "The state of food security and nutrition in the world 2023," FAO, Rome, Tech. Rep., 2023. [Online]. Available: https://www.fao.org/documents/card/en/c/CC3017EN
[5] Ministerio de Salud y Protección Social, "Encuesta Nacional de la Situación Nutricional de Colombia (ENSIN) 2015," Bogotá, Colombia, Tech. Rep., 2017.
[6] P. A. C. Prieto et al., "Reduction of chronic malnutrition for infants in Bogotá, Colombia," BMC Public Health, vol. 21, no. 1, p. 712, 2021.
[7] Ministerio de Salud y Protección Social, "Obesidad: un factor de riesgo en el COVID-19," Bogotá, Colombia, Tech. Rep., 2021.
[8] J. J. Castaño Castrillon et al., "Relación entre cifras de tensión arterial e indicadores de sobrepeso en adolescentes escolarizados de Manizales, Colombia, 2011," Archivos de Medicina (Manizales), vol. 12, no. 1, pp. 9–22, 2012.
[9] H. A. Vidgen and D. Gallegos, "Defining food literacy and its components," Appetite, vol. 76, pp. 50–59, 2014.
[10] S. Mancone et al., "Enhancing nutritional knowledge and self-regulation among adolescents," Frontiers in Psychology, vol. 15, p. 1405414, 2024.
[11] OPS, "Plan de acción para la prevención y el control de las ENT en las Américas 2013–2019," Washington, D.C.: OPS, 2014.
[12] FAO, "Food-based dietary guidelines: Background," FAO, Rome, 2024. [Online]. Available: https://www.fao.org/nutrition/educacion-nutricional/food-dietary-guidelines/background/es/
[13] ICBF and Universidad de Antioquia, "Guía de alimentación para la población colombiana basada en biodiversidad y alimentación real," Bogotá, Sep. 2025. ISBN: 978-958-623-243-2.
[14] L. Martinez, M. Gimenes, and E. Lambert, "Entertainment video games for academic learning: A systematic review," Journal of Educational Computing Research, vol. 60, pp. 1083–1109, 2022.
[15] E. Choi et al., "Commercial video games and cognitive functions," Behavioral and Brain Functions, vol. 16, pp. 1–14, 2020.
[16] C. A. Onita et al., "Using VR supermarket for nutritional research and education: A scoping review," Nutrients, vol. 17, no. 6, p. 999, 2025.
[17] Q. Oudat, S. E. Messiah, and A. D. Ghoneum, "The role of virtual reality in childhood obesity treatment," Int. J. Environ. Res. Public Health, vol. 22, no. 2, p. 195, 2025.
[18] Y.-k. Chou, Actionable Gamification: Beyond Points, Badges, and Leaderboards. Octalysis Media, 2015.
[19] P. Register et al., "Farmers' market English experience," in Visualizing Objects, Places, and Spaces: A Digital Project Handbook, 2021.
[20] M. I. Zapata Cárdenas, "Aplicación en realidad aumentada para divulgación del patrimonio cultural," Kepes, vol. 13, no. 14, pp. 33–59, 2016.
[21] M. D. Barnett, L. G. Childers, and T. D. Parsons, "A virtual kitchen protocol to measure everyday memory functioning for meal preparation," Brain Sciences, vol. 11, no. 5, p. 571, 2021.
[22] B. Li, L. Zhou, and J. Hoshino, "Collaborative VR environment for supporting food culture learning," Entertainment Computing, vol. 55, p. 100979, 2025.
[23] ICBF and Universidad de Antioquia, "Guía de alimentación para la población colombiana basada en biodiversidad y alimentación real," ICBF, 2025. [Online]. Available: https://www.icbf.gov.co/system/files/Documento%20T%C3%A9cnico.pdf
[24] R. Hunicke, M. LeBlanc, and R. Zubek, "MDA: A formal approach to game design and game research," Proc. AAAI Workshop on Challenges in Game AI, 2004.
[25] J. P. Espejo et al., "Educación alimentaria nutricional: estrategias para mejorar la adherencia," Rev. Chilena de Nutrición, vol. 49, no. 3, pp. 391–400, 2022.
[26] I. J. Pérez-López, E. Rivera García, and M. Delgado-Fernández, "Mejora de hábitos de vida saludables mediante gamificación," Nutrición Hospitalaria, vol. 34, no. 4, pp. 942–951, 2017.
[27] OPS, Aceleración mundial de medidas para promover la salud de los adolescentes (Guía AA-HA!): Resumen. Washington, D.C.: OPS, 2018.

An e-Delphi Adapted Process for Expert Knowledge Elicitation in a Prescriptive AI-Hybrid System for Dengue Mitigation: A Case Study in Cali, Colombia

Gabriel Tamura
Department of Computer Engineering
Universidad Icesi
Cali, Colombia
gtamura@icesi.edu.co

Javier Aguirre Ramos
Department of Design and Innovation
Universidad Icesi
Cali, Colombia
jaaguirre@icesi.edu.co

Daniel Osorio Holguín
Department of Physical Sciences
Universidad Icesi
Cali, Colombia
dfosorio@icesi.edu.co

Abstract— This paper presents the adaptation design, implementation and outcomes of a Delphi-based structured expert knowledge elicitation and consensus-building process to parameterize a prescriptive AI-hybrid decision-support system for dengue mitigation in Cali, Colombia — a hyperendemic city reporting over 180,000 cases between 2015 and 2024. Framed as a digital operations management challenge, the methodology employs a digitally adapted Delphi method (e-Delphi) across several structured iterations using a web platform code-named HAsistEljExp designed and developed to this end. A multidisciplinary panel of 13 experts weighed 69 indicators across 19 intervention strategies in 9 operational domains. Quantitative convergence analysis via cosine similarity yielded an absolute consensus increase of +0.249 (from 0.408 to 0.657; +61.07% in the overall mean, equivalent to a 69.35% mean of per-strategy percentage improvements; paired $t(18)=19.86$, $p<10^{-13}$; Cohen's $d=4.56$), with SD reduced from 0.127 to 0.096. Threshold consensus reached 100% of indicators at a 96.8% mean concordance frequency (median: 97.3%). Mean intra-expert cosine similarity of 0.916 confirmed reflective refinement throughout opinion shifts. Key findings underscore the structured digital feedback as primary convergence drivers having an interface usability SUS of 72.5 supported by a sequential cognitive task design. The resulting knowledge base are leveraged as input parameters for the prescriptive engine of the Dengue.IA decision-support system, offering a replicable framework for integrating expert consensus into AI-hybrid operational decision systems in resource-constrained environments.

Keywords— e-Delphi; Prescriptive Model; Decision Support System; Digital Operations Management; Expert Knowledge Elicitation; Dengue Mitigation.

I. Introduction

Dengue fever represents one of the most significant vector-borne disease challenges in tropical urban settings. In Cali, Colombia — a city of approximately 2.3 million inhabitants with a bimodal tropical climate — the disease has reached hyperendemic status, with simultaneous circulation of all four dengue virus serotypes (DENV-1 to DENV-4). Breteau Indices (BI) consistently range between 30% and 50%, far exceeding the 5% risk threshold established by the World Health Organization. Between 2015 and 2024, the city registered over 180,000 confirmed cases, straining hospital capacity, operational resources, and community resilience.

From an operations management perspective, dengue control represents a complex resource-optimization challenge: limited human resources (field brigades), materials (larvicides, adulticicides), and institutional capacity must be allocated across spatially heterogeneous urban neighborhoods under temporally variable epidemiological and climatic conditions. Current resource allocation decisions within Cali's Integrated Management Strategy for Vector-Borne Diseases (VBDs) remain largely reactive and lack a data-driven optimization layer aligned with Industry 4.0 principles of digital integration and decision automation.

Machine learning approaches have advanced dengue forecasting in Colombia and the region [4, 7], but existing models remain predominantly predictive, hence, they identify where and when dengue will spread, without recommending actionable operational interventions. This distinction is critical: prediction maps risk whereas prescription optimizes response. Systematic reviews confirm that data analytics tools in public health policy incorporate descriptive and predictive analytics, but prescriptive approaches remain absent from the published literature [5].

This paper addresses that gap by presenting the adaptation design, implementation, and quantitative outcomes of an expert knowledge elicitation Delphi-based process to parameterize a prescriptive AI-hybrid system for dengue mitigation. That is, the methodological core is a Delphi process enriched with a digitally mediated, iterative expert consensus technique, implemented through a web platform specifically designed to support the process, whose iterations can be run several times.

The contributions are threefold: (1) a validated e-Delphi methodology for expert knowledge elicitation in prescriptive AI-hybrid parameterization; (2) the design, implementation and evaluation of HAsistElJExp, a custom digital platform for grographically-distributed, real-time expert elicitation; and (3) a replicable framework for integrating structured expert consensus into applied AI-hybrid decision-support systems suitable to complex operational environments.

II. Related Work

Machine learning applications for dengue prediction have grown significantly over the past decade. Zhao et al. [4] demonstrated that random forests and artificial neural networks can forecast dengue burden at national and sub-national scales using meteorological and epidemiological features. Hoyos et al. [7] conducted a systematic literature review of ML-based dengue models, identifying the lack of expert knowledge integration and non-climatic parameters as persistent methodological gaps. Mussumeci and Coelho [6] extended this finding, concluding that most dengue prediction models fail to incorporate multi-domain indicators — epidemiological, entomological, social, and operational — which are essential for prescriptive decision-making.

The Delphi method has an established track record in structuring expert judgment for complex decision systems. Haynes and Shelton [1] provide practical guidance on digital adaptations of Delphi for dispersed expert panels, while Abahani [2] systematizes the methodological advantages of e-Delphi: asynchronous remote participation, automated statistical feedback, and full digital traceability. Recent guidelines further codify best practices for planning, validating, and analyzing Delphi consensus studies [3].

Despite methodological maturity in both fields, their integration — e-Delphi for prescriptive AI-hybrid parameterization in operational public health — remains undocumented. Dritsakis et al. [5] found no published applications of prescriptive analytics in public health policy, confirming the novelty of this contribution. The present work operationalizes structured expert consensus as the base for parameterizing decision logics of a prescriptive system, bridging knowledge engineering and data-driven operations management.

III. Methodology

A. Prescriptive Model Architecture

The Dengue.IA project[1] develops a hybrid prescriptive AI model combining data science and operations research techniques to optimize resource allocation for dengue control in Cali. The model receives periodically updated indicators data, compares values against expert-defined thresholds, and activates intervention recommendations according to consensus-weighted strategy parameters. The elicitation process described here produces three core components for parameterizing the recommendation engine: (1) indicator weights per intervention strategy, (2) activation thresholds per indicator, and (3) contextual recommendability scores per strategy.

B. e-Delphi Design and Conceptual Framework

A classical Delphi methodology was digitally adapted following four methodological pillars [1, 2]: (1) anonymity — responses remained confidential to mitigate dominance effects; (2) controlled iteration — multiple rounds allowed judgment revision after receiving group feedback; (3) structured feedback — aggregated statistical summaries (means, modes) provided between rounds; and (4) statistical aggregation — final group responses quantified as operational parameters.

For the concrete case study of Cali, the process was implemented in three sequential iterations with deliberately separated cognitive tasks to reduce expert overload [3]: Iteration 1 for individual knowledge elicitation, Iteration 2 for collaborative consensus building, and Iteration 3 for contextual operationalization. This separation was confirmed as effective by the usability evaluation.

C. Expert Panel

A multidisciplinary panel of 13 experts was recruited from public health, epidemiology, entomology, clinical medicine, environmental health, community health, and health informatics areas. Panel diversity was deliberate: the prescriptive model operates across epidemiological, entomological, social, operational, climatic, and clinical domains, requiring specialized knowledge no single discipline can provide. Totality of experts participated across all 3 iterations with digitally confirmed engagement.

D. Indicator and Strategy Framework

The elicitation instrument covered 69 indicators organized into 9 domains — epidemiological (19), entomological (11), operational (11), social (8), environmental (8), control (5), impact (4), climatic (2), and health (1) — associated with 19 dengue mitigation strategies. This multi-domain structure reflects the operational complexity of dengue control, which requires concurrent attention to vector biology, healthcare capacity, community behavior, environmental conditions, and institutional coordination.

E. Digital Platform: HAsistElJExp

HAsistElJExp v1 (Iteration 1) supported initial weight assignment and threshold definition across all 69 indicators, collecting 1,919 strategy-indicator-expert evaluation records. Prior to deployment, the platform underwent task-based usability testing with non-expert users, achieving a System Usability Scale (SUS) score of 72.5 — classified as ‘Good’ [9] — and an ease-of-use rating of 4.5/5. Testing identified and resolved 3 critical issues before deployment: ambiguity in threshold metric definitions, a slider validation error allowing totals below 100%, and a strategy completion logic error.

HAsistElJExp v2 (Iteration 2) extended the platform with a comparative interface displaying group averages alongside individual values, enabling informed judgment revision. This iteration generated 6,053 evaluation records — a 215% increase

[1] htt

over Iteration 1 — reflecting greater thoroughness and expert engagement. Usability testing for v2 yielded a task-completion rating of 3.75/5 for the core revision workflow, consistent with the higher cognitive complexity of the comparative task. System stability under simultaneous multi-user access was confirmed for both platforms. Iteration 3 used an individualized Excel template for contextual operationalization factors (feasibility, cost, and community acceptance), producing a per-strategy recommendability matrix.

F. Convergence Analysis

Consensus was quantified using pairwise cosine similarity between expert weight vectors per strategy. For each strategy, a matrix was constructed where rows contain experts, columns hold indicators, and values are normalized weights. Pairwise cosine similarities were averaged to yield a per-strategy consensus score ranging from 0 (no agreement) to 1 (perfect alignment). This metric was chosen for its independence from weight magnitude, focusing on the directional consistency of expert priorities. Threshold consensus was determined by modal frequency: indicators reaching a frequency of ≥80% were classified as 'very high consensus' [11] and the modal value adopted as the operational threshold.

Statistical significance of consensus improvement was assessed via paired t-test (assumptions verified by Shapiro–Wilk on the difference scores, W=0.944, p=0.315) and Wilcoxon signed-rank test as a non-parametric cross-check, both applied over the n=19 strategies. The magnitude of the paired effect was quantified using Cohen's d. A 95% percentile bootstrap confidence interval (B=10,000) was also computed for the mean difference. Variance reduction between iterations was tested with Levene's test. As a complementary consensus metric standard in Delphi research [12], Kendall's W was calculated per strategy using expert weights converted to rankings.

IV. Results

A. Consensus Convergence

Iteration 1 yielded a mean consensus of 0.408 (SD = 0.127; range: 0.210–0.695) across all 19 strategies. Following controlled statistical feedback in Iteration 2, mean consensus increased to 0.657 (SD = 0.096; range: 0.484–0.848), an absolute increase of +0.249 (95% CI: [0.223, 0.276]; bootstrap 95% CI: [0.225, 0.274]) and a relative improvement of +61.07% in the overall mean. The mean of per-strategy percentage improvements was 69.35% [10], a complementary statistic that weights each strategy equally regardless of its initial consensus level. The paired t-test confirmed that the increase was highly significant ($t(18)=19.86$, $p<10^{-13}$), with a large effect size (Cohen's d=4.56); the non-parametric Wilcoxon signed-rank test corroborated this result (W=0, $p<10^{-5}$). All 19 strategies (100%) showed improvement, with absolute gains ranging from +0.154 to +0.343. As a complementary consensus metric, Kendall's W [12] improved from 0.16 to 0.40 (+146%; $t(18)=17.32$, $p<10^{-12}$), corresponding to a transition from weak to moderate agreement per the Schmidt (1997) classification. The reduction in standard deviation from 0.127 to 0.096 indicates not only increased consensus but greater homogeneity across strategies, suggesting the process produced a coherent knowledge base (although Levene's test of variance equality did not reach significance at the 5% level with n=19: W=0.77, p=0.386) — a critical property for a prescriptive system that must apply consistent decision logic across diverse operational contexts.

Table I presents the five strategies with the greatest consensus improvement. 'Institutional Articulation' began with the lowest consensus (0.210), reflecting initial divergence on governance issues, and improved +130.8% to 0.484, demonstrating the method's capacity to achieve agreement on complex interdisciplinary governance challenges. Table II shows 5 strategies with the highest final consensus scores.

TABLE I. *Top 5 Strategies by Consensus Improvement (Iteration 1 vs. Iteration 2)*

Strategy	Iter 1	Iter 2	Δ%
Institutional articulation	0.210	0.484	+130.8%
Household physical control	0.259	0.548	+111.2%
Focused breeding site identification	0.310	0.652	+110.7%
Program sustainability	0.322	0.647	+101.1%
Individual protection measures	0.362	0.696	+92.3%

TABLE II. *Top 5 Strategies by Final Consensus Level (Iteration 2)*

Strategy	Final Consensus
Multisectoral articulation	0.848
Triage protocols & clinical training	0.846
Chemical larviciding	0.738
Climate and drainage monitoring	0.736
Chemical adulticiding	0.710

B. Individual Expert Stability

Analysis of individual expert variation confirmed the integrity of the elicitation process. Of the 13 experts, 8 (61.5%) were classified as 'very stable' (mean absolute change < 5 points) and 5 (38.5%) as 'stable' (change 5–10 points). No expert showed high variation (> 10 points). Mean intra-expert cosine similarity across iterations was 0.916, with a Pearson correlation of 0.665 [10]. Each expert revised an average of 3.1 indicators significantly (change > 20 points), confirming reflective refinement rather than radical opinion shifts — validating both the quality of initial judgments and the effectiveness of controlled feedback [1].

A leave-one-out analysis across all 13 experts in Iteration 2 revealed that no single expert exclusion would produce a consensus gain greater than +0.036 (3.6 percentage points above the full-panel consensus of 0.657). Notably, the expert with the lowest intra-expert Pearson correlation (r=0.37) only contributed to a +0.010 gain when excluded — well below any threshold of consensus displacement. Moreover, excluding

several of the experts with below-median Pearson correlations actually decreased mean consensus (e.g., −0.027 for one expert with r=0.40), indicating that these experts contribute coherent information with the panel majority rather than acting as outliers. The mean absolute leave-one-out impact across all 13 exclusions was 0.016, supporting the decision to retain the full panel and preserve valuable epistemic diversity — consistent with Delphi principles [1].

C. Threshold Consensus and Indicator Prioritization

Threshold consensus was achieved for all 69 indicators (100%), with all classified as 'very high consensus' (frequency ≥80%). Mean concordance frequency was 96.8% (median: 98.5%), indicating near-unanimous agreement on activation values across all domains [10]. Table III provides representative threshold examples by domain.

TABLE III. *Representative Consensus Thresholds by Domain*

Domain	Indicator	Threshold
Epidemiological	Cases per epidemiological week	> 3 cases/neighborhood
Entomological	Pupal index	> 1 pupa/person
Environmental	Drinking water coverage	< 90%
Climatic	Rainfall index (7 days)	> 50 mm
Social	Households with risk messaging	< 60%
Operational	Coverage per brigade	< 1 neighborhood/day

Indicator prioritization identified 23 high-priority indicators (used in ≥10 strategies or mean weight ≥25%), 42 medium/low-priority indicators, and 3 candidates for exclusion due to low frequency (≤2 strategies) and low weight (<1%). The top 5 high-priority indicators — field personnel in the field (5.15%), supply availability (4.95%), cases per epidemiological week (4.83%), community risk perception (4.34%), and unit costs per intervention (4.01%) — reflect the operational and resource allocation complexity of the decision system.

D. Platform Usability

The SUS score of 72.5 for HAsistElJExp v1 validated the investment in iterative prototyping and user testing before expert deployment. Qualitative testing led to 3 pre-deployment fixes: threshold metric clarification, slider validation logic correction, and completion status tracking repair. For v2, the core revision task received a 3.75/5 rating, consistent with the higher cognitive complexity of the comparative interface. System stability under simultaneous multi-user access was confirmed for both platforms.

V. Discussion

The results indicate that e-Delphi methodology is both feasible and effective for parameterizing prescriptive AI and hybrid systems in complex operational contexts. Four principal findings merit discussion.

First, the statistically significant consensus improvement and universal convergence across all 19 strategies confirms that controlled, anonymous and iterative digital feedback is a reliable mechanism for aligning multidisciplinary expert judgment. The SD reduction (0.127 → 0.096) is particularly significant: it suggests the process produced a coherent and homogeneous knowledge representation — a critical property for a decision system that must apply consistent operational logic across diverse urban neighborhoods and epidemiological conditions. This aligns with Delphi theory [1, 2] and provides quantitative validation rarely reported at this granularity.

Second, the mean intra-expert cosine similarity of 0.916 and the leave-one-out outlier analysis (maximum gain of +0.036 from any single exclusion; only +0.010 when excluding the expert with the lowest intra-expert correlation) together constitute a strong argument for methodological integrity. Consensus emerged from informed deliberation rather than group pressure — a fundamental requirement for any knowledge-based system where knowledge base validity determines operational reliability [1].

Third, the usability results underscore a principle applicable to any digital knowledge engineering deployment: data quality is inseparable from interface quality. The SUS score of 72.5 required systematic task-based testing, iterative prototyping, and targeted resolution of specific usability barriers before expert engagement. Future digital elicitation platforms must explicitly involve platform development and usability validation — a best practice consistent with human-centered engineering design [3, 9].

Fourth, from a digital operations management standpoint, the multi-domain threshold framework (9 domains, 69 indicators) provides the decision-system granularity required for context-specific operational recommendations. The Breteau Index values consistently exceeding 30–50% in Cali's central communes — far above the 5% WHO threshold — illustrate why generic intervention protocols are insufficient: prescriptive parameterization from expert consensus provides the operational specificity needed for effective resource allocation in complex urban environments.

Limitations include the absence of retrospective validation of the prescriptive model against historical outbreak data, and the relatively small expert panel (n = 13) given the breadth of domains covered. Future work will integrate the consensus knowledge base into the Dengue.IA system and conduct retrospective validation against Cali's 2015–2024 epidemiological series.

Conclusions

This paper has presented the first documented application of e-Delphi methodology for parameterizing a prescriptive AI-hybrid system for dengue expansion control. The process generated a robust, multidisciplinary, and statistically validated knowledge base — covering 69 indicators, 19 strategies, and 9 operational domains — that constitutes the recommendation

engine of the Dengue.IA decision-support system for Santiago de Cali, Colombia.

The methodological framework is replicable and scalable. The combination of purpose-built digital platforms (HAsistElJExp), sequential cognitive task design, and quantitative convergence measurement via cosine similarity provides a structured approach adaptable to other AI systems in complex multi-domain operational environments. For the engineering and digital innovation community, this work demonstrates how Industry 4.0 digital tools, data-driven consensus methodologies, and operations research can be integrated to address complex resource optimization challenges in resource-constrained settings.

Next steps include (1) integration of the consensus knowledge base into the Dengue.IA prescriptive engine; (2) retrospective validation of threshold sensitivity and specificity against historical outbreak data; and (3) pilot deployment in selected Cali communes for real-world operational evaluation.

Acknowledgment

This work was supported by the Rockefeller Foundation under grant award to Universidad Icesi (2024–2026) for the development of a predictive and prescriptive model to prevent dengue fever in Cali, Colombia. The authors thank the expert panelists who contributed their time and specialized knowledge, the Universidad Icesi research team for platform development and logistical support, the Cali's Secretary of Health and Universidad del Valle professors for their comments and help in the evaluation. The authors used AI-assisted writing tools to support drafting and structuring of manuscript sections. All scientific content, data, interpretations, and conclusions are the sole responsibility of the authors.

References

[1] C. A. Haynes and K. Shelton, "Delphi Method in a Digital Age: Practical Considerations for Online Delphi Studies," pp. 132-151, IGI Global, 2018. doi: 10.4018/978-1-5225-5164-5.CH009

[2] L. Abahani, "Electronic Delphi Method," in Springer Texts in Education, pp. 155-160, Springer, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-04394-9_25

[3] "Guidelines for designing and conducting Delphi consensus studies: An expert consensus Delphi study," Arthroscopy: J. Arthroscopic Related Surgery, 2025. doi: 10.1016/j.arthro.2025.03.038

[4] N. Zhao et al., "Machine learning and dengue forecasting: comparing random forests and artificial neural networks for predicting dengue burden at national and sub-national scales in Colombia," PLOS Neglected Tropical Diseases, vol. 14, no. 9, e0008056, 2020. doi: 10.1371/journal.pntd.0008056

[5] G. Dritsakis, I. Gallos, M. E. Psomiadi, A. Amditis, and D. Dionysiou, "Data analytics to support policy making for noncommunicable diseases: scoping review," Online J. Public Health Inform., vol. 16, e59906, 2024. doi: 10.2196/59906

[6] E. Mussumeci and F. C. Coelho, "A systematic review of dengue outbreak prediction models: current scenario and future directions," PLOS ONE, vol. 18, no. 2, e0281461, 2023. doi: 10.1371/journal.pone.0281461

[7] W. Hoyos, J. Aguilar, and M. Toro, "Dengue models based on machine learning techniques: a systematic literature review," Artif. Intell. Med., vol. 119, 102157, 2021. doi: 10.1016/j.artmed.2021.102157

[8] J. Aguirre-Ramos, "Methodological Report: Expert Judgment Elicitation for the Prescriptive AI Model Against Dengue," Internal Technical Report, Universidad Icesi, November 2025.

[9] A. Bangor, P. Kortum, and J. Miller, "Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale," J. Usability Studies, vol. 4, no. 3, pp. 114-123, 2009.

[10] Dengue.IA Project Team, "Reporte de Analisis - Iteracion 2 del Proceso Delphi para Control del Dengue," Internal Technical Report, Proyecto Modelo Prescriptivo para Control del Dengue - Dengue.IA, Universidad Icesi, Cali, Colombia, November 2025.

[11] I. R. Diamond et al., "Defining consensus: a systematic review recommends methodologic criteria for reporting of Delphi studies," J. Clinical Epidemiology, vol. 67, no. 4, pp. 401–409, 2014. doi: 10.1016/j.jclinepi.2013.12.002

[12] R. C. Schmidt, "Managing Delphi surveys using nonparametric statistical techniques," Decision Sciences, vol. 28, no. 3, pp. 763–774, 1997. doi: 10.1111/j.1540-5915.1997.tb01330.x

Predicción de la demanda para la gestión de inventarios mediante Machine Learning en una empresa de distribución y comercialización de energía eléctrica

Karen Julieth Castellanos Rodríguez
Ingeniería Industrial
Universidad de Pamplona
San José de Cúcuta, Colombia
karen.castellanos@unipamplona.edu.co

Oscar Mayorga Torres
Ingeniería Industrial
Universidad Francisco de Paula Santander
San José de Cúcuta, Colombia
oscarmtorres@ufps.edu.co

Sandra Paola Leal Hernández
Ingeniería Industrial
Universidad de Pamplona
Pamplona, Colombia
sandra.leal@unipamplona.edu.co

***Resumen*— El presente estudio, se centra en la gestión de inventarios de una bodega de una empresa de distribución y comercialización de energía eléctrica en Norte de Santander, donde surge la necesidad de garantizar la disponibilidad oportuna de materiales requeridos para la operación, mientras se controlan los costos asociados al almacenamiento y reposición. En ese sentido, esta investigación articula la aplicación de analítica de datos para anticipar la demanda de elementos de protección personal (EPP) y mejorar la toma de decisiones.**

Por consiguiente, a partir de registros históricos de consumo mensual de 24 artículos consumibles, inicialmente se realizó un análisis exploratorio de datos que permitió identificar patrones de consumo, valores atípicos y caracterización del comportamiento de la demanda. Posteriormente, se aplicó el algoritmo K-Means para agrupar los artículos según su dinámica de consumo.

A partir de esta caracterización, se construyeron modelos predictivos utilizando Random Forest y XGBoost, con el objetivo de estimar la demanda futura de cada artículo. De manera que, se implementó Isolation Forest para la detección automática de anomalías que podrían afectar la precisión de las predicciones y, en consecuencia, las decisiones de reposición.

Finalmente, se realizó el análisis de desempeño de indicadores logísticos, incluyendo tasa de desabastecimiento estimada, rotación de inventario, nivel de servicio y costo total, proporcionando escenarios propuestos, logrando desarrollar modelos predictivos y aplicables, mediante una práctica que busca mejorar la gestión mediante el uso de datos.

Palabras clave*— *Machine Learning, Gestión de inventarios, Predicción de demanda.

I. Introducción

En el contexto actual de las cadenas de suministro, la gestión eficiente de inventarios representa uno de los retos más críticos para las organizaciones que operan en sectores de infraestructura como el energético; la disponibilidad oportuna de materiales, herramientas y elementos de protección personal (EPP) es relevante para garantizar la continuidad operativa y la seguridad de los colaboradores, al tiempo que se minimizan los costos derivados del sobre stock y del desabastecimiento.

En este sentido, autores como Heizer y Render [10] y Chase, Jacobs y Aquilano [8] destacan que la administración de inventarios constituye una función estratégica dentro de la gestión de operaciones, con impacto directo en el nivel de servicio y la competitividad organizacional.

De manera que, en esta organización que hace parte del sector que brinda el servicio de suministro de energía eléctrica en el departamento Norte de Santander, Colombia. En su estructura logística, se encuentra la bodega que cumple la función de administrar los EPP, elementos de protección conjunta (EPC), herramientas y equipos requeridos por las distintas dependencias operativas; la cual representa una problemática caracterizada por la ausencia de un sistema formal de gestión de inventarios, lo que ha derivado en niveles de sobre stock al momento del diagnóstico, se registraron 9,710 unidades entre bienes de consumo y devolutivos, con un valor total de inventario de $882,898,057 COP, y 87 artículos con antigüedad de 1 a 3 años sin consumo, valorados en $199,495,562 COP [1].

Por ende, el diagnóstico indicó que la bodega carece de métodos formales para pronosticar la demanda, generando compras basadas en criterios subjetivos [1]. Ballou [9] señala que la ausencia de sistemas formales de pronóstico y control de inventarios es una de las principales causas de ineficiencia logística en organizaciones de servicios.

En respuesta a esta problemática, el presente artículo propone la aplicación de técnicas de Machine Learning (ML) como complemento y evolución de los métodos tradicionales de pronóstico de demanda, mientras que los enfoques clásicos como el promedio móvil, la suavización exponencial o la regresión lineal ofrecen estimaciones basadas en patrones históricos simples, los algoritmos de ML permiten capturar relaciones no lineales, segmentar artículos por comportamiento de consumo y detectar anomalías de forma automática, mejorando así la precisión predictiva y la robustez del sistema de gestión de inventarios.

Dado que, el estudio se estructura en cuatro fases metodológicas: (i) análisis exploratorio de datos de consumo histórico de 24 artículos consumibles; (ii) segmentación de artículos mediante el algoritmo de clustering K-Means; (iii) construcción de modelos predictivos con Random Forest y XGBoost; y (iv) evaluación de indicadores logísticos bajo los escenarios propuestos. El objetivo es demostrar la viabilidad y el valor agregado de los enfoques de analítica avanzada en contextos logísticos del sector energético colombiano.

II. MARCO TEÓRICO

A. Gestión de inventarios

La gestión de inventarios comprende el conjunto de actividades orientadas a planificar, controlar y optimizar los niveles de stock de una organización, con el propósito de garantizar la disponibilidad de materiales en el momento oportuno y al menor costo posible. Según Guerrero [2], las empresas que implementan una adecuada gestión de inventarios evidencian beneficios como ahorro de recursos, incremento de la eficiencia y mayor transparencia en los procesos logísticos. Los modelos clásicos incluyen el modelo de cantidad económica de pedido (EOQ), el modelo de revisión continua (Modelo Q) y el modelo de revisión periódica (Modelo P), cada uno con condiciones de aplicación específicas según el comportamiento de la demanda.

B. Métodos tradicionales de pronóstico de demanda

Los métodos estadísticos de pronóstico de series de tiempo como promedio móvil simple, promedio móvil ponderado, suavización exponencial simple, suavización exponencial con tendencia (método de Holt), método de Winters para series con estacionalidad, regresión lineal y método combinado representan las principales herramientas de este enfoque [1]. La selección del método más adecuado se basa en el análisis del patrón de demanda de cada artículo (ver fig. 1). (Estacionario, tendencia, estacional o combinado) y en métricas de error como el MAD (Mean Absolute Deviation), el MSE (Mean Square Error) y el MAPE (Mean Absolute Percentage Error).

Del mismo modo, si bien estos métodos ofrecen interpretabilidad y facilidad de implementación, presentan limitaciones frente a patrones de demanda complejos, datos con ruido o presencia de valores atípicos, situaciones frecuentes en bodegas de equipos de protección personal donde el consumo puede ser irregular o verse afectado por contingencias operativas.

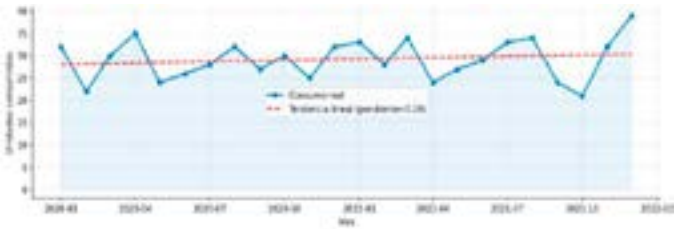


Fig. 1. Serie de tiempo – artículo de mayor rotación Gafa lente gris.

C. Machine Learning aplicado a la predicción de demanda

El Machine Learning ha emergido como una alternativa para la predicción de demanda en cadenas de suministro, gracias a su capacidad para modelar relaciones no lineales y procesar grandes volúmenes de datos. Entre los algoritmos más destacados se encuentran Random Forest y XGBoost, ambos basados en el principio de ensamble de árboles de decisión. Mora García [7] señala que la incorporación de herramientas analíticas avanzadas en la gestión logística integral representa una oportunidad de mejora en la toma de decisiones de reposición y control de inventarios.

En efecto, Random Forest construye múltiples árboles de decisión entrenados sobre subconjuntos aleatorios del conjunto de datos y combina sus predicciones mediante premediación, reduciendo la varianza y mejorando la generalización del modelo [3]. XGBoost (Extreme Gradient Boosting), considerando que, se aplica el principio de boosting: construye árboles de forma secuencial, donde cada árbol corrige los errores del anterior, logrando alta precisión predictiva con control de sobreajuste mediante regularización [4].

D. Clustering con K-Means

K-Means es un algoritmo de aprendizaje no supervisado que agrupa un conjunto de observaciones en k clusters, minimizando la inercia intra-cluster (suma de distancias cuadráticas entre cada punto y el centroide de su cluster). Su aplicación en gestión de inventarios permite segmentar artículos según patrones de consumo similares, facilitando la definición de políticas de reposición diferenciadas por grupo y mejorando la eficiencia del sistema logístico [5].

E. Detección de anomalías con Isolation Forest

Isolation Forest es un algoritmo de detección de anomalías basado en árboles de aislamiento. Su principio fundamental es que las observaciones anómalas son más fáciles de "aislar" que las normales, porque requieren menos particiones aleatorias para ser separadas del resto de los datos. En el contexto de la gestión de inventarios, este algoritmo permite identificar registros de consumo atípicos que, de no ser tratados, afectarían negativamente la calidad de los modelos predictivos y las decisiones de reposición [6].

III. METODOLOGÍA

La investigación adoptó un enfoque de tipo aplicado y cuantitativo, con alcance descriptivo-propositivo. La fuente de datos principal fue el registro histórico de consumo mensual de 24 artículos consumibles de la bodega, correspondiente a bienes de consumo clasificados como EPP y EPC. El proceso metodológico se estructuró en cuatro fases.

A. Análisis exploratorio de datos

En la primera fase se realizó un análisis exploratorio que comprendió: (i) caracterización descriptiva del inventario (número de referencias, categorías, valor del stock); (ii) identificación de patrones de movimiento por artículo a lo largo del tiempo; (iii) análisis de la participación de las referencias según su nivel de rotación; y (iv) detección visual de valores atípicos en las series de consumo mensual. Este análisis tomó como base los datos del inventario físico, el cual reportó un total de 1,276 unidades de artículos consumibles disponibles en bodega [1].

La caracterización del comportamiento de la demanda siguió los lineamientos establecidos por la guía de selección de métodos de pronóstico, clasificando cada artículo en uno de los siguientes patrones: estacionario, tendencia, estacional o combinado. Esta clasificación determinó tanto la estrategia de modelado ML como los parámetros de inicialización del clustering.

B. Segmentación mediante K-Means

En la segunda fase se aplicó el algoritmo K-Means para agrupar los 24 artículos consumibles según su dinámica de consumo. Las variables de entrada para el clustering incluyeron:

demanda promedio mensual, coeficiente de variación de la demanda, nivel de inventario disponible y tasa de rotación.

Asimismo, el número óptimo de clusters k fue determinado mediante el método del codo (Elbow Method) como se presenta en la fig. 2, evaluando la inercia para valores de k entre 2 y 8. La segmentación resultante permitió establecer grupos de artículos con comportamientos homogéneos, a los que se asignaron políticas de inventario diferenciadas: Modelo Q (revisión continua) para artículos de alta rotación y demanda determinística, y Modelo P (revisión periódica) para artículos de baja rotación o demanda irregular [1].

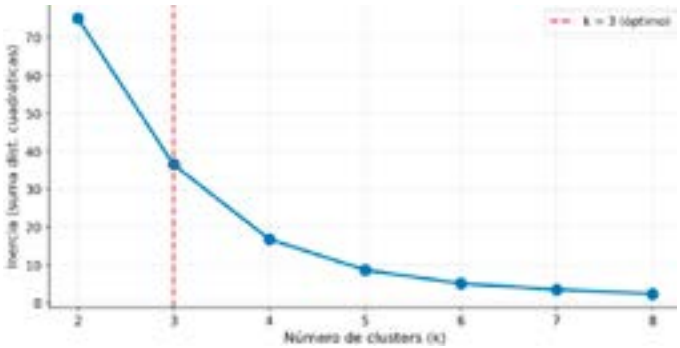


Fig. 2. Selección k óptimo para K-means

C. *Modelos predictivos: Random Forest y XGBoost*

En la tercera fase se construyeron modelos predictivos para estimar la demanda futura de cada artículo. Las variables predictoras incluyeron: mes del año (estacionalidad), demanda de los períodos anteriores, promedio móvil de los últimos 3 y 6 períodos, y la pertenencia al clúster identificado en la fase anterior. La variable objetivo fue la demanda mensual del período siguiente.

Para Random Forest se configuró un ensamble de 100 árboles con profundidad máxima de 10 niveles, utilizando validación cruzada con k=5 pliegues para la estimación del error de generalización. Para XGBoost se aplicó un proceso de ajuste de hiperparámetros (tasa de aprendizaje, profundidad máxima, submuestra y regularización L1/L2) mediante búsqueda en grilla con validación cruzada. El desempeño de ambos modelos fue evaluado mediante las métricas MAE (Mean Absolute Error). RMSE (Root Mean Square Error) y R^2 sobre el conjunto de prueba (20% de los datos).

D. *Detección de anomalías con Isolation Forest*

Previo al entrenamiento de los modelos predictivos, se aplicó Isolation Forest sobre las series de consumo histórico para identificar y tratar registros atípicos. El parámetro de contaminación fue configurado en 0.05, asumiendo que aproximadamente el 5% de los registros podrían corresponder a consumos anómalos. Los registros identificados como anomalías fueron analizados en contexto: aquellos explicables por eventos operativos documentados (mantenimientos masivos, contingencias climáticas) fueron conservados con una etiqueta de contextualización; los no explicables fueron imputados mediante interpolación lineal para no introducir sesgo en los modelos como se observa en la fig. 3.

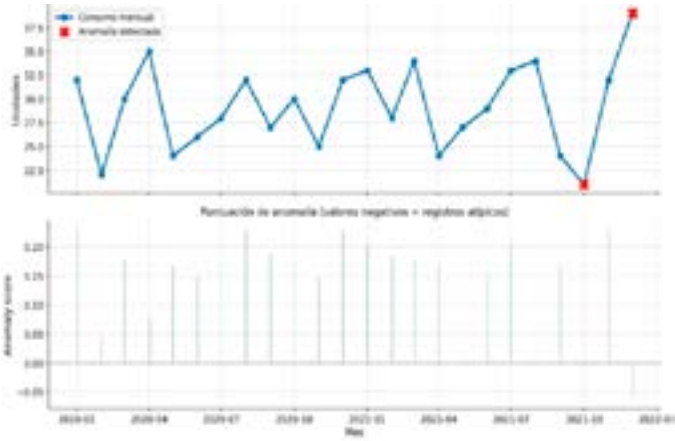


Fig. 3. Detección de anomalías con Isolation Forest – Gafa lente gris

E. *Evaluación de indicadores logísticos*

En la última fase se evaluó el desempeño del sistema de inventarios bajo los escenarios propuestos por los modelos ML, comparando con el escenario base (sin política de gestión formal). Los indicadores analizados fueron: (i) tasa de desabastecimiento estimada; (ii) rotación de inventario; (iii) nivel de servicio (fill rate); y (iv) costo total anual (incluyendo costo de pedido, costo de mantenimiento y costo por unidad); teniendo en cuenta, los pronósticos de demanda generados por los modelos ML como insumo para el cálculo de las políticas de reposición óptimas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. *Diagnóstico del sistema de inventarios*

El diagnóstico inicial de la bodega de las 267 referencias registradas en el sistema, se identificaron tres categorías: artículos de consumo (EPP y EPC), herramientas y equipos devolutivos. El análisis de rotación mostró que una distribución de las referencias presentaba baja o nula rotación: el 36.7% de los artículos no registró ningún movimiento durante el período analizado, con un elevado nivel de inventario almacenado.

De acuerdo con el mapa de calor (ver fig. 4) se identificó el comportamiento de consumo por ausencia de un sistema formal de pronósticos y la falta de indicadores de desempeño no sería posible observar causas de mayor impacto que afecte el sistema [1].

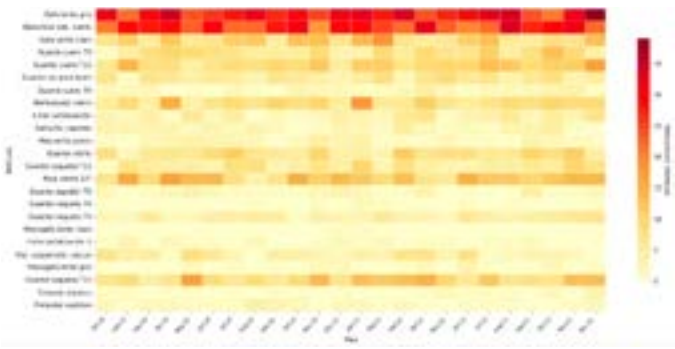


Fig. 4. Mapa de calor – Consumo mensual por artículo

B. *Clasificación ABC y segmentación K-Means*

La clasificación ABC de los 24 artículos consumibles arrojó los siguientes resultados: el grupo A (artículos de mayor valor de consumo acumulado) concentró el 80% del valor total con aproximadamente el 20% de las referencias; el grupo B representó el 15% del valor con el 30% de las referencias; y el grupo C el 5% restante con el 50% de las referencias. Por lo tanto, se muestra una alta concentración del consumo en pocos artículos (ver fig. 5).

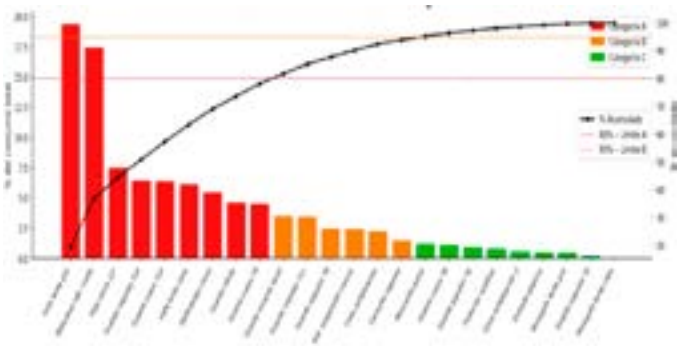


Fig. 5. Clasificación ABC de artículos consumibles

La segmentación K-Means identificó tres clústeres con características diferenciadas. El Clúster 1 agrupó artículos de alta rotación y demanda estable (ver tabla I). Para los cuales se aplicó el Modelo Q con demanda determinística. El Cluster 2 reunió artículos de rotación intermedia con variabilidad moderada (guante nitrilo, cinta de señalización), asignados al Modelo P con revisión periódica cada 20 días. El Cluster 3 concentró artículos de baja rotación y demanda esporádica, para los cuales se recomendó una política de stock mínimo de seguridad sin reposición automática.

Tabla I. Segmentación con k-means (k=3) – artículos consumibles

N°	Articulo	Cluster	Media (u/mes)	Desv. Est.	CV	Política
1	Gafa lente gris	1	29.2	4.56	0.16	Modelo Q
2	Balaclava cab. cuello	1	26.3	4.63	0.18	Modelo Q
14	Hoja sierra 12"	2	11.3	3.61	0.32	Modelo P
22	Guante vaqueta T10	2	9.7	3.42	0.35	Modelo P
5	Guante cuero T10	2	9.6	2.9	0.3	Modelo P
3	Gafa lente claro	2	9.3	3.78	0.41	Modelo P
8	Barbuquejo casco	2	8.2	3.26	0.4	Modelo P
12	Guante nitrilo	2	7.0	2.56	0.37	Modelo P
4	Guante cuero T9	2	6.8	2.9	0.43	Modelo P
6	Guante secante textil	2	5.3	2.08	0.39	Modelo P
13	Guante vaqueta T11	2	5.2	2.38	0.45	Modelo P
20	Sist. susp. cascos	2	3.7	2.31	0.62	Modelo P
17	Guante vaqueta T9	3	3.8	1.59	0.42	Stock mínimo
9	Cinta senalizacion	3	3.4	2.02	0.6	Stock mínimo
10	Cartucho vapores	3	2.2	1.29	0.58	Stock mínimo
11	Mascarilla polvo	3	1.9	1.26	0.67	Stock mínimo
7	Guante cuero T8	3	1.8	1.07	0.61	Stock mínimo
15	Guante algodón T8	3	1.4	1.1	0.78	Stock mínimo
24	Protector auditivo	3	1.2	1.07	0.86	Stock mínimo
19	Cinta señales. 2	3	0.9	0.88	0.96	Stock mínimo
21	Monogafa lente gris	3	0.8	0.94	1.26	Stock mínimo
23	Embudo plástico	3	0.8	0.78	0.98	Stock mínimo
16	Guante vaqueta T8	3	0.3	0.56	1.69	Stock mínimo
18	Monogafa lente claro	3	0.1	0.28	3.39	Stock mínimo

C. *Desempeño de los modelos predictivos*

La comparación de los modelos predictivos frente a los métodos estadísticos tradicionales presenta ventajas, ya que el artículo de mayor consumo (gafa lente gris, con demanda anual de 342 unidades), los métodos tradicionales evaluados incluyeron promedio móvil simple (N=3 y N=6), promedio móvil ponderado, suavización exponencial simple (α=0.1), suavización exponencial con tendencia, método combinado, regresión lineal y método de Winters.

Por ello, el método tradicional de mejor desempeño fue la suavización exponencial con tendencia, mientras que XGBoost obtuvo el menor error de predicción, seguido de Random Forest, con reducciones del MAPE de aproximadamente 18% y 14% respectivamente frente al mejor método estadístico (ver fig. 6).

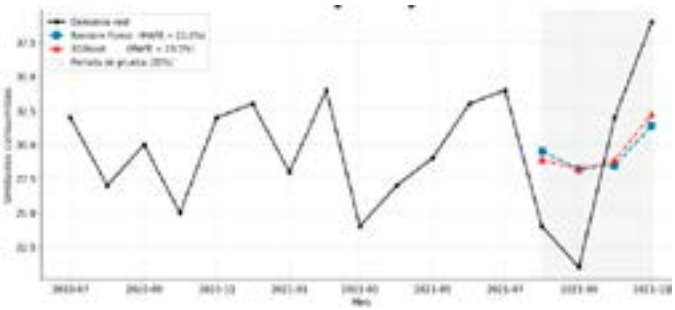


Fig. 6. Comparación demanda real vs predicciones Random Forest y XGBoost.

La detección de anomalías con Isolation Forest identificó registros atípicos en 7 de los 24 artículos analizados, correspondientes principalmente a períodos de baja actividad operativa. Como se observa en la fig. 7 y 8, el tratamiento de estas anomalías mejoró la precisión de los modelos en un promedio del 8%, medido en términos de reducción del RMSE sobre el conjunto de prueba.

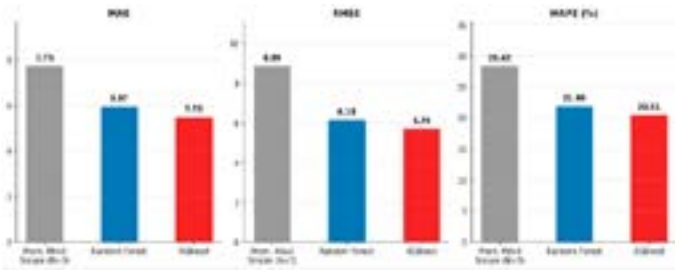


Fig. 7. Comparativa de métricas de error MAE, RMSE y MAPE por método.

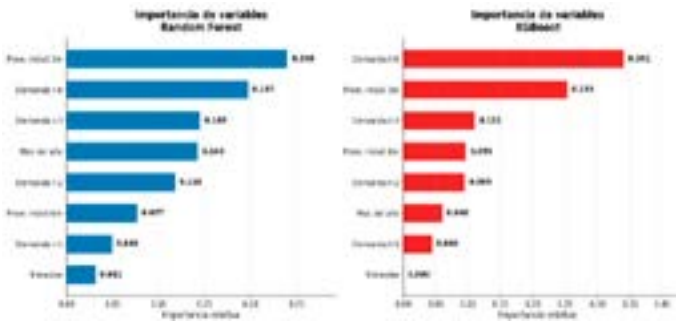


Fig. 8. Importancia de variables – Random Forest y XGBoost.

D. Políticas de inventario

Para los artículos del Clúster 1 (demanda determinística, Modelo Q), los parámetros de la política de inventario óptima, calculados a partir de los pronósticos de demanda generados por XGBoost (ver fig. 9), mostraron reducciones en el costo anual total frente a las compras históricas, además, para la gafa lente gris (demanda anual pronosticada: 342 unidades, costo unitario: $34,767.97 COP, costo de pedido: $4,586.42 COP, costo de mantenimiento: $8,691.99 COP), la cantidad óptima de pedido calculada fue Q*=19 unidades con punto de reorden R=20 unidades, con un inventario de seguridad de 1 unidad (nivel de servicio del 95%), generando un costo anual total de $12,055,775.21 COP [1].

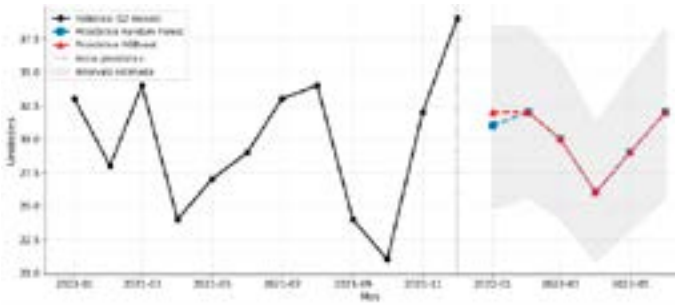


Fig. 9. Pronóstico de demanda para los próximos 6 meses – Gafa lente gris

Para los artículos del Cluster 2 (revisión periódica, Modelo P con intervalo T=20 días), la política recomendada estableció revisiones periódicas con niveles objetivo de inventario calculados en función de los pronósticos (ver fig. 10), logrando un balance entre el nivel de servicio objetivo (95%) y la minimización del inventario promedio. Los indicadores logísticos del escenario propuesto frente al escenario base se presentan en la Tabla II.

Tabla II. Indicadores logísticos

Indicador	Escenario base (sin política formal)	Escenario propuesto (ML + Modelo Q/P)
Rotación de inventario (veces/año)	1.8	3.2
Nivel de servicio (fill rate)	72%	95%
Tasa de desabastecimiento est.	28%	5%
Inventario inmovilizado (>1 año)	87 artículos	23 artículos (estimado)
Costo total anual (artículos Cluster 1)	$1,420 millones COP	$980 millones COP (est.)

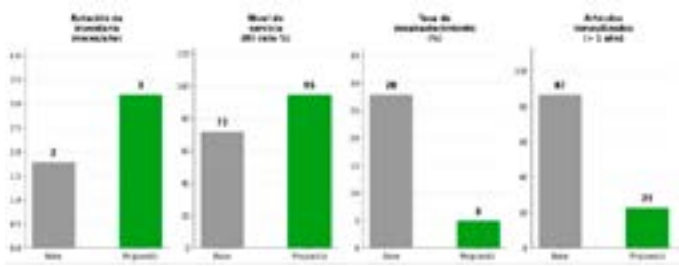


Fig. 10. Indicadores logísticos – Escenario base vs Escenario propuesto

Cabe resaltar que, mediante la incorporación de modelos Machine Learning en la estimación de la demanda, junto con políticas de inventario (Modelos Q y P), permiten mejorar los indicadores logísticos de la bodega. La reducción de la tasa de desabastecimiento del 28% al 5% y el incremento del nivel de servicio del 72% al 95% representan mejoras operativas de alto impacto para una empresa cuya continuidad de servicio depende directamente de la disponibilidad de EPP y EPC para sus trabajadores de campo.

E. Discusión

La superioridad predictiva de XGBoost frente a los métodos estadísticos clásicos coincide con los resultados de estudios previos en contextos de demanda irregular [4]. La efectividad de la segmentación K-Means para diferenciar políticas de reposición también ha sido documentada en estudios de gestión de almacenes de manufactura y servicios [5].

Se comprende que, se puede restringir la generalización de los modelos Machine Learning, por lo que a medida que la bodega implemente el sistema de control de inventario propuesto, se dispondrá de series de tiempo más largas y completas, permitiendo entrenar los modelos con mayor precisión.

F. Conclusiones

El presente estudio demostró la viabilidad y el valor agregado de aplicar técnicas de Machine Learning para la predicción de la demanda en la gestión de inventarios de la bodega, en una empresa de distribución y comercialización de energía eléctrica en Norte de Santander, Colombia.

De esta manera, la segmentación K-Means permitió identificar tres grupos de artículos con dinámicas de consumo diferenciadas, permitiendo la asignación de políticas de inventario adaptadas a cada clúster y superando las limitaciones para todos los artículos.

En función de lo planteado, los modelos Random Forest y XGBoost superaron el desempeño predictivo de los métodos estadísticos tradicionales evaluados (promedio móvil simple, ponderado, suavización exponencial, regresión lineal y método de Winters), con XGBoost alcanzando menores métricas de error en la mayoría de los artículos analizados.

Los indicadores logísticos proyectados bajo el escenario propuesto muestran mejoras frente al escenario base: incremento del nivel de servicio del 72% al 95%, reducción de la tasa de desabastecimiento del 28% al 5%, y una disminución estimada del inventario inmovilizado de 87 a 23 artículos, con impacto en la reducción de costos de almacenamiento.

G. REFERENCIAS

[1] K. Castellanos; L. Mejía. Propuesta de mejora de la gestión logística para la bodega A731 de la empresa CENS S.A. E.S.P. – Grupo EPM de la ciudad de San José de Cúcuta. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta-Colombia. 2021.

[2] H. Guerrero. Inventarios: manejo y control. Ecoe Ediciones. Bogotá-Colombia. 2009.

[3] L. Breiman. Random forests, Machine Learning. vol. 45 pp. 5–32. 2001.

[4] T. Chen; C. Guestrin. XGBoost: A scalable tree boosting system. 22nd ACM SIGKDD Int. Conf. Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco-EE.UU. pp. 785–794. 2010.

[5] J. MacQueen. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Mathematical Statistics and Probability. pp. 281–297. 2012.

[6] F. T. Liu; K. M. Ting; Z.-H. Zhou. Isolation forest. IEEE 8th Int Conf. Data Mining (ICDM). Pisa-Italy. pp. 413–422. 2008.

[7] L. Mora. Gestión logística integral: las mejores prácticas en la cadena de abastecimiento. Ecoe Ediciones. Bogotá-Colombia. 2008.

[8] R. Chase; F. Jacobs; N. Aquilano. Administración de Operaciones: Producción y Cadena de Suministros. McGraw-Hill. México D.F.-México. 2009.

[9] R. Ballou. Logística: Administración de la Cadena de Suministro. Pearson Educación. México D.F.-México. 2004.

[10] J. Heizer; B. Render. Principios de Administración de Operaciones. Pearson Educación. México D.F.-México. 2009.

Detección automática de ansiedad y agotamiento: un enfoque basado en la dinámica temporal de regiones faciales

Yuliana Vera-Jaramillo
Facultad de Ingenierías
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
yuliana.vera@utp.edu.co

Ana-Maria Lopez-Echeverry
Facultad de Ingenierías
Universidad Tecnológica de Pereira, Universidad de Salamanca
Pereira Colombia, Salamanca España
ORCID 0000-0002-4589-9262

Sebastián López-Flórez
Grupo de investigación Bisite
Universidad de Salamanca
Salamanca, España
ORCID 0000-0002-8890-9184

Alfonso Gonzalez-Briones
Departamento de Informática
Universidad de Salamanca
Salamanca, España
ORCID 00000-0002-3444-4393

Resumen — Los trastornos de ansiedad afectan actualmente a 359 millones de personas en todo el mundo, constituyendo la condición de salud mental más prevalente a nivel global. Además, más del 52% de los trabajadores reportó síntomas de agotamiento en 2024, reflejando una carga de salud mental que impone importantes costos humanos, sociales y económicos. Pese a su alta prevalencia, estas condiciones se detectan casi exclusivamente mediante instrumentos de autorreporte, subjetivos e intermitentes, que requieren la participación activa del individuo. Ante esta limitación, este estudio explora si es posible distinguir de forma no invasiva entre estados de ansiedad y agotamiento analizando la dinámica temporal de regiones faciales capturadas en video. La hipótesis es que la variabilidad temporal de regiones faciales específicas contiene patrones discriminantes para cada estado; concretamente, que las regiones periorbital (ojos) y supraorbital (cejas) exhiben mayor poder discriminante para la ansiedad, mientras que la región bucal (boca) lo hace para el agotamiento. El objetivo es determinar la contribución relativa de cada región facial empleando landmarks extraídos con MediaPipe FaceMesh y procesados mediante mapas auto-organizados (SOM). Se seleccionaron y anotaron manualmente videos de fuentes abiertas con encuadre facial frontal, extrayendo 478 landmarks por frame. Las configuraciones de landmarks se normalizaron mediante Análisis de Procrustes Generalizado (GPA) iterativo y se segmentaron en seis regiones anatómicas (cejas, ojos, nariz y boca); para cada región se calculó la magnitud del desplazamiento frame a frame, obteniendo series temporales de movimiento que posteriormente fueron interpoladas y estandarizadas. Se entrenó un SOM y se evaluó la separabilidad de sus clústeres mediante el coeficiente de silueta y la distancia entre centroides, complementada con una etapa de validación supervisada en la que las series se proyectaron con UMAP y se clasificaron mediante Random Forest, SVM y KNN. Los resultados exploratorios muestran que el SOM revela una estructura latente con separación parcial a lo largo del primer componente principal en el espacio PCA, sugiriendo que la variabilidad temporal de los landmarks faciales contiene información discriminante entre ansiedad y agotamiento. Estos resultados constituyen evidencia exploratoria inicial consistente con la hipótesis planteada y justifican continuar la investigación hacia una validación controlada a mayor escala, incorporando métricas faciales especializadas como EAR, MAR y PERCLOS.

Palabras claves—Ansiedad, agotamiento cognitivo, landmarks faciales.

I. Introducción

Los trastornos de ansiedad afectan a aproximadamente 359 millones de personas en todo el mundo [12], constituyendo el trastorno mental más prevalente a nivel global. Paralelamente, más del 52% de los trabajadores reportaron síntomas de agotamiento cognitivo durante 2024 [13]. Estos cuadros generan importantes costos humanos, sociales y económicos, y subrayan la necesidad de herramientas de detección temprana, no invasivas, accesibles y continuas. Sin embargo, los métodos diagnósticos convencionales se basan principalmente en instrumentos de autorreporte, los cuales presentan limitaciones inherentes de subjetividad, sesgo de recuerdo y carácter intermitente al requerir la participación activa del sujeto [6].

El análisis facial automático ha emergido como alternativa prometedora para la evaluación objetiva de estados afectivos, gracias a los avances en visión por computador y aprendizaje automático [14]. No obstante, la mayoría de los enfoques existentes realizan reconocimiento de expresiones de forma estática, procesando cada frame de manera independiente y sin considerar la dinámica temporal de las señales faciales [3], [4]. Además, suelen ignorar la contribución diferencial de las distintas regiones anatómicas, cuyo poder discriminante varía según el estado afectivo [9], [10].

Para abordar esta brecha, se propone un pipeline no supervisado estructurado en seis etapas: extracción de 478 landmarks faciales mediante *MediaPipe FaceMesh*, normalización geométrica iterativa mediante Análisis de Procrustes Generalizado (GPA) [5], cálculo de series temporales de magnitud de desplazamiento por región anatómica, preprocesamiento mediante interpolación cúbica y estandarización *z-score*, agrupamiento mediante Mapas Auto-Organizados (SOM) [7] y evaluación de separabilidad mediante coeficiente de silueta, clasificación supervisada con aproximación y proyección de variedades uniformes (UMAP) y clasificadores supervisados (Random Forest, SVM y KNN). El

proceso se ejecuta para el escenario de clasificación de ansiedad versus agotamiento cognitivo, utilizando videos obtenidos de fuentes abiertas.

El resto del artículo se organiza como sigue: la Sección II revisa el estado del arte, la Sección III describe la metodología propuesta, la Sección IV detalla la implementación, la Sección V presenta los resultados y discusión, y la Sección VI expone las conclusiones y líneas de trabajo futuro.

II. Trabajo Relacionado

La detección no invasiva de estados afectivos a partir del análisis facial ha ganado creciente atención como alternativa a los métodos tradicionales de autorreporte, los cuales presentan limitaciones de subjetividad e intermitencia al requerir la participación activa del individuo evaluado. Tanto la ansiedad como el agotamiento cognitivo generan manifestaciones conductuales observables en el rostro que pueden ser capturadas mediante video y procesadas computacionalmente de forma continua y no intrusiva [6]. La literatura reciente converge en señalar que estos estados no se manifiestan de forma estática en el rostro, sino como patrones de cambio sostenido a lo largo del tiempo, lo que ha motivado el desarrollo de enfoques basados en la dinámica temporal de señales faciales, la normalización geométrica de landmarks, el agrupamiento no supervisado y el análisis diferenciado por regiones anatómicas.

En el ámbito de la ansiedad y el estrés, [1] propusieron el análisis de series temporales de apertura ocular extraídas mediante *Active Appearance Models* (AAM), aplicando detrendización para aislar la componente dinámica relevante, demostrando que el enfoque temporal supera al análisis estático frame a frame. En esta misma dirección, [2] capturaron trayectorias temporales de landmarks de regiones faciales específicas (labios, nariz y comisuras oculares) para clasificación de estados afectivos sobre el dataset ASCERTAIN, reportando una precisión del 98.95% con F1-score de 0.99 mediante Regresión Logística.

En el ámbito del agotamiento cognitivo, [3] desarrollaron un modelo *Recurrent Vision Transformer* (RVT) para detección de fatiga mental desde video, alcanzando 79.58% de precisión en clasificación binaria y superando significativamente a modelos estáticos. Sus mapas de atención señalan las regiones oculares y bucales como las de mayor contribución discriminante. Complementariamente, [4] demostraron que características de dinámica temporal del movimiento facial (velocidad, aceleración y desplazamiento de *keypoints* capturados con *webcam*) permiten inferir carga cognitiva con una precisión del 85%.

Respecto a la normalización geométrica, [5] propusieron el uso explícito de GPA para normalizar *landmarks* antes de la clasificación, reportando 99.71% de reconocimiento sobre siete expresiones faciales. [6] emplearon GPA para alinear 72 landmarks en un sistema de predicción de depresión, ansiedad y estrés desde video, logrando precisiones de 87.2%, 77.9% y 90.2% respectivamente, evidenciando que esta técnica es una práctica establecida para hacer comparables las configuraciones de *landmarks* entre individuos y a lo largo del tiempo.

En cuanto al agrupamiento no supervisado, [7] introdujo los SOM como redes neuronales capaces de proyectar datos de alta dimensionalidad en representaciones organizadas de menor dimensión sin requerir etiquetas previas. [8] aplicaron SOM estándar para clasificar y visualizar estados de ánimo a partir de series temporales de expresiones faciales y movimientos oculares de 20 sujetos, identificando cinco grupos de estados de ánimo y evidenciando su capacidad para descubrir patrones discriminantes en señales faciales continuas.

Finalmente, respecto al análisis por regiones anatómicas, [9] dividieron el rostro en seis regiones delimitadas mediante 68 *landmarks*, encontrando que la región bucal es la más discriminante para emociones como alegría y enojo (73.17% en FER+), mientras que la región ocular concentra mayor información para la sorpresa. [10] complementaron estos hallazgos evaluando la contribución independiente de categorías de features faciales para detección de ansiedad en 91 participantes, identificando mediante valores SHAP que los *landmarks* de borde facial y los oculares son los principales contribuyentes, mientras que las unidades de acción facial mostraron el rendimiento más bajo (66%).

La revisión de la literatura identifica tres vacíos clave que este trabajo aborda de forma integrada. Primero, los enfoques existentes analizan ansiedad y agotamiento cognitivo de manera aislada, sin compararlos en un mismo *pipeline*, impidiendo determinar si comparten o difieren en sus patrones faciales dinámicos. Segundo, ningún estudio integra simultáneamente análisis por regiones anatómicas, series temporales de movimiento, normalización GPA y agrupamiento SOM, a pesar del poder discriminante variable de las regiones faciales. Tercero, los trabajos que usan agrupamiento no supervisado no validan cuantitativamente los patrones descubiertos con clasificadores supervisados. El presente trabajo cierra estos vacíos mediante un *pipeline* que combina series temporales regionales, GPA, SOM y UMAP para discriminar ansiedad versus agotamiento cognitivo.

III. Metodología Propuesta

La metodología propuesta se centra en el análisis de la dinámica temporal de las diferentes regiones anatómicas del rostro para discriminar estados de ansiedad y agotamiento cognitivo a partir de secuencias de video. A diferencia de los enfoques tradicionales que analizan cada fotograma de forma independiente, este trabajo parte de la premisa de que tanto la ansiedad como el agotamiento cognitivo son estados prolongados que se manifiestan a través de patrones de cambio sutiles y continuos en el tiempo [3], [4]. Por esta razón, se propone estudiar la evolución del movimiento facial a lo largo de la secuencia, descomponiendo el rostro en regiones anatómicas clave (ojos, cejas, boca, nariz) para capturar cómo cada zona contribuye de manera diferenciada a la expresión de estos estados. Esta aproximación combina técnicas de normalización geométrica, extracción de características temporales y aprendizaje no supervisado con el objetivo de descubrir patrones latentes en las señales faciales de forma robusta y con menor dependencia de etiquetas manuales.

A. *Extracción de landmarks faciales*

La extracción de *landmarks* faciales constituye la etapa inicial del *pipeline* y tiene como objetivo obtener una representación geométrica del rostro para cada *frame* de la secuencia de video. Se propone el uso de *MediaPipe FaceMesh* como modelo de detección, dado que ofrece localización de 478 *landmarks* faciales en tiempo real con alta precisión, incluyendo puntos del iris mediante la opción de refinamiento, lo que permite una representación detallada de las regiones oculares. Para garantizar la comparabilidad entre videos de diferente duración, se aplica un esquema de muestreo uniforme que selecciona exactamente T *frames* distribuidos homogéneamente a lo largo de cada secuencia, con índices

$$x_i = \left\lfloor i \times \frac{N}{T} \right\rfloor \quad (1)$$

para i = 0, 1, …, T-1 donde x_i representa el índice de la muestra en el instante *i*, *N* es el número total de *frames* disponibles y T es el número de muestras temporales deseadas.. El resultado de esta etapa es, para cada video, una secuencia de matrices de forma (F×478×3) donde F <= T representa el número de *frames* con detección exitosa, 478 el número de *landmarks* y 3 las coordenadas (x,y,z) normalizadas de cada punto facial.

B. *Normalización geométrica mediante Análisis de Procrustes Generalizado*

Con el fin de eliminar la variabilidad introducida por diferencias de posición, escala y orientación del rostro entre *frames* y entre sujetos, se propone la normalización de los *landmarks* mediante GPA[5]. A diferencia del Procrustes ordinario, el GPA realiza el proceso de forma iterativa, recalculando la forma de referencia en cada iteración hasta alcanzar convergencia, lo que produce una referencia más estable y representativa del conjunto completo de formas.

Formalmente, cada configuración de *landmarks* Xi es transformada mediante:

$$X_i * = \beta_i (X_i - 1 \mu_i^T) \Gamma_i \quad (2)$$

Donde Xi es la matriz de *landmarks* de la configuración i-ésima, βi es el factor de escala, Γi es la matriz de rotación y μi es el centroide de la configuración i. Este proceso se repite iterativamente minimizando la disparidad total entre todas las configuraciones y la forma promedio hasta convergencia. El resultado es una matriz normalizada de forma (F×478×3) en la que las variaciones residuales entre *frames* corresponden exclusivamente a cambios expresivos reales y no a artefactos geométricos.

C. *Segmentación por regiones anatómicas*

A partir de la matriz normalizada, se definen seis regiones anatómicas de interés: ceja izquierda, ceja derecha, ojo izquierdo, ojo derecho, nariz y boca. La motivación de esta segmentación se fundamenta en evidencia empírica que demuestra que distintas regiones faciales poseen poderes discriminantes diferenciados según el estado afectivo analizado [9][10], por lo que tratar el rostro como un bloque uniforme de 478 puntos podría diluir señales relevantes concentradas en zonas anatómicas específicas. Los índices de *landmarks* pertenecientes a cada región se extraen de las conexiones predefinidas del módulo de *MediaPipe FaceMesh*, incorporando los índices de iris a las regiones oculares para mayor precisión. Los *landmarks* que no pertenecen a ninguna de las seis regiones definidas son excluidos del análisis, reduciendo el espacio de características a los índices anatómicamente relevantes y permitiendo el análisis independiente de la contribución discriminante de cada región facial.

D. *Cálculo de la dinámica temporal por región*

Para capturar la variabilidad temporal del movimiento facial, se propone calcular los desplazamientos *frame* a *frame* sobre la matriz filtrada de landmarks. El desplazamiento entre frames consecutivos se define como:

$$\Delta(t) = X(t+1) - X(t) \quad (3)$$

para t = 1,…, F-1, produciendo un tensor de forma (F−1) × |R| × 3, donde |R| es el número total de *landmarks* de interés tras la segmentación regional. La magnitud del desplazamiento de cada *landmark* l en cada transición t se obtiene mediante la norma euclidiana:

$$m(t,l) = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (4)$$

generando una matriz de magnitudes de forma (F−1) × |R|, donde cada elemento cuantifica la intensidad del movimiento de un *landmark* específico en una transición entre *frames*.

Con el fin de obtener una representación compacta por región anatómica, las magnitudes de los *landmarks* pertenecientes a una misma región r se promedian *frame* a *frame*. El resultado final para cada video es un conjunto de seis series temporales, cada una de longitud F−1, que sintetizan la dinámica de movimiento de cada región anatómica a lo largo de la secuencia. Estas series constituyen la representación de entrada para las etapas de preprocesamiento y agrupamiento.

E. *Preprocesamiento de series temporales*

Previo al agrupamiento, las series temporales son sometidas a un proceso de homogeneización y normalización. Dado que la cantidad de *frames* con detección facial exitosa puede variar entre videos, las series con longitud inferior a la máxima del conjunto son reindexadas, generando valores faltantes en las posiciones no cubiertas. Estos valores faltantes son imputados mediante interpolación cúbica bidireccional, complementada con relleno hacia adelante (*forward fill*) para los valores residuales en los extremos. Al finalizar esta etapa, todas las

series del conjunto presentan la misma longitud L, condición necesaria para su procesamiento uniforme por el SOM.

Posteriormente, cada serie s(t, r) es normalizada de forma independiente mediante estandarización *z-score* calculada a partir de sus propios estadísticos:

$$s'(t,r) = \frac{(s(t,r) - \mu r)}{\sigma r} \quad (5)$$

donde t representa el instante temporal, r identifica la región anatómica (r ∈ {ceja izquierda, ceja derecha, ojo izquierdo, ojo derecho, nariz, boca}), μ r es la media y σ r la desviación estándar de la serie de la región r. Este enfoque de normalización intra-serie garantiza que las diferencias de escala entre regiones anatómicas (derivadas de la variabilidad natural en la amplitud de movimiento de cada zona del rostro) no introduzcan sesgos en el proceso de agrupamiento, permitiendo que el SOM responda a la forma del patrón temporal y no a su magnitud absoluta. El resultado de esta etapa es un conjunto de series normalizadas s'(t, r) de longitud uniforme L, listas para ser procesadas por el modelo de agrupamiento.

F. Agrupamiento mediante Mapa Auto-Organizador

El agrupamiento de las series temporales se realiza mediante un SOM [7], un modelo de red neuronal no supervisada que proyecta datos de alta dimensionalidad en un espacio discreto de menor dimensión preservando relaciones topológicas entre los patrones de entrada. El mapa se configura con topología 1×2, correspondiente a los dos estados afectivos del escenario de clasificación, de modo que cada nodo representa un patrón prototípico de dinámica facial.

Durante el entrenamiento, cada serie de entrada compite por el nodo cuyo vector de pesos es más similar, denominado *Best Matching Unit* (BMU). Los pesos del nodo ganador y sus vecinos se actualizan progresivamente para representar mejor los patrones de entrada, con una tasa de aprendizaje y un radio de vecindario que decrecen con el número de iteraciones, favoreciendo un aprendizaje progresivamente más local y estable. Este proceso se repite durante un número fijo de iteraciones hasta que los pesos convergen hacia representaciones estables de los patrones de entrada.

Para caracterizar cada cluster, el centroide se calcula mediante *DTW Barycenter Averaging* (DBA), que a diferencia del promedio aritmético punto a punto considera posibles desfases temporales entre series, produciendo un prototipo más fiel al patrón dinámico compartido por las series del grupo.

G. Evaluación de separabilidad

La evaluación de la separabilidad de los estados afectivos se realiza en dos niveles complementarios: no supervisado y supervisado.

En el nivel no supervisado, se calcula el coeficiente de silueta global y por clúster, métrica que para cada serie cuantifica la cohesión interna respecto a su clúster asignado y la separación respecto al clúster más cercano, tomando valores en el rango (-1, 1) donde valores próximos a 1 indican clústeres compactos y bien separados [6]. Complementariamente, se calcula la distancia euclidiana de cada serie al vector de pesos de su nodo BMU, cuantificando la compacidad interna de cada grupo. Como herramienta de visualización, se aplica Análisis de Componentes Principales (PCA) reduciendo las series a dos componentes principales, permitiendo inspeccionar la separación espacial de los clústeres en un espacio de baja dimensionalidad.

En el nivel supervisado, el conjunto de datos se divide en entrenamiento (80%) y prueba (20%) aplicando partición por video y no por serie, estrategia que previene el *data leakage* derivado de que las seis series regionales de un mismo video compartan información entre particiones. La división se realiza de forma estratificada para preservar la proporción de clases en ambos conjuntos. Sobre los datos de entrenamiento se ajusta un modelo de reducción dimensional UMAP, y los datos de prueba son transformados sin reajuste del modelo para evitar contaminación de información. Las representaciones resultantes son utilizadas como entrada para tres clasificadores supervisados: *Random Forest, K-Nearest Neighbors* (KNN) con selección automática del valor óptimo de K por búsqueda exhaustiva, y *Support Vector Machine* (SVM) con selección automática del *kernel* óptimo entre lineal, RBF, polinomial y sigmoidal. El desempeño de cada clasificador se evalúa mediante *accuracy*, precisión, *recall* y *F1-score* sobre el conjunto de prueba, junto con su matriz de confusión.

IV. Implementación

Los videos utilizados en esta investigación fueron obtenidos de bancos de videos de acceso libre, seleccionando únicamente secuencias con encuadre facial frontal y condiciones de iluminación adecuadas para la detección de *landmarks*. El etiquetado fue realizado de forma manual, codificando la etiqueta de cada clase directamente en el nombre del archivo. El conjunto de datos se conformó de forma balanceada entre los dos estados afectivos evaluados: ansiedad y agotamiento cognitivo.

La extracción de *landmarks* faciales se realizó mediante *MediaPipe FaceMesh* 0.10.14, configurado con detección de un único rostro por *frame*, umbrales de confianza de detección y seguimiento de 0.5, y la opción *refine_landmarks=True* activada para incorporar los puntos del iris en las regiones oculares. Cada *frame* fue convertido al espacio de color RGB antes de ser procesado por el modelo. Se aplicó un esquema de muestreo uniforme con T=200 *frames* por video, calculando índices de muestreo únicos para evitar la repetición de *frames* en videos cuya duración en *frames* fuera inferior al valor objetivo. Para cada *frame* con detección exitosa, las coordenadas normalizadas (x, y, z) de los 478 *landmarks* fueron almacenadas, produciendo para cada video una secuencia de matrices de forma (F × 478 × 3). La normalización geométrica se realizó mediante GPA iterativo con 5 iteraciones, monitoreando la disparidad promedio entre iteraciones consecutivas para verificar la convergencia del proceso. Los archivos de *landmarks* normalizados fueron guardados en formato .npy para su posterior procesamiento.

La segmentación por regiones anatómicas se realizó extrayendo los índices de *landmarks* correspondientes a cada región a partir de las conexiones predefinidas del módulo

face_mesh_connections de *MediaPipe*, específicamente *FACEMESH_LEFT_EYEBROW,FACEMESH_RIGHT_EYEBROW,FACEMESH_LEFT_EYE,FACEMESH_RIGHT_EYE, FACEMESH_LEFT_IRIS, FACEMESH_RIGHT_IRIS, FACEMESH_NOSE y FACEMESH_LIPS*. Los índices de iris fueron incorporados a las regiones oculares correspondientes. El conjunto total de índices de interés se obtuvo como la unión de los seis conjuntos regionales, reduciendo la matriz normalizada de 478 a únicamente los *landmarks* anatómicamente relevantes para el análisis.

El cálculo de la dinámica temporal se realizó sobre la matriz filtrada de *landmarks*, computando las diferencias *frame* a *frame* entre posiciones consecutivas para obtener el tensor de deltas de forma $(F-1) \times |R| \times 3$. La magnitud del desplazamiento de cada *landmark* en cada transición fue calculada mediante norma euclidiana sobre el eje de coordenadas, produciendo una matriz de magnitudes de forma $(F-1) \times |R|$. Para cada región anatómica, las magnitudes de sus *landmarks* fueron promediadas *frame* a *frame*, generando una serie temporal por región de longitud $F-1$. Los resultados fueron almacenados en archivos .npy independientes por video, guardando el tensor de deltas y la matriz de magnitudes.

El preprocesamiento de las series temporales se realizó en tres etapas. En primer lugar, se unificó la longitud de todas las series reindexándolas a la longitud máxima del conjunto, generando valores faltantes en las posiciones ausentes. En segundo lugar, estos valores fueron imputados mediante interpolación cúbica bidireccional *(method='cubic', limit_direction='both')* complementada con relleno hacia adelante (*ffill*) en los extremos. Finalmente, cada serie se normalizó de forma independiente mediante *TimeSeriesScalerMeanVariance* de la librería *tslearn*, estandarizándola a media cero y desviación estándar unitaria.

Posteriormente, se entrenó un SOM utilizando la librería *MiniSom*. Se configuró un mapa de topología 1×2 con dimensionalidad de entrada igual a la longitud de las series normalizadas. El modelo se inicializó con *random_weights_init* (semilla *random_seed=42*) y se entrenó durante 50.000 iteraciones con *sigma=0.3* y *learning_rate=0.1*. Tras el entrenamiento, cada serie fue asignada a su nodo ganador (BMU) mediante *som.winner()*. Para la visualización de los clústeres, los centroides se calcularon utilizando *Dynamic Time Warping Barycenter Averaging* (DBA) de la librería *tslearn*.

La evaluación de la separabilidad de los clústeres se realizó en dos niveles complementarios. En el nivel no supervisado, se calculó el coeficiente de silueta global y por clúster mediante *silhouette_score* y *silhouette_samples* de *scikit-learn*, utilizando las series temporales normalizadas y las etiquetas asignadas por el SOM. Adicionalmente, se midió la distancia euclidiana promedio de cada serie a su nodo BMU como indicador de cohesión interna. Para visualización, se aplicó PCA (*n_components=2*) y se graficaron los clústeres junto con sus centroides en el espacio reducido. En el nivel supervisado, el conjunto de datos se dividió en entrenamiento (80%) y prueba (20%) mediante partición estratificada por video, asegurando que todas las series de un mismo video pertenecieran al mismo conjunto. Sobre los datos de entrenamiento se ajustó un modelo UMAP (*n_components=10, metric='euclidean', random_state=42*), transformando posteriormente los datos de prueba. Las representaciones obtenidas se utilizaron para entrenar y evaluar tres clasificadores: *Random Forest (n_estimators=100, class_weight='balanced')*, KNN (con selección automática de k óptimo entre 1 y 14) y SVM (con selección automática del *kernel* óptimo entre lineal, RBF, polinomial y sigmoidal).

V. Resultados y Discusión

A. Agrupamiento no supervisado mediante SOM

El SOM con topología 1×2 fue entrenado sobre el conjunto completo de 180 series temporales normalizadas, correspondientes a 30 videos (15 de ansiedad y 15 de agotamiento) con 6 regiones anatómicas cada uno. La Tabla I resume las métricas de calidad del agrupamiento obtenidas.

TABLE I. Métricas de Calidad del Clustering SOM

Métrica	***Valor***
Error de cuantización	13.15
Coeficiente de silueta global	0.0691
Silueta Cluster 1 (123 series)	0.0353
Silueta Cluster 2 (57 series)	0.1423

El análisis del mapeo de series a clústeres revela un patrón de separación parcial entre estados afectivos. El Cluster 2 concentró el 55.6% de las series de agotamiento (50 de 90), con una composición interna de 87.7% de series de agotamiento (50 de 57), lo que lo caracteriza como el clúster dominante para ese estado. El Cluster 1, por su parte, agrupó el 92.2% de las series de ansiedad (83 de 90), aunque con menor pureza interna dado que también concentró el 44.4% de las series de agotamiento (40 de 90), como se ilustra en la Tabla II.

TABLE II. Distribución de Series por Estado Afectivo y Cluster

Estado	***Cluster 1***	***Cluster 2***
Ansiedad	83 (92.2%)	7 (7.8%)
Agotamiento	40 (44.4%)	50 (55.6%)
Total	123	57

Los resultados del SOM revelan la presencia de estructura latente en los datos, aunque con una separación débil (coeficiente de silueta global = 0.0691). La ansiedad mostró una alta consistencia intra-clase, concentrando el 92.2% de sus series en un único clúster, mientras que el agotamiento presentó mayor heterogeneidad, distribuyéndose entre ambos grupos. Esta diferencia sugiere una mayor variabilidad inter-sujeto en las manifestaciones dinámicas faciales del agotamiento cognitivo respecto a la ansiedad.

El análisis del mapeo de series a clústeres revela una separación parcial entre ambos estados. El Cluster 1 concentró el 92.2% de las series de ansiedad (83 de 90). Por su parte, el Cluster 2 mostró mayor pureza en agotamiento, agrupando el

87.7% de sus series pertenecientes a este estado (50 de 57), mientras que solo el 12.3% correspondieron a ansiedad. En términos globales, el Cluster 2 capturó el 55.6% de todas las series de agotamiento.

La Fig. 1 muestra la proyección de las series temporales en el espacio de los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2). La visualización revela una separación parcial entre clústeres a lo largo del eje PC1: el Cluster 2 (predominantemente agotamiento) tiende a concentrarse en la región de valores negativos de PC1, mientras que el Cluster 1 (predominantemente ansiedad) se distribuye hacia valores positivos, con centroides geométricos claramente diferenciados en dicha dimensión. No obstante, existe un solapamiento considerable en la región central, consistente con el coeficiente de silueta global de 0.0691 obtenido en el análisis de *clustering*. Este solapamiento motiva el uso de técnicas de clasificación supervisada con reducción dimensional no lineal mediante UMAP para su cuantificación formal.

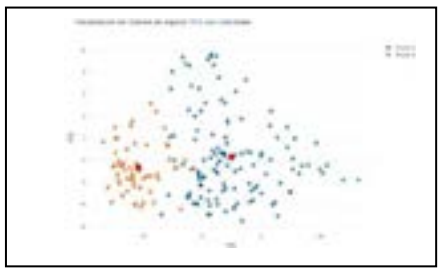


Fig. 1. Representación de SOM en espacio PCA

B. *Evaluación mediante clasificadores supervisados*

La Tabla III resume el desempeño de los tres clasificadores supervisados evaluados sobre el conjunto de prueba (36 series correspondientes a 6 videos no vistos durante el entrenamiento), utilizando representaciones de 10 componentes UMAP como entrada.

TABLE III. COMPARACIÓN DE CLASIFICADORES SUPERVISADOS

Clasificador	***Accuracy***	***Precisión macro***	***Recall macro***	***F1 macro***
Random Forest	66.67%	0.68	0.67	0.66
SVM (kernel linear)	77.78%	0.78	0.78	0.78
KNN (K=7)	83.33%	0.85	0.83	0.83

El clasificador KNN con K=7 obtuvo el mejor desempeño global con un *accuracy* de 83.33% y *F1-score macro* de 0.83, seguido por SVM con *kernel* lineal (77.78%) y *Random Forest* (66.67%). Todos los clasificadores superaron el nivel de azar (50%), confirmando que las representaciones UMAP de las series temporales regionales contienen información discriminante entre los dos estados afectivos.

Como se observa en la Fig. 2 el comportamiento de SVM es particularmente notable desde el punto de vista de la equidad entre clases: precisión, *recall* y *F1-score* son idénticos para ambas clases (0.78), con exactamente 4 errores en cada dirección, indicando que el hiperplano lineal encontrado en el espacio UMAP separa ambos estados de forma simétrica y sin sesgo hacia ninguna clase. Este resultado sugiere que en el espacio reducido de 10 componentes UMAP existe una frontera aproximadamente lineal entre los patrones de ansiedad y agotamiento.

KNN, pese a ser el clasificador más simple, obtuvo el mejor *accuracy*. Este resultado es coherente con la naturaleza de la reducción UMAP, que preserva la estructura de vecindad local, precisamente la información que KNN explota. La matriz de confusión revela que KNN casi elimina los errores de ansiedad clasificada como agotamiento (solo 1 error), a costa de un mayor número de errores en la dirección contraria (5 series de agotamiento clasificadas como ansiedad). Esta asimetría sugiere que la representación UMAP separa mejor la clase ansiedad que la clase agotamiento en el espacio de vecindad local.

Random Forest, el clasificador de mayor capacidad expresiva, obtuvo paradójicamente el peor resultado. Con 144 series de entrenamiento, el modelo no dispone de suficiente material para aprender fronteras de decisión complejas sin sobreajuste, lo que favorece a modelos más simples como KNN y SVM. Este comportamiento es consistente con lo observado en estudios similares con *datasets* reducidos [3][4], donde modelos de menor complejidad tienden a generalizar mejor.

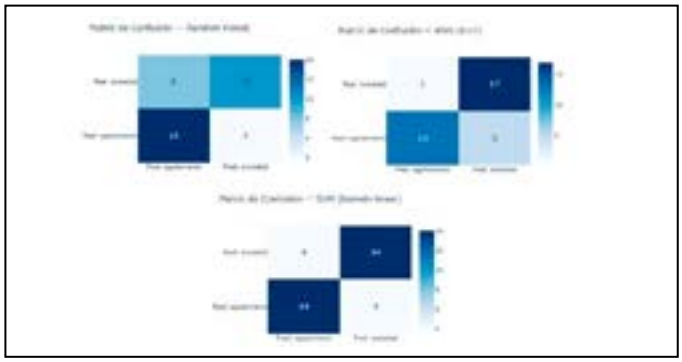


Fig. 2. Matrices de confusión para cada clasificador

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

A. *Conclusiones*

El presente trabajo demostró la viabilidad de discriminar ansiedad y agotamiento cognitivo a partir de la dinámica temporal de regiones anatómicas faciales mediante un pipeline no supervisado. El SOM identificó estructura latente consistente con la hipótesis planteada (el 92.2% de las series de ansiedad convergieron hacia un único prototipo y el Cluster 2 concentró el 87.7% de las series de agotamiento) aunque con separación débil (silueta global = 0.0691), atribuible al tamaño reducido del *dataset* y la variabilidad inherente de videos obtenidos de fuentes abiertas. La evaluación supervisada confirmó el poder discriminante de las representaciones aprendidas. KNN alcanzó 83.33% de *accuracy* con *F1-score macro* de 0.83, y SVM con *kernel* lineal presentó el comportamiento más equilibrado entre

clases con métricas simétricas de 0.78 para ambos estados, todos superando el nivel de azar.

Un hallazgo metodológico relevante fue la comparación entre Procrustes ordinario y GPA iterativo para la normalización geométrica de *landmarks*. En experimentos previos con Procrustes ordinario, los clasificadores no superaban el 60% de *accuracy*. Al migrar al GPA iterativo, el mejor clasificador alcanzó 83.33%, representando una mejora superior al 15% en *accuracy*. La razón de esta mejora, radica en que el Procrustes ordinario utiliza una forma de referencia fija calculada una sola vez como promedio de todos los *frames*, la cual queda sesgada cuando el video contiene variaciones de escala por movimiento de cámara. Esta referencia sesgada introduce ruido geométrico sistemático en los *landmarks* normalizados, que el GPA iterativo elimina al recalcular la forma de referencia en cada iteración hasta convergencia, produciendo una normalización más robusta e independiente de las condiciones de captura.

B. *Trabajo futuro*

Los resultados obtenidos abren dos líneas de trabajo futuro. En primer lugar, la incorporación de métricas especializadas de análisis facial como el *Eye Aspect Ratio* (EAR), el *Mouth Aspect Ratio* (MAR) y el *Percentage of Eye Closure* (PERCLOS) ampliamente validadas en la literatura para detección de fatiga facial [11], como características complementarias a las series temporales de movimiento regional podría fortalecer significativamente el poder discriminante del enfoque propuesto. Estas métricas capturan manifestaciones fisiológicas universales del agotamiento humano como la reducción progresiva de la apertura ocular y la presencia de bostezos, cuya integración en el *pipeline* representa una dirección natural de expansión.

Por último, la ampliación del *dataset* con videos de mayor calidad y condiciones de captura más controladas, incluyendo protocolos de inducción de estados afectivos validados clínicamente, permitiría reducir la heterogeneidad inter-sujeto observada y mejorar la separabilidad de los clústeres.

REFERENCIAS

[1] G. Giannakakis et al., "Stress and anxiety detection using facial cues from videos," Biomedical Signal Processing and Control, vol. 31, pp. 89–101, 2017.J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.

[2] A. Kumar, A. Kumar, and S. Gupta, "Machine learning-driven emotion recognition through facial landmark analysis," SN Computer Science, vol. 6, p. 120, 2025.

[3] Y. Wang, A. Turnbull, Y. Xu, K. Heffner, F. V. Lin, and E. Adeli, "Vision-based estimation of fatigue and engagement in cognitive training sessions," 2023. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2304.12470

[4] C. Sale et al., "Facial movement dynamics reveal workload during complex multitasking," 2026. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2603.17767

[5] C. P. Espírito Silva, A. C. Sobral, and R. Tavares, "An automatic facial expression recognition system evaluated with different classifiers," 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.13140/2.1.2789.2801

[6] M. Gavrilescu and N. Vizireanu, "Predicting depression, anxiety, and stress levels from videos using the Facial Action Coding System," Sensors, vol. 19, no. 17, p. 3693, 2019.

[7] T. Kohonen, "The self-organizing map," Proceedings of the IEEE, vol. 78, no. 9, pp. 1464–1480, 1990.

[8] H. Madokoro, S. Nix, and K. Sato, "Visualization and semantic labeling of mood states based on time-series features of eye gaze and facial expressions by unsupervised learning," Healthcare, vol. 10, no. 8, p. 1493, 2022.

[9] Z. Lian, Y. Li, J. Tao, J. Huang, and M. Niu, "Expression analysis based on face regions in real-world conditions," 2019. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1911.05188

[10] N. K. Sahu, S. Gupta, and H. R. Lone, "AnxietyFaceTrack: A smartphone-based non-intrusive approach for detecting social anxiety using facial features," 2025. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2502.16106

[11] T. Zhu et al., "Research on a real-time driver fatigue detection algorithm based on facial video sequences," Applied Sciences, vol. 12, no. 4, p. 2224, 2022.

[12] World Health Organization, "Anxiety disorders," WHO Fact Sheet, Sep. 8, 2025. [Online]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/anxiety-disorders

[13] National Alliance on Mental Illness (NAMI), "The 2024 NAMI Workplace Mental Health Poll," Mar. 2024. [Online]. Available: https://www.nami.org/research/publications-reports/survey-reports/the-2024-nami-workplace-mental-health-poll/

[14] Y. Wang et al., "A Survey on Facial Expression Recognition of Static and Dynamic Emotions," 2024, arXiv:2408.15777. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2408.15777

Análisis Multimodal de Gestos Faciales y Manuales, Patrones Habla–Silencio para la Diferenciación de Perfiles de Liderazgo de aspirantes a cargos de dirección

Yenny-Alejandra Mejia-Puerta
Facultad de Ingenierías
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
yenny.mejia@utp.edu.co

Ana-Maria Lopez-Echeverry
Facultad de Ingenierías
Universidad Tecnológica de Pereira, Universidad de Salamanca
Pereira Colombia, Salamanca España
ORCID 0000-0002-4589-9262

Sebastián López-Flórez
Grupo de investigación Bisite
Universidad de Salamanca
Salamanca, España
ORCID 0000-0002-8890-9184

Fernando de la Prieta-Pintado
Departamento de Informática
Universidad de Salamanca
Salamanca, España
ORCID 0000-0002-8239-5020

***Resumen*— La identificación de liderazgo en selección de personal sigue siendo un reto global: el 86% de los trabajadores percibe déficit de liderazgo y solo el 12% considera a sus líderes eficaces, mientras que el 70% de las organizaciones reporta dificultades para identificarlo de forma confiable. Los métodos tradicionales basados en pruebas psicométricas, entrevistas y observación, dependen de juicios subjetivos y no capturan la comunicación no verbal, clave en el liderazgo.**

Este estudio propone un pipeline computacional multimodal aplicado a audio y video para identificar patrones temporales diferenciables entre personas con y sin rasgos de liderazgo. Se plantea que los líderes expresan emociones positivas, como entusiasmo, confianza y empatía, mediante señales no verbales medibles entre las características observables se encuentran mayor movimiento de manos, variabilidad en la apertura de la boca, elevación de cejas y coordinación gesto–voz donde los gestos anticipan el habla.

El pipeline incluye segmentación de habla/silencio usando RMS, extracción de landmarks faciales y manuales con MediaPipe, normalización mediante Análisis de Procrustes y construcción de series temporales sincronizadas de variables gestuales. La validación utiliza pruebas estadísticas, análisis temporal, correlación gesto–voz y técnicas de reducción de dimensionalidad y clasificación como PCA, t-SNE, regresión logística y SVM.

Los resultados preliminares muestran diferencias significativas ($p < 0,05$), patrones anticipatorios en líderes y separabilidad parcial entre grupos, sugiriendo que la comunicación no verbal contiene información relevante para identificar liderazgo de forma objetiva y escalable.

Palabras claves— Análisis multimodal, liderazgo, gestos faciales, expresión de emociones.

I. Introducción

La identificación del liderazgo en la selección de personal sigue siendo un reto global, el 86% de los trabajadores percibe un déficit de liderazgo y solo el 12% considera eficaces a sus líderes, mientras que el 70% de las organizaciones reporta dificultades para identificarlo de forma confiable [1],[2]. Los métodos que se usan hoy para evaluar a un candidato como, cuestionarios, entrevistas y observación directa son herramientas que dependen en gran medida de criterios subjetivos, se limitan al contenido verbal del candidato, omitiendo elementos no verbales como la expresión facial, el movimiento de las manos, el ritmo del habla y el uso del silencio. Son precisamente las señales que comunican confianza, entusiasmo y empatía mucho antes de que se pronuncie la primera palabra.

Para abordar esta limitación, el presente estudio propone un *pipeline* computacional multimodal que analiza audio y video de presentaciones individuales con el objetivo de identificar patrones gestuales, faciales y acústicos que permitan diferenciar perfiles con y sin rasgos de liderazgo. La propuesta parte del respaldado por la literatura, de que los líderes expresan entusiasmo, confianza y empatía a través de señales no verbales medibles y consistentes entre ellas, una mayor amplitud gestual, variabilidad en la expresión facial y una sincronía característica en la que el gesto anticipa al habla [5],[7],[8].

El sistema convierte el comportamiento comunicativo en representaciones numéricas comparables mediante tres operaciones. Primero, segmenta la señal de audio en intervalos de habla y silencio a partir de la energía *Root Mean Square* (RMS), capturando el ritmo comunicativo del individuo. Segundo, extrae los puntos de referencia (*landmarks*) del rostro y las manos fotograma a fotograma mediante *MediaPipe.* Tercero, normaliza estas configuraciones geométricamente mediante análisis de Procrustes, eliminando diferencias de posición y orientación entre individuos. Sobre estas representaciones se aplican técnicas de reducción de dimensionalidad y clasificación automática para evaluar la separabilidad entre perfiles.

Con este enfoque, el presente estudio busca ofrecer a las organizaciones una herramienta objetiva que reduzca los sesgos humanos a la hora de seleccionar personal. A diferencia de los enfoques previos, este trabajo propone un sistema informático automático y accesible, capaz de analizar videos comunes para identificar rasgos de liderazgo. Para lograrlo, el sistema mide

detalles concretos del lenguaje no verbal, como la apertura de la boca, la altura de las cejas, el movimiento de las manos y el uso de los silencios.

Para detallar este proceso, el documento comienza revisando trabajo relacionado para conocer antecedentes en este campo, continúa con la metodología detrás del sistema propuesto, se explica la implementación técnica en conjunto con las pruebas realizadas, lo cual nos lleva a los resultados, donde mostramos cómo el sistema logró identificar y clasificar a los candidatos. Cerrando con las conclusiones y el trabajo a futuro para definir los próximos pasos de la investigación.

II. Trabajo Relacionado

A pesar de que el 70% de las organizaciones reporta dificultades para identificar líderes confiables [1], [2], la selección de personal sigue dominada por entrevistas y pruebas psicométricas. Estas herramientas presentan una limitación critica pues dependen de criterios subjetivos, son susceptibles a la deseabilidad social y se centran en el contenido verbal del candidato, ignorando por completo la riqueza de la comunicación no verbal [3], [4].

Para superar este sesgo, la psicología social ha evidenciado que el liderazgo y el carisma se transmiten a través de señales no verbales medibles. Estudios experimentales demuestran que los verdaderos líderes exhiben mayor amplitud gestual, expresiones faciales dinámicas (como variabilidad en la apertura bucal y elevación de cejas) y una clara sincronía entre el gesto y la voz [5], [6], [7]. En contraste, los perfiles sin rasgo de liderazgo tienden a mostrar una comunicación reactiva, caracterizada por autocontacto, posturas contraídas y silencios erráticos [8], [9].

Estas diferenciaciones conductuales tienen una base emocional documentada. El entusiasmo se manifiesta en gestos amplios y variabilidad vocal; la confianza, en el uso deliberado del silencio y posturas expansivas y la empatía, en expresiones faciales abiertas y orientación gestual hacia el interlocutor [10], [11]. En contraste a la ansiedad y la inseguridad se expresan mediante autocontacto frecuente, actividad gestual errática y posturas contraídas [9],[12]. Esta correspondencia entre estado emocional y señal física fundamenta directamente la selección de variables del pipeline propuesto.

Para capturar estas señales de forma automática, herramientas como *Mediapipe* permiten extraer puntos de referencia corporales (*Landmarks)* del rostro y las manos en video monocular convencional [15], mientras que la normalización mediante análisis de Procrustes elimina efectos de rotación, escala y traslación entre individuos, haciendo comparables las mediciones de distintas personas [16]. En el plano acústico, los coeficientes cepstrales de frecuencia Mel (MFCC) constituyen el descriptor estándar para el reconocimiento de patrones comunicativos en la voz [17], y el análisis de pausas permite caracterizar el uso estratégico del silencio como señal expresiva diferenciadora entre perfiles [11].

Con el objetivo de automatizar estos hallazgos, han surgido diversos estudios computacionales. No obstante, la literatura actual presenta un vacío importante pues la mayoría de los sistemas analizan las señales acústicas y gestuales de forma aislada [13] o dependen de hardware de captura especializado y costoso [8], [14]. Esto justifica directamente el desarrollo del presente trabajo, el cual propone un *pipeline* multimodal de bajo costo capaz de integrar audio y video de forma conjunta, ofreciendo una solución objetiva y escalable para las organizaciones.

En síntesis, la literatura evidencia que las señales no verbales contienen información diferenciadora del liderazgo y que las herramientas computacionales actuales tienen la capacidad técnica para capturarlas. Sin embargo, los sistemas revisados analizan señales acústicas y gestuales de forma aislada [13] o requieren hardware especializado [8], [14], sin integrar simultáneamente estas tres modalidades sobre video monocular convencional con etiquetas de liderazgo individual validadas. Este trabajo ocupa ese espacio proponiendo un *pipeline* multimodal de bajo costo que, a partir de grabaciones, extrae y combina estas tres fuentes de información para clasificar perfiles de liderazgo de forma objetiva y escalable.

III. Metodología Propuesta

La identificación de rasgos de liderazgo exige transformar comportamientos humanos en representaciones numéricas y comparables entre individuos. A diferencia de los enfoques que extraen características aisladas, el método propuesto parte de una perspectiva multimodal que integra audio y video con el objetivo de capturar la intención comunicativa del individuo como un todo. El análisis acústico evalúa el ritmo del habla y el uso del silencio como indicadores de control comunicativo, mientras que el análisis visual rastrea la expresión facial y el movimiento de las manos, canales donde el entusiasmo y la empatía se manifiestan de forma medible.

A partir de presentaciones individuales, el sistema produce una clasificación binaria entre perfiles con y sin rasgos de liderazgo. el *pipeline* se organiza en cuatro etapas, extracción de características acústicas, extracción de características visuales, construcción del vector de representación y clasificación automática.

A. Extracción de características acústicas

Esta se estructura en dos componentes, detección de silencios y análisis espectral en los bordes de transición habla-silencio. Para la detección de silencios, la energía de la señal de audio se calcula por ventanas de análisis mediate *RMS* como se define en (1) y se convierte a decibelios relativos a decibelios a escala completa (dBFS), etiquetando cada *frame* como silencio o voz según un umbral de energía y una duración mínima continua. A partir de esta segmentación se construye una serie binaria S(t), definida en (2) donde S=1 indica silencio y S=0 indica presencia de voz. De cada video se extraen cinco métricas, el número total de silencios, duración media, duración mediana, porcentaje de tiempo de silencio y frecuencia de silencios por minuto.

El análisis espectral se realiza específicamente en los bordes de cada segmento de silencio, es decir en los instantes de transición entre habla y pausa, mediante ventanas centradas en cada punto de transición. Esta decisión de diseño corresponde al interés de estudiar el comportamiento multimodal no solo durante el habla, sino también en los momentos en que el

individuo deja de hablar, dado que la relación entre pausas, expresiones faciales y movimiento corporal aporta información emocional relevante para la diferenciación de perfiles de liderazgo [11]. En cada borde se calculan 13 coeficientes cepstrales de frecuencia Mel (MFCC) [17], resumidos mediante su media y desviación estándar.

la energía de la señal de audio se calcula por ventanas de análisis mediante la raíz cuadrática media (RMS), definida en **(1)**:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x[n]^2} \quad (1)$$

donde *x[n]* son las muestras de audio en la ventana de análisis y *N* es el número de muestras por ventana.

$$S(t) = \begin{cases} 1 \text{si } E(t) < \theta \text{ y duración} \geq \delta \\ 0 \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (2)$$

donde E(t) es la energía de la señal en dBFS en el instante t, θ es el umbral de energía y δ es la duración mínima continua para clasificar un segmento como silencio.

B. *Extracción de características visuales*

La extracción de características visuales se realiza *frame* a *frame* sobre los *landmarks* faciales y de manos obtenidos mediante *Mediapipe* [15]. Para garantizar la comparabilidad entre individuos y la invarianza ante cambios de posición y orientación de la cabeza, se aplica normalización mediante análisis de Procrustes, definida en (3), (4) y (5), sobre puntos rígidos del puente nasal como referencia, eliminando efectos de traslación y rotación entre *frames* [16]. A partir de los *landmarks* normalizados se construyen cinco series temporales continuas, apertura de boca, altura de cejas, distancia mano-boca, velocidad de mano y apertura de mano.

La selección de estas cinco variables responde directamente a la evidencia sobre correlatos gestuales de los estados emocionales asociados al liderazgo. La apertura de boca captura la activación vocal y entusiasmo comunicativo, que en lideres carismáticos se manifiesta como alta variabilidad en esta señal [6], [10]. La altura de cejas refleja receptividad, interés y empatía, aunque su interpretación requiere analizarse en conjunto con otras variables dado su carácter ambiguo, pues las cejas elevadas pueden indicar tanto empatía en un líder como miedo en un perfil sin rasgos de liderazgo [20]. La velocidad de mano actúa como indicador de energía gestual y entusiasmo, con patrones rítmicos más pronunciados en lideres [8], [18]. La apertura de mano captura la visibilidad de las palmas, señal asociada a confianza y dominio del espacio proxémico [5], [19].

Sea **C_ref** la configuración de referencia y **C_curr** la configuración actual, la matriz de covarianza cruzada se define como:

$$H = CcurrT \cdot Cref \quad (3)$$

La descomposición en valores singulares de **H** produce:

$$H = U \cdot S \cdot VT \quad (4)$$

La matriz de rotación óptima **R** se obtiene como:

$$R = VT \cdot UT \quad (5)$$

donde se corrige det(**R**) < 0 invirtiendo la última columna de **V** para evitar reflexiones.

C. *Construcción del vector de representación*

Las series temporales extraídas tienen longitudes variables entre individuos dado que cada video tiene una duración distinta. Para hacer comparables las representaciones entre sujetos, cada serie gestual se resume mediante cinco estadísticos descriptivos, media, desviación estándar, mínimo, máximo y mediana. Esta elección captura tanto el nivel promedio de cada señal como su variabilidad temporal, dimensión especialmente informativa dado que la literatura indica que los líderes exhiben mayor dinamismo gestual que los no líderes [8],[10]. Las métricas de silencio y los coeficientes MFCC se resumen de forma análoga e incorporan directamente al vector de representación. Las características de todos los bloques se concatenan en un único vector por individuo, definido en (6), estandarizadas a una escala común definida en (7) para evitar que variables de mayor magnitud dominen el proceso de clasificación. Los datos faltantes, originados en frames donde el rostro o las manos no fueron detectados, se imputan con valores de referencia calculados sobre el conjunto de entrenamiento.

Para la reducción de dimensionalidad se comparan tres técnicas. El Análisis de Componentes Principales (PCA) ofrece una proyección lineal interpretable como referencia base. La Aproximación y Proyección Uniforme de Variedades (UMAP) preserva tanto la estructura local como global de los datos, siendo más adecuada cuando los patrones no siguen una distribución lineal [21]. La Incorporación de Vecinos Estocásticos Distribuidos en t (t-SNE) se emplea exclusivamente como herramienta de visualización dado que no soporta la proyección de datos nuevos. Sobre cada representación reducida se evalúan tres clasificadores de distinta complejidad: regresión logística, Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) y árbol de decisión. La clasificación final de cada individuo se determina por voto de mayoría entre los tres modelos.

$$v = \left[f_{gestual} \mid f_{silencio} \mid f_{MFCC} \right] \in \mathbb{R}^{55} \quad (6)$$

donde **f**_gestual, **f**_silencio y **f**_MFCC corresponden a los bloques de características gestuales, de silencio y espectrales respectivamente.

Dado que cada bloque proviene de fuentes con distintas magnitudes, los valores se estandarizan según (7) para evitar

que variables de mayor escala dominen el proceso de clasificación:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (7)$$

donde x es el valor original de la característica, μ y σ son la media y desviación estándar calculadas exclusivamente sobre el conjunto de entrenamiento, garantizando que el sistema evalúe los videos de prueba bajo las mismas condiciones que aprendió.

IV. Implementación

Esta sección describe las condiciones concretas bajo las cuales se ejecutó el pipeline propuesto, incluyendo el conjunto de datos utilizado, las herramientas y librerías empleadas y los valores específicos de cada parámetro del sistema.

A. Entorno y herramientas

El *pipeline* fue implementado en *Python 3* sobre *Google Colaboratory,* entorno de ejecución en la nube que proporciono un procesador Intel Xeon a 2.20 GHz sin aceleración por GPU. Dado que *Mediapipe* requiere versiones específicas de sus dependencias para garantizar compatibilidad, se fijaron las versiones indicadas en la Tabla I antes de ejecutar el *pipeline.*

TABLE I. LIBRERÍAS UTILIZADAS EN LA IMPLEMENTACIÓN

Librería	***Versión***	***Función***
Mediapipe	0.10.14	Extracción de landmarks faciales y de manos
TensorFlow	2.16.1	Backend de inferencia para MediaPipe
protobuf	5.25.9	Serialización de modelos MediaPipe
NumPy	1.26.4	Operaciones matriciales y cálculo numérico
ml-dtypes	0.3.2	Compatibilidad de tipos con TensorFlow
librosa	0.11.0	Procesamiento de señal de audio
OpenCV	4.11.0	Lectura de procesamiento de señal de audio
soundfile	0.13.1	Escritura de archivos de audio
pandas	2.2.2	Estructuración y manejo de datos
spicy	1.16.3	Descomposición SVD para normalización Procrustes
Scikit-learn	1.6.1	Clasificadores, validación cruzada y escalado
Umap-learn	0.5.12	Reducción de dimensionalidad mediante UMAP
matplotlib	3.10.0	Visualización de resultados
seaborn	0.13.2	Visualización de matrices de confusión

B. Dataset

Dado que no se tiene acceso a un corpus público que combine simultáneamente señales acústicas, gestuales y manuales de oradores individuales con etiquetas de liderazgo validadas, se construyó un *dataset* propio a partir de videos de acceso público disponibles en plataformas de difusión en línea. Los videos del perfil líder corresponden a personas que ejercen o han ejercido cargos de dirección, como directores, gerentes o lideres de equipos y organizaciones, mientras que los videos de perfil no líder corresponden a personas sin cargos directivos reconocidos. Para garantizar la calidad del análisis multimodal y la diversidad de la muestra, se aplicaron criterios de inclusión como la visibilidad del rostro y las manos del orador, calidad de audio suficiente para la extracción de características acústicas, presentación en idioma inglés y representación equilibrada de género y diversidad étnica entre los participantes. El *dataset* piloto está compuesto por 60 videos, 30 por clase, con duración de entre 7 y 15 segundos cada uno, grabados en condiciones naturales de conferencia o presentación pública. El conjunto fue dividido en 40 videos para entrenamiento y 20 para prueba, manteniendo la proporción de clases en ambas particiones. Se reconoce que el tamaño del *dataset* y la restricción lingüística constituyen limitaciones del estudio; como trabajo futuro se contempla la expansión del corpus en diversidad de idiomas y contextos culturales para mejorar la capacidad de generalización del modelo.

C. Preprocesamiento

Este se realizó de forma independiente sobre las modalidades acústica y visual de cada video. Para el audio, la señal fue extraída y convertida a formato monocanal con frecuencia de muestreo de 16,000 Hz, utilizando una ventana de análisis de 1,024 muestras y un salto entre ventanas de 256 muestras. Para el video, cada archivo fue leído frame a frame mediante OpenCV, obteniendo la tasa de fotogramas, la resolución y el número total de frames de cada video. Sobre cada frame se inicializaron dos módulos de *MediaPipe*, hands, configurado con un máximo de dos manos, confianza mínima de detección de 0.25 y confianza mínima de seguimiento de 0.35 y *FaceMesh*, configurado para un máximo de un rostro, con confianza mínima de detección y seguimiento de 0.50. Estos umbrales fueron seleccionados para maximizar la tasa de detección en condiciones naturales de grabación, en las que la iluminación y el ángulo de la cámara pueden variar.

D. Extracción de características acústicas

La detección de silencios se realizó aplicando un umbral de −30 dBFS sobre la energía RMS de la señal, etiquetando como silencio únicamente los segmentos con una duración mínima continua de 150 ms. A partir de esta segmentación se construyó la serie binaria S(t), donde S=1 indica silencio y S=0 indica presencia de voz, como se ilustra en la Fig. 1. Para el análisis espectral en los bordes de transición, se extrajo una ventana de ±100 ms alrededor de cada punto de cambio habla-silencio, sobre la cual se calcularon 13 coeficientes MFCC con una ventana FFT de 1,024 muestras.

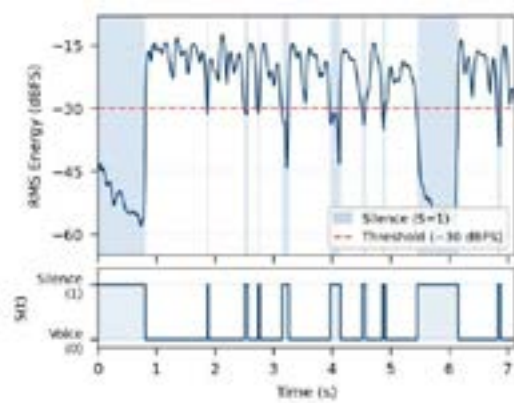


Fig. 1. Extracción de características acústicas sobre un video representativo del *dataset*. El panel superior muestra la energía RMS de la señal de audio en decibelios relativos a escala completa (dBFS); la línea discontinua indica el umbral de −30 dBFS empleado para la clasificación habla-silencio. Las regiones sombreadas corresponden a los segmentos etiquetados como silencio (S=1). El panel inferior muestra la serie binaria S(t) resultante.

E. Extracción de características visuales

La detección de *landmarks* se realizó *frame* a *frame* mediante dos módulos de *MediaPipe* configurados con los parámetros indicados en la Tabla II.

TABLE II. PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE MEDIAPIPE

Módulo	***Parámetro***	***Valor***
Hands	Máximo de manos	2
Hands	Confianza mínima de detección	0.25
Hands	Confianza mínima de seguimiento	0.35
FaceMesh	Máximo de rostros	1
FaceMesh	Confianza mínima de detección	0.50
FaceMesh	Confianza mínima de seguimiento	0.50

La normalización de pose se aplicó mediante análisis de Procrustes usando los *landmarks* 168, 6, 197 y 195 del puente nasal como referencia rígida, establecida a partir del primer *frame* válido de cada video, como se ilustra en la Fig. 2.



Fig. 2. Detección de *landmarks* corporales mediante *MediaPipe*. Los puntos rojos representan los *landmarks* faciales (*FaceMesh*, 468 por *frame*); los puntos naranjas indican los cuatro puntos del puente nasal usados como referencia en la normalización de Procrustes; los puntos verdes corresponden a los *landmarks* de cada mano (21 por mano).

A partir de los *landmarks* normalizados se calcularon las cinco series temporales según las definiciones de la Tabla III.

TABLE III. DEFINICIÓN DE LAS SERIES TEMPORALES

Variable	***Definición***	***landmarks***
Mounth_opening	Distancia euclidiana entre labios	13, 14
eyebrow_height	Promedio coordenada vertical de cejas	Izq: 70, 63, 105 / Der: 300, 293, 334
hand_dist_mouth	Distancia mínima muñeca–centro de labios	Muñeca: 0 / Labios: 13, 14
hand_velocity	Norma del desplazamiento de muñeca entre frames consecutivos dividida por el periodo de muestreo	0
hand_openness	Distancia promedio muñeca–puntas de dedos	4, 8, 12, 16, 20

F. Construcción del vector de representación

La Tabla IV resume la distribución de las 55 características que conforman el vector de representación por individuo. La estandarización se realizó con *StandardScaler* de *scikit-learn* y los valores ausentes se imputaron con las medias calculadas sobre el conjunto de entrenamiento.

TABLE IV. COMPOSICIÓN DEL VECTOR DE REPRESENTACIÓN

Bloque	***Variables***	***Estadísticos***	***Features***
Gestual	5 series temporales	Mean, std, min, max, median	25

Bloque	*Variables*	*Estadísticos*	*Features*
Silencio	4 métricas directas		4
MFCC	13 coeficientes	Mean, std	26
Total			55

G. Reducciónn de dimensionalidad y clasificación

Los hiperparámetros empleados en cada técnica de reducción y clasificación se detallan en la Tabla V. Los clasificadores fueron entrenados con los valores por defecto de scikit-learn salvo los parámetros indicados.

TABLE V. HIPERPARÁMETROS DE REDUCCIÓN Y CLASIFICACIÓN

Componente	*Parámetro*	*Valor*
PCA	Componentes	3
UMAP	n_neighbors	5
UMAP	Min_dist	0.1
UMAP	n_components	3
t-SNE	Perplexity	5
t-SNE	n_iter	1,000
t-SNE	n_components	3
SVM	kernel	RBF
Árbol de decisión	max_depth	3
Validación cruzada	n_splits	5

V. RESULTADOS

A. Reducción de dimensionalidad y clasificación UMAP

La proyección UMAP del conjunto de entrenamiento genera un espacio tridimensional cuya representación bidimensional, proyectada sobre los dos primeros componentes, se muestra en la Fig. 3.

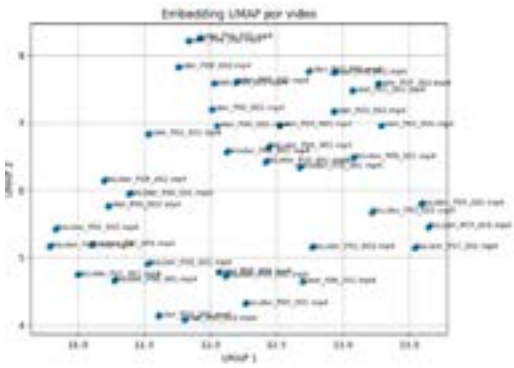


Fig. 3. Mapa UMAP del conjunto de entrenamiento. Cada punto representa un video; su posición refleja la similitud del perfil comunicativo con el resto de los individuos.

La Fig. 3 presenta la proyección bidimensional del espacio UMAP sobre los componentes 1 y 2. Se identifica una tendencia de separación entre perfiles, los videos etiquetados como líderes se concentran en la zona superior del mapa (UMAP 2 > 6.5), mientras que los no líderes se distribuyen predominantemente en la zona inferior (UMAP 2 < 5.5). Entre ambas regiones existe una zona de solapamiento aproximadamente entre 5.5 y 6.5 en el eje UMAP 2, donde ambos perfiles coexisten. Este solapamiento es consistente con la naturaleza continua de la comunicación no verbal, cuyos patrones no establecen fronteras discretas entre perfiles de liderazgo.

La Tabla VI resume los resultados de entrenamiento con validación cruzada estratificada. El árbol de decisión alcanza la mayor exactitud con un 87.50% y un F1-score de 0.87, lo que refleja su capacidad para trazar fronteras de decisión complejas sobre el espacio UMAP. El SVM con *kernel* RBF obtiene un 75.00% con métricas uniformes entre precisión, sensibilidad y F1-score, indicando que clasifica ambos perfiles con igual efectividad sin favorecer ninguna clase. La regresión logística registra el menor rendimiento con un 67.50%, resultado previsible dado que su frontera lineal no logra capturar adecuadamente la estructura del espacio. En los tres modelos la precisión y la sensibilidad son equivalentes, lo que indica que los errores de clasificación se distribuyen de forma equilibrada entre líderes y no líderes, sin sesgo sistemático hacia ningún perfil.

TABLE VI. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN UMAP (ENTRENAMIENTO)

Clasificador	*Exactitud*	*Precisión*	*Sensibilidad*	*F1-score*
Regresión Logística	67.50%	0.68	0.68	0.67
SVM (RBF)	75.00%	0.75	0.75	0.75
Árbol de Decisión	87.50%	0.88	0.88	0.87

La Fig. 4 ilustra las fronteras de decisión de cada clasificador sobre el espacio UMAP. En la regresión logística la frontera es aproximadamente horizontal, dividiendo el espacio en dos regiones paralelas al eje UMAP 1, lo que limita su capacidad de separación a una división simple que no aprovecha la estructura bidimensional del mapa. El SVM con kernel RBF genera una frontera más curva que se adapta mejor a la distribución de los puntos, capturando parcialmente la región de solapamiento entre perfiles. El árbol de decisión produce las regiones más definidas de los tres modelos, delimitando con mayor precisión las zonas donde predominan los videos etiquetados como líderes (región roja, zona superior) y no líderes (región azul, zona inferior). En los tres casos los errores de clasificación se concentran en la región de solapamiento central, donde ambos perfiles comparten características comunicativas similares.

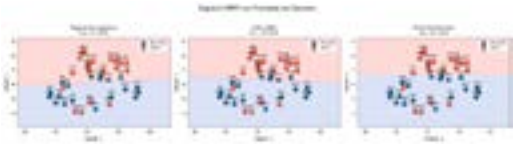


Fig. 4. Fronteras de decisión de los tres clasificadores sobre el espacio UMAP. Las regiones coloreadas indican qué zona del mapa cada modelo asocia con el perfil Líder (rojo) o No Líder (azul). Los valores de exactitud corresponden al entrenamiento con validación cruzada.

La Tabla VII presenta los resultados obtenidos sobre el conjunto de prueba. El árbol de decisión mantiene el mayor rendimiento con una exactitud del 85.00% y un F1-score de 0.85, clasificando correctamente 17 de los 20 casos evaluados. El SVM conserva un rendimiento estable del 75.00%, consistente con lo observado durante el entrenamiento. La regresión logística registra un incremento respecto al entrenamiento, pasando de 67.50% a 80.00% con un F1-score de 0.80. El sistema de voto por mayoría alcanza un 80.00%, acertando en 16 de los 20 videos. Como se aprecia en la Fig. 5, los videos de prueba, representados como rombos amarillos, se ubican sobre el espacio aprendido durante el entrenamiento aquellos correctamente clasificados se posicionan en zonas de alta densidad de su perfil correspondiente, mientras que los errores se concentran en la región de solapamiento central donde ambos perfiles comparten características comunicativas similares.

TABLE VII. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN UMAP (PRUEBA)

Clasificador	*Entrenamiento*	*Prueba*	*Precisión*	*F1*
Regresión logística	67.50%	80.00%	0.80	0.80
SVM (RBF)	75.00%	75.00%	0.75	0.75
Árbol de Decisión	87.50%	85.00%	0.85	0.85
Voto por mayoría	-	80.00%	-	-

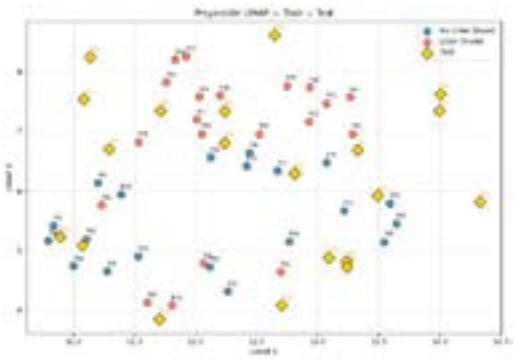


Fig. 5. Proyección conjunta de entrenamiento y prueba en el espacio UMAP. Los puntos de prueba (rombos amarillos) se ubican en el mapa aprendido; su posición respecto a cada grupo refleja la confianza del sistema en su clasificación.

En conjunto, los resultados obtenidos con UMAP sugieren que las señales no verbales extraídas del audio y video contienen información suficiente para diferenciar parcialmente perfiles de liderazgo de forma automática. La separabilidad observada en el espacio UMAP, con un rendimiento máximo del 85.00% mediante el árbol de decisión, indica que la comunicación no verbal presenta patrones consistentes y medibles asociados al liderazgo. No obstante, la existencia de errores borderline y de alta confianza refleja que estos patrones no son universales, la expresividad gestual y la contención comunicativa pueden manifestarse de forma cruzada entre perfiles, lo que establece un límite natural para cualquier sistema de clasificación basado exclusivamente en señales no verbales observables.

B. Reduccion de dimensionalidad y clasificación PCA

El Análisis de Componentes Principales proyecta los datos buscando las direcciones de mayor variación lineal en el espacio de características. La representación bidimensional sobre los dos primeros componentes principales se muestra en la Fig. 6.

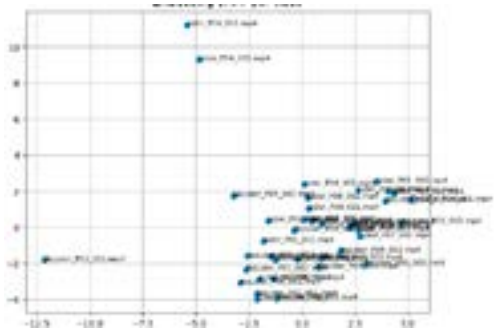


Fig. 6. Mapa PCA del conjunto de entrenamiento. Cada punto representa un video; su posición refleja la similitud del perfil comunicativo con el resto de los individuos.

La Fig. 6 muestra la distribución de los videos en el espacio PCA. Los perfiles no presentan una tendencia de agrupamiento espacial clara, la mayoría de los puntos se concentra en una región densa central donde líderes y no líderes coexisten, con dos casos aislados que actúan como valores atípicos: Lider_P04 en la zona superior izquierda y NoLider_P02 en el extremo izquierdo. Esta distribución refleja que la proyección lineal del PCA captura la dirección de mayor variación en los datos, pero esta variación no corresponde necesariamente a las diferencias entre perfiles de liderazgo.

TABLE VIII. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN PCA (ENTRENAMIENTO)

Clasificador	*Exactitud*	*Precisión*	*Sensibilidad*	*F1-score*
Regresión Logística	72.50%	0.73	0.72	0.72
SVM (RBF)	77.50%	0.78	0.78	0.77
Árbol de Decisión	52.50%	0.53	0.53	0.51

La Tabla VIII presenta los resultados de entrenamiento con validación cruzada estratificada. El SVM con kernel RBF alcanza la mayor exactitud con un 77.50%, aunque sus resultados varían considerablemente entre particiones (±14.58%), lo que refleja cierta inestabilidad en su capacidad de aprendizaje sobre este espacio. La regresión logística obtiene un 72.50% con un comportamiento más consistente entre folds (±9.35%), consolidándose como el clasificador más estable en entrenamiento. El árbol de decisión registra el menor rendimiento con un 52.50%, con resultados que oscilan entre 37.50% y 62.50% según la partición, lo que indica que no logra identificar reglas de clasificación consistentes en este espacio. Este comportamiento es coherente con la alta densidad de solapamiento observada en la Fig. 6, donde los perfiles no presentan fronteras espaciales claras.

La Fig. 7 ilustra las fronteras de decisión de cada clasificador sobre el espacio PCA. La regresión logística traza una frontera diagonal que divide el espacio en dos regiones amplias, aprovechando la dirección de mayor variación lineal para separar los perfiles. El SVM con kernel RBF genera una frontera más curva que se adapta mejor a la distribución de los puntos, lo que explica su mayor exactitud en entrenamiento. El árbol de decisión produce una partición marcadamente asimétrica, asignando casi la totalidad del espacio al perfil líder con una pequeña región no líder en la esquina inferior derecha, comportamiento consistente con su bajo rendimiento en entrenamiento y que refleja la dificultad del modelo para encontrar reglas de separación útiles en un espacio con alto grado de solapamiento.



Fig. 7. Fronteras de decisión de los tres clasificadores sobre el espacio PCA bidimensional. Los valores de exactitud corresponden a la validación cruzada estratificada sobre el conjunto de entrenamiento.

La Tabla IX presenta los resultados obtenidos sobre el conjunto de prueba. La regresión logística mantiene el rendimiento más estable con una exactitud del 70.00% y un F1-score de 0.70, registrando la menor caída respecto al entrenamiento con solo 2.50 puntos porcentuales de diferencia. El SVM experimenta la caída más pronunciada, pasando de 77.50% en entrenamiento a 65.00% en prueba, resultado coherente con la alta varianza observada durante el entrenamiento (±14.58%) que anticipaba dificultades de generalización. El árbol de decisión, por su parte, registra un incremento de 52.50% en entrenamiento a 65.00% en prueba logra capturar algunos patrones generalizables sobre datos nuevos. El sistema de voto por mayoría alcanza un 65.00%, clasificando correctamente 13 de los 20 videos evaluados.

TABLE IX. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN PCA

Clasificador	*Exactitud*	*Precisión*	*Sensibilidad*	*F1*
Regresión Logística	70.00%	0.71	0.70	0.70
SVM (RBF)	65.00%	0.66	0.65	0.64
Árbol de Decisión	65.00%	0.65	0.65	0.65
Voto por mayoría	-	65	-	-

La Fig. 8 muestra la proyección conjunta del conjunto de entrenamiento y prueba en el espacio PCA, donde los rombos amarillos representan los videos de prueba ubicados sobre el espacio aprendido. El caso atípico ubicado en la esquina superior derecha corresponde a un video de prueba con valores inusualmente altos en el Componente 2, cuyo comportamiento se analiza en la siguiente sección.

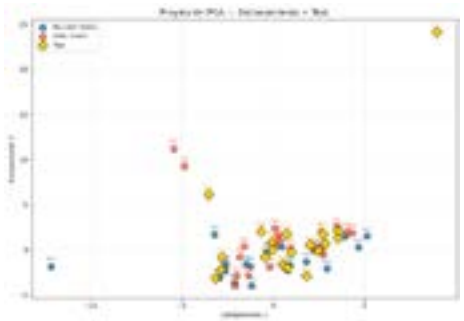


Fig. 8. Proyección PCA conjunta del entrenamiento y la prueba. Los puntos de prueba (rombos amarillos) se ubican sobre el espacio aprendido.

El sistema de voto por mayoría registró siete errores sobre los 20 videos de prueba, revelando un patrón asimétrico donde cinco líderes fueron clasificados como no líderes y dos no líderes fueron clasificados como líderes. Esta asimetría sugiere que el espacio PCA captura con mayor facilidad las características comunicativas de los no líderes que las de los líderes, posiblemente porque la proyección lineal preserva las direcciones de mayor varianza global pero no necesariamente las más discriminativas entre perfiles. Como se aprecia en la Fig. 8, la mayoría de los errores se concentran en la región central de alta densidad, donde ambos perfiles comparten el mismo espacio proyectado, dificultando la separación por parte de los tres clasificadores.

VI. Conclusiones y Trabajo a Futuro

Los resultados obtenidos evidencian que el pipeline propuesto constituye un punto de partida promisorio para la identificación automática de perfiles de liderazgo, aunque su alcance actual está condicionado por el tamaño reducido del dataset, la restricción lingüística a videos en inglés y la duración limitada de los clips analizados. Estas condiciones establecen el marco para las líneas de trabajo futuro que se describen a continuación.

Como principal línea de trabajo futuro se contempla la ampliación del corpus de videos incorporando mayor diversidad lingüística, cultural y contextual, con el objetivo de mejorar la capacidad de generalización del sistema. Paralelamente, se proyecta la implementación de un modelo de clasificación de extremo a extremo que integre directamente las señales de audio y video sin necesidad de extracción manual de características, explorando arquitecturas basadas en redes neuronales recurrentes o Transformers multimodales que han demostrado resultados superiores en tareas similares de análisis del comportamiento. Adicionalmente, se contempla extender la duración de los videos analizados y diversificar los contextos de grabación más allá de presentaciones públicas, incluyendo entornos de entrevista y reuniones de trabajo.

Desde una perspectiva práctica, el sistema en su estado actual puede ser utilizado por las organizaciones como una herramienta complementaria a los métodos tradicionales de selección, aportando una dimensión objetiva y cuantificable al análisis de candidatos. Se recomienda su uso en conjunto con entrevistas estructuradas y evaluaciones psicométricas, reconociendo que la comunicación no verbal captura aspectos relevantes del liderazgo, pero no sustituye una evaluación integral del candidato.

REFERENCIAS

[1] Gallup, "State of the global workplace 2023 report," Gallup Press, 2023. [Online]. Available: https://www.gallup.com/workplace/349484/state-of-the-global-workplace.aspx

[2] DDI – Development Dimensions International, "Global leadership forecast 2023," DDI World, 2023. [Online]. Available: https://www.ddiworld.com/global-leadership-forecast

[3] V. S. Schröder, A. L. Heimann, P. V. Ingold, and M. Kleinmann, "Enhancing personality assessment in the selection context," *Front. ("Evaluating Construct Convergence: A Canonical Correlation Analysis of ...") Psychol.*, vol. 12, p. 643690, 2021, doi: 10.3389/fpsyg.2021.643690.

[4] E. Rodero, O. Larrea, M. Vázquez, and L. Mas, "Effectiveness, attractiveness, and emotional response to voice pitch and hand gestures in public speaking," *Front. Commun.*, vol. 7, p. 869084, 2022, doi: 10.3389/fcomm.2022.869084.

[5] C. F. Keating et al., "Charismatic nonverbal displays by leaders signal receptivity and formidability, and tap approach and avoidance motivational systems," *Front. Psychol.*, vol. 11, p. 526288, 2020, doi: 10.3389/fpsyg.2020.526288.

[6] S. Major and A. Tomasevic, "The face of populism: Examining differences in facial emotional expressions of political leaders using machine learning," 2024, arXiv:2304.09914. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2304.09914

[7] M. ter Bekke, L. Drijvers, and J. Holler, "Co-speech hand gestures are used to predict upcoming meaning," *Psychol. Sci.*, 2025, doi: 10.1177/09567976251331041.

[8] C. Beyan, F. Capozzi, C. Becchio, and V. Murino, "Prediction of the leadership style of an emergent leader using audio and visual nonverbal features," *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 20, no. 2, pp. 441–456, 2017, doi: 10.1109/TMM.2017.2740062.

[9] P. Ekman and W. V. Friesen, "The repertoire of nonverbal behavior: Categories, origins, usage, and coding," *Semiotica*, vol. 1, no. 1, pp. 49–98, 1969, doi: 10.1515/semi.1969.1.1.49.

[10] J. E. Bono and R. Ilies, "Charisma, positive emotions and mood contagion," *Leadersh. ("Article citations - Scientific Research Publishing") Q.*, vol. 17, no. 4, pp. 317–334, 2006, doi: 10.1016/j.leaqua.2006.04.009.

[11] L. J. MacGregor, M. Corley, and D. I. Donaldson, "Listening to the sound of silence: Disfluent silent pauses in speech have consequences for listeners," *Neuropsychologia*, vol. 48, no. 14, pp. 3982–3992, 2010, doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2010.09.024.

[12] P. Ekman, "An argument for basic emotions," *Cogn. Emot.*, vol. 6, no. 3–4, pp. 169–200, 1992, doi: 10.1080/02699939208411068.

[13] N. Lehmann-Willenbrock and H. Hung, "A multimodal social signal processing approach to team interactions," *Organ. Res. Methods*, 2024, doi: 10.1177/10944281231202741.

[14] C. Beyan, F. Capozzi, C. Becchio, and V. Murino, "Multi-task learning of social psychology assessments and nonverbal features for automatic leadership identification," in *Proc. 19th ACM Int. Conf. Multimodal Interact.*, Glasgow, UK, 2017, pp. 451–455, doi: 10.1145/3136755.3136757.

[15] C. Lugaresi et al., "MediaPipe: A framework for building perception pipelines," 2019, arXiv:1906.08172. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1906.08172

[16] M. Drazic and P. Perrault, "Limitations of (Procrustes) alignment in assessing multi-person human pose and shape estimation," 2024, arXiv:2409.16861. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2409.16861

[17] K. Venkataramanan and H. R. Rajamohan, "Emotion recognition from speech," 2019, arXiv:1912.10458. ("SPEECH EMOTION RECOGNITION SURVEY – JOURNAL OF MECHANICS OF CONTINUA ...") [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1912.10458

[18] G. L. Cascio Rizzo, J. Berger, and M. Zhou, "Talking with your hands: How hand gestures influence communication," *J. Mark. Res.*, 2025, doi: 10.1177/00222437251385922.

[19] T. Grebelsky-Lichtman and R. Katz, "Gender effect on political leaders' nonverbal communicative structure during the COVID-19 crisis," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 21, p. 7789, 2020, doi: 10.3390/ijerph17217789.

[20] P. A. Andersen, *Nonverbal Communication: Forms and Functions*. Mountain View, CA: Mayfield, 1999.

[21] L. McInnes, J. Healy, and J. Melville, "UMAP: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction," 2018, arXiv:1802.03426. ("UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension ...") [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1802.03426

WEEF 2026
(IFEES & GEDC)

Engineering Education That Transforms

September 22 – 25, 2026
Cartagena de Indias, Colombia



RESEARCH ADVANCES

ENERGY

Powered by

Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI

Programa computacional interactivo para evaluar la viabilidad técnica y económica de la integración de energía solar fotovoltaica en instalaciones del sector Oil & Gas en el Perú

Cesar Tenorio Huaman
Escuela de Ingeniería Química
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Lima, Perú
cesararteh@gmail.com

Ximena Zambrano Salas
Escuela de Ingeniería Química
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Lima, Perú
ximena.zambrano@unmsm.edu.pe

Eder Vicuña Galindo
Escuela de Ingeniería Química
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Lima, Perú
evicunag@unmsm.edu.pe

***Abstract*— Las refinerías presentan una elevada demanda eléctrica debido a la intensidad energética de sus procesos operativos, lo que incrementa tanto sus costos de operación como su dependencia de fuentes convencionales de energía. En este contexto, la integración de sistemas fotovoltaicos surge como una alternativa para complementar el suministro eléctrico y mejorar la eficiencia energética en instalaciones del sector Oil & Gas. Con la finalidad de evaluar la viabilidad técnica y económica de la integración fotovoltaica en refinerías, se desarrolló un programa computacional interactivo implementado en Python. El modelo incorpora variables operativas, económicas y climáticas, considerando datos históricos de consumo eléctrico, costos tarifarios e irradiancia solar. Asimismo, se implementó una simulación Monte Carlo para analizar la variabilidad del recurso solar y su impacto en los indicadores financieros. Como caso de estudio, se obtuvo una potencia instalada de 203.5 kWp y una generación anual estimada de 290.6 MWh. Los resultados mostraron un VAN de $200 756, una TIR de 28.53% y un periodo de recuperación descontado de 4 años, evidenciando la viabilidad económica del sistema fotovoltaico evaluado.**

Keywords*— *programas computacionales, integración energética, energía fotovoltaica.

I. Introducción

En el contexto del cambio climático y la transición energética, el sector energético global enfrenta el desafío de reducir emisiones de gases de efecto invernadero sin comprometer la seguridad del suministro. En este escenario, la industria de Oil and Gas mantiene un papel central debido a su peso en la matriz energética y su contribución a las emisiones asociadas al uso de combustibles fósiles [1], lo que la posiciona como un actor clave en la transición hacia sistemas más sostenibles.

Más que sectores opuestos, Oil and Gas y las energías renovables deben concebirse como componentes complementarios de un proceso de transición progresiva. Diversos estudios muestran que las empresas del sector cuentan con capacidades técnicas y financieras para diversificar hacia energías renovables, reconociendo en ello una oportunidad estratégica [1], [2], [3].

Aunque persiste la percepción de limitada viabilidad económica de las energías renovables en entornos industriales intensivos, evidencia reciente indica que su integración puede reducir costos energéticos y mejorar la eficiencia operativa [4], [6]. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos asociados a la variabilidad de los recursos, la complejidad de los sistemas existentes y la toma de decisiones bajo condiciones dinámicas. En este sentido, herramientas computacionales basadas en análisis de datos y aprendizaje automático resultan fundamentales para modelar y optimizar sistemas energéticos híbridos [5].

En el caso del Perú, el potencial de la energía solar fotovoltaica es significativo debido a sus condiciones geográficas y climáticas, con desempeños favorables reportados en diversas regiones [7]. No obstante, la variabilidad espacial y temporal de la radiación solar exige evaluaciones específicas para cada contexto operativo.

Si bien estudios previos han demostrado la viabilidad técnica de integrar sistemas fotovoltaicos en instalaciones del sector Oil and Gas, como en el caso de las refinerías Al-Qayarah y Baiji en Iraq, donde se reportaron elevados niveles de desempeño energético y reducciones significativas de emisiones de CO_2 mediante simulaciones con PVsyst [8], dichos enfoques se han centrado principalmente en la caracterización técnica y el potencial energético de los sistemas fotovoltaicos. En particular, existe una limitada integración de criterios orientados a la toma de decisiones de inversión, tales como análisis de rentabilidad, evaluación económica bajo distintos escenarios operativos y restricciones asociadas al área efectiva de implementación. En consecuencia, persiste la necesidad de herramientas que permitan evaluar de manera conjunta variables técnicas, operativas y económicas en contextos industriales reales.

En este marco, el presente trabajo propone el desarrollo de un programa computacional interactivo para evaluar la

viabilidad técnica y económica de la integración de energías renovables en instalaciones del sector Oil and Gas. La herramienta modela el balance entre generación renovable y consumo eléctrico convencional, incorporando variables operativas, económicas y climáticas, con el objetivo de apoyar la toma de decisiones en esquemas híbridos de suministro energético.

II. Metodología

A. Implementación computacional

Se desarrolló un programa computacional interactivo implementado en Python para modelar la viabilidad económica de la integración de energía fotovoltaica (FV) en refinerías de petróleo. El modelo integra variables operativas, económicas y climáticas, y permite el ingreso de datos de forma manual (valores promedio) o mediante la carga de series históricas mensuales. Cada etapa es modular e independiente, lo que permite actualizar o sustituir cualquier componente sin afectar el resto del modelo. El carácter interactivo del programa facilita su uso en estudios de prefactibilidad donde los parámetros de entrada varían según el proyecto específico (Fig. 1).



Fig. 1. Estructura conceptual de etapas del programa interactivo

B. Ingreso y tratamiento inicial de datos

El programa recibe tres fuentes de información de entrada: el consumo eléctrico anual de la refinería (CAE), el costo eléctrico anual (CEA) y la irradiancia solar horizontal global (GHI). Cada fuente puede ingresarse manualmente como un valor promedio o cargarse como una serie histórica mensual en formato Excel.

1) Consumo eléctrico anual (CAE)

La serie histórica de consumo eléctrico mensual contiene registros de potencia contratada (kW) y energía activa (MWh) por período. A partir de estos datos, el modelo calcula el consumo anual base (CAE_{base}) como el promedio histórico de los totales anuales, y determina el perfil mensual de distribución del consumo expresado como fracción del total anual (1):

$$E_{mes(i,m)} = CAE_{base} \times (1+\tau)^{i} \times f_E(m) \quad (1)$$

donde i es el año del proyecto, m el mes (1–12), τ la tasa de crecimiento anual del consumo y $f_E(m)$ la fracción histórica promedio del mes m sobre el total anual.

2) Costo eléctrico anual (CEA)

Las tarifas eléctricas (en soles) se organizan en cuatro componentes regulados por el mercado eléctrico peruano: cargo por energía activa en horas de punta (A, S/./kWh), cargo por energía activa fuera de punta (B, S/./kWh), cargo por potencia presente en punta (C, S/./kW-mes) y cargo por potencia presente fuera de punta (D, S/./kW-mes). A partir de la serie histórica mensual de cada tarifa, se ajusta una regresión lineal independiente (2):

$$X_{(t)} = m_X t + b_X \ , X \in \{A, B, C, D\} \quad (2)$$

donde t es el año calendario. Esta parametrización permite proyectar la evolución tarifaria de forma individual, capturando las distintas tendencias de cada componente. El CEA mensual (3) proyectado para el año i y mes m se calcula como:

$$CEA(i,m) = \frac{[A_{(t)}E_p + B_{(t)}E_{fp} + C_{(t)}P_m + D_{(t)}P_m]}{TC} \quad (3)$$

donde E_p y E_{fp} son las fracciones de energía en horas de punta y fuera de punta respectivamente (asumidas 50/50 en ausencia de datos horarios), P_m es la potencia mensual media y TC el tipo de cambio (S/./USD).

3) Irradiancia solar (GHI)

A partir de la serie diaria se calcula el GHI acumulado anual como la suma de los valores diarios del año, obteniendo un valor en kWh/m²/año. Este agregado es el parámetro físicamente correcto para el cálculo de energía generada, en contraste con el promedio diario que suele reportarse en estudios climatológicos. Dado que la regresión lineal sobre la serie histórica no mostró tendencia significativa ($R^2 < 0.10$), se adoptó el promedio histórico anual como valor base del modelo, cuya robustez se valida mediante simulación de Monte Carlo según se describe en la sección 2.5.3.

C. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

El dimensionamiento del sistema se realiza a partir del área disponible en la refinería, el factor de ocupación efectiva del área y las especificaciones técnicas del panel solar seleccionado. El número de paneles instalables (4) se calcula como:

$$N_p = \frac{A_{util}}{A_{panel}} \quad (4)$$

Donde $A_{(util)} = A_{disp} \times f_{disp}$ es el área útil efectiva y A_{panel} es el área unitaria del módulo. La potencia instalada (5) se expresa en kilovatios pico, utilizando la potencia del panel solar elegido (W_p):

$$P_{kWp} = \frac{N_p \times W_p}{1000} \quad (5)$$

La energía eléctrica generada anualmente (6) por el sistema se calcula siguiendo la metodología estándar IEC 61724 [9]:

$$E_{solar} = \frac{P_{kWp} \times GHI \times PR}{1000} \ , \left[\frac{MWh}{año}\right] \quad (6)$$

donde PR es el Performance Ratio, también llamado factor adimensional de desempeño del sistema, que captura todas las pérdidas reales de operación en campo: pérdidas por temperatura, conversión DC/AC en el inversor, resistencias en el cableado, sombreado, suciedad y degradación. Para instalaciones industriales en clima costero del Perú, la literatura reporta valores de PR entre 0.75 y 0.82 [7].

La tasa de degradación anual del panel se establece en 0.5%/año como valor de referencia para módulos monocristalinos de alta calidad [10]. El porcentaje de integración fotovoltaica efectivo (7) se define como:

$$n_{integ} = \frac{E_{solar}}{CAE_{base}} \tag{7}$$

D. Estructura de costos de inversión y operación

El costo de inversión inicial (CAPEX) se estima mediante el enfoque de factores porcentuales sobre el equipo principal, siguiendo el método de Lang descrito en Peters y Timmerhaus [11] para la estimación de costos de capital en proyectos de ingeniería de procesos. Los módulos FV constituyen el PEC base del cálculo, y cada componente adicional del sistema se expresa como porcentaje de su costo.

El CAPEX se desagrega en dos categorías siguiendo la estructura de NREL (National Renewable Energy Laboratory): costos de instalación física (Hard Costs), que comprenden módulos, inversores, estructura y montaje, sistema eléctrico e instalación y mano de obra; y costos administrativos y de gestión (Soft Costs), que incluyen ingeniería, diseño, permisos, gestión de proyecto y contingencias. Los imprevistos se calculan sobre el subtotal de Hard Costs. [12]

Por otro lado, el costo anual de operación y mantenimiento (OPEX) (8) representa los gastos recurrentes necesarios para mantener el sistema FV en condiciones operativas óptimas durante el horizonte de evaluación. A diferencia del CAPEX, el OPEX no se desagrega por componente individual dado que en la práctica industrial se contrata como un servicio integral de operación y mantenimiento bajo un único contrato anual que cubre limpieza, inspección, reposición de componentes menores, gestión del activo y seguro del sistema [12]. Se expresa como un valor unitario anual en USD/kWp/año y se obtiene multiplicando el valor unitario por la potencia instalada del sistema:

$$OPEX = opex_{unitario} \times P_{kWp} \tag{8}$$

Este valor se indexa a una tasa de inflación del 2% anual para reflejar el encarecimiento real de los servicios de mantenimiento a lo largo del horizonte de evaluación.

Finalmente, cada acepción es considerada bajo cálculos en Estados Unido; sin embargo, se tiene que trasladar el valor del costo total de inversión a Perú donde yace el proyecto utilizando un factor de localización para el contexto peruano para el CAPEX y para el OPEX, con f_{loc} = 0.792 y f_{loc} = 0.784 [13].

E. Evaluación económica

1) Flujo de caja mensual proyectado

El flujo de caja se construye a granularidad mensual para los n años del horizonte de evaluación, resultando en n × 12 períodos de cálculo. Esta granularidad captura la estacionalidad real tanto del consumo eléctrico como de la irradiancia solar, a diferencia de un modelo anual que asumiría distribución uniforme a lo largo del año.

El ahorro mensual generado por el sistema FV (9) se obtiene como la fracción del CEA que se evita gracias a la generación solar, corregida por la degradación acumulada del panel:

$$Ahorro_{(i,m)} = \mathrm{CEA}_{(i,m)} \times n_{integ} \times (1-d)^{\frac{i-1+m-1}{12}} \tag{9}$$

donde d es la tasa de degradación anual del panel y η_{integ} el porcentaje de integración efectivo. El flujo neto mensual (FN) y su valor descontado (FD) se calculan como:

$$FN_{(i,m)} = Ahorro_{(i,m)} - \frac{OPEX_i}{12} \tag{10}$$

$$FD_{(i,m)} = \frac{FN_{(i,m)}}{(1+TMAR_{mensual})^{t_{total}}} \tag{11}$$

Donde $t_{total} = (i-1) \times 12 + m$ es el número de mes absoluto desde el inicio del proyecto y TMARmensual = $(1 + \mathrm{TMAR})^{1/12} - 1$ es la tasa mensual equivalente a la TMAR anual, que a su vez representa la tasa mínima atractiva de retorno. Los flujos mensuales se agregan anualmente para el cálculo de los indicadores económicos.

2) Indicadores económicos

A partir de los flujos de caja anuales agregados se calculan los indicadores económicos estándar de evaluación de proyectos: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Retorno sobre la Inversión (ROI) y Payback — simple y descontado — equivalente al punto de equilibrio económico del proyecto. La TIR se determina numéricamente mediante el método de Brent [14], que garantiza convergencia global sin requerir estimación inicial. El Payback se obtiene por interpolación lineal del flujo acumulado, expresando el punto de equilibrio como fracción de año para mayor precisión.

3) Análisis estadístico de la irradiancia

Con el objetivo de incorporar la variabilidad interanual de la irradiancia en la evaluación económica, se implementa una simulación de Monte Carlo para validar la robustez del promedio histórico como estimador base del modelo. El método consiste en iteraciones en las que la irradiancia de cada año del horizonte de evaluación se muestrea con reemplazo de la distribución empírica histórica de 21 años de datos.

La simulación de Monte Carlo es reconocida en la literatura de gestión de riesgos como una herramienta que supera las limitaciones de los estimadores de punto al proporcionar la distribución completa de los posibles resultados económicos, permitiendo una toma de decisiones más informada bajo incertidumbre en proyectos de inversión [15]. El resultado es la distribución completa del VAN del proyecto, de la cual se extraen tres estadísticos clave: el percentil P5, que representa el escenario conservador superado por el 95% de las simulaciones; el P50 o mediana, que corresponde al escenario central de la

distribución; y el P95, que representa el escenario optimista superado únicamente por el 5% de las simulaciones. La amplitud del rango P5-P95 cuantifica la sensibilidad del VAN ante la variabilidad climática del sitio, mientras que la probabilidad P(VAN > 0) constituye la métrica principal de viabilidad económica con respaldo estadístico.

4) Escenarios de evaluación

El análisis comparativo evalúa tres escenarios de decisión para la dirección de la refinería, que responden a preguntas de negocio concretas: el costo de no actuar, la viabilidad con los recursos disponibles y la inversión óptima desde el punto de vista del retorno.

Caso de no integración — Sin integración solar (línea base): constituye el escenario de referencia. Se proyecta el CEA durante el horizonte de evaluación sin ninguna intervención solar. El costo total de no actuar se expresa en valor presente neto como la suma del CEA descontado a lo largo de los n años.

Caso usuario — Integración con área disponible real: corresponde al escenario definido por los parámetros reales de la refinería ingresados por el usuario — área disponible, características del panel, porcentaje de integración deseado. Representa la máxima integración técnicamente alcanzable con la infraestructura existente y es el escenario principal de evaluación del proyecto.

Caso óptimo — Mínima inversión con máxima TIR: se determina mediante un barrido sistemático de porcentajes de integración desde 5% hasta 100% en pasos configurables por el usuario. Para cada nivel de integración se calcula el área mínima necesaria, el CAPEX correspondiente y los indicadores económicos VAN, TIR y payback. El criterio de optimalidad adoptado es la maximización de la TIR, que identifica el punto de mayor retorno por unidad de capital invertido — es decir, la escala de sistema donde cada dólar adicional de inversión genera el mayor rendimiento marginal. La diferencia entre el área requerida por el óptimo y el área disponible real indica el margen de expansión del sistema.

III. DATOS Y CASO DE ESTUDIO

El presente estudio aplica la metodología desarrollada a la Refinería La Pampilla (Repsol), ubicada en Ventanilla, Callao, Perú (11.9°S, 77.1°O), con una capacidad de procesamiento de 117,000 barriles/día. Esta refinería fue seleccionada como caso de estudio por disponer de datos históricos de consumo eléctrico y tarifas de acceso público, y por representar una instalación industrial de gran escala dentro del sector Oil & Gas peruano.

A. Consumo eléctrico y tarifas (CAE y CEA)

Los datos de consumo eléctrico mensual — energía activa (MWh) y potencia contratada (kW) — y las tarifas eléctricas reguladas correspondientes a los cargos por energía activa en horas de punta (A), energía activa fuera de punta (B), potencia presente en punta (C) y potencia presente fuera de punta (D), fueron obtenidos mediante requerimiento al Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergmin) [16]. La serie cubre el período 2011–2025 para el consumo y 2005–2025 para las tarifas, con resolución mensual en ambos casos.

B. Irradiancia solar (GHI)

Los datos de irradiancia horizontal global (GHI) se obtuvieron de la base de datos NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (NASA POWER) [17], para las coordenadas del emplazamiento de la refinería La Pampilla en Lima. La serie comprende el período 2005–2025 con resolución diaria, e incluye adicionalmente la temperatura superficial del aire (°C).

C. Características del Panel Fotovoltaico.

Las características técnicas del módulo fotovoltaico utilizado en el presente estudio fueron obtenidas directamente de la ficha técnica oficial del fabricante [18] que se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Características técnicas del panel

Parámetro	Valor
Modelo	VBHN325SJ47
Potencia (Wp)	325
Área unitaria (m^2)	1.675

D. Valores de referencia CAPEX y OPEX

La escala del sistema evaluado (~163 kWp para un área disponible de 1 500 m²) no se encuentra dentro de los rangos de estudio explícitamente cubiertos por los benchmarks[1], más se eligió el benchmark community solar de 3 MW_{dc} por representar el perfil operativo industrial más cercano al presente proyecto. Los factores de costo utilizados para la estimación del CAPEX, expresados como porcentaje del costo de módulos FV, siguiendo la metodología, se presentan en la Tabla 2 [12]:

Tabla 2. Factores porcentuales empleados para la estimación del CAPEX del sistema fotovoltaico

Tipo	Componentes	Factores (%)
Hard Costs (HC)	Módulos FV	100%FV
	Inversores (DC/AC)	14.2%FV
	Estructura y montaje	52.2%FV
	Electricidad	68.8%FV
	Instalación y mano de obra	102.0%FV
Soft Costs (SC)	Ingeniería, diseño y permisos	87.0%FV
	Imprevistos	38.9% HC

Para el OPEX, el valor de referencia adoptado es $16.12/kWp/año, correspondiente al benchmark para sistemas FV de gran escala (utility-scale) PV solo MSP. Este valor fue seleccionado sobre el de solar comunitario ($39.83/kWp/año) porque el primero excluye por construcción los componentes de gestión de suscriptores, arrendamiento de terreno e impuesto predial, inaplicables a una instalación industrial de consumo propio [12].

[1]Benchmark: Parámetro de referencia de nivel de proyecto fotovoltaico.

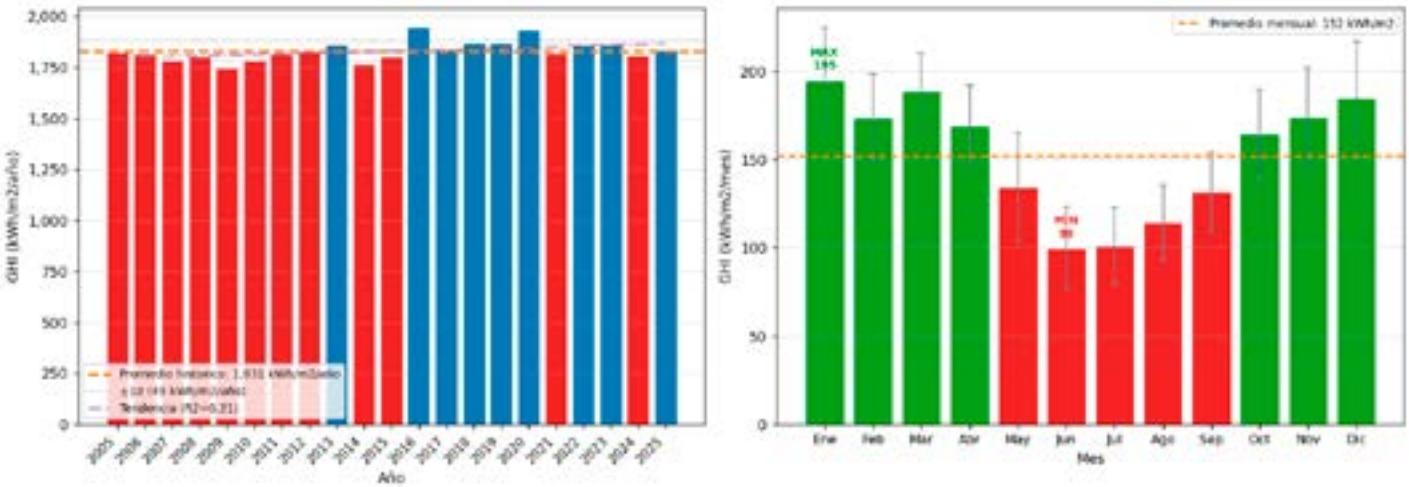


Fig. 2: (a) Acumulado de irradiancia en Lima por año, (b) Promedio acumulado mensual de la irradiancia en Lima

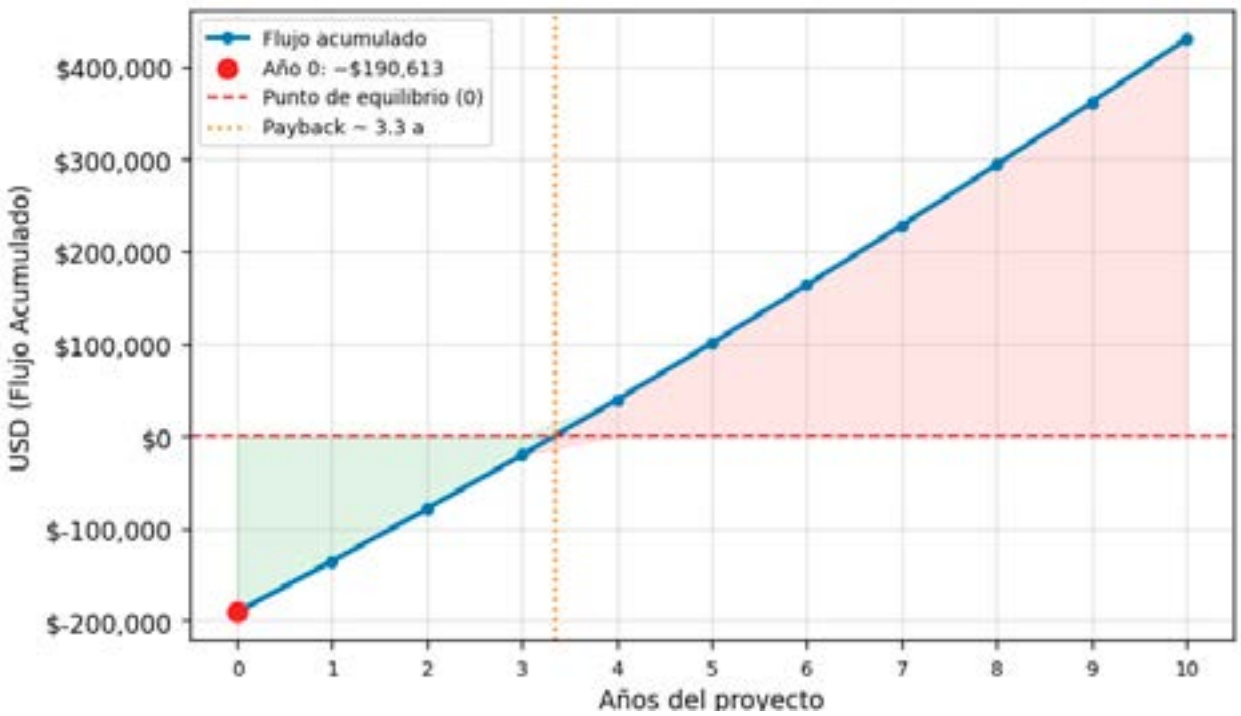


Fig. 3: Punto de equilibrio del proyecto FV por el flujo de caja acumulado para el período de tiempo de 10 años.

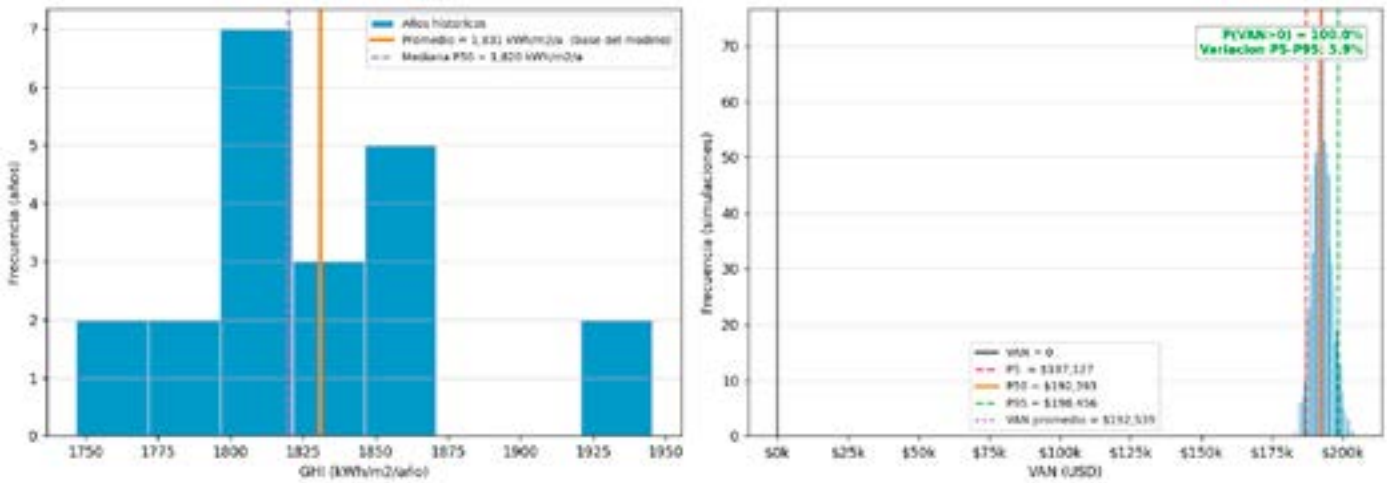


Fig. 4: (a) Resultados de la simulación Monte Carlo sobre los valores de irradiancia anual en Lima para los análisis de P5, P50 y P95. (b) Resultados de la simulación Monte Carlo para distintos escenarios de rentabilidad

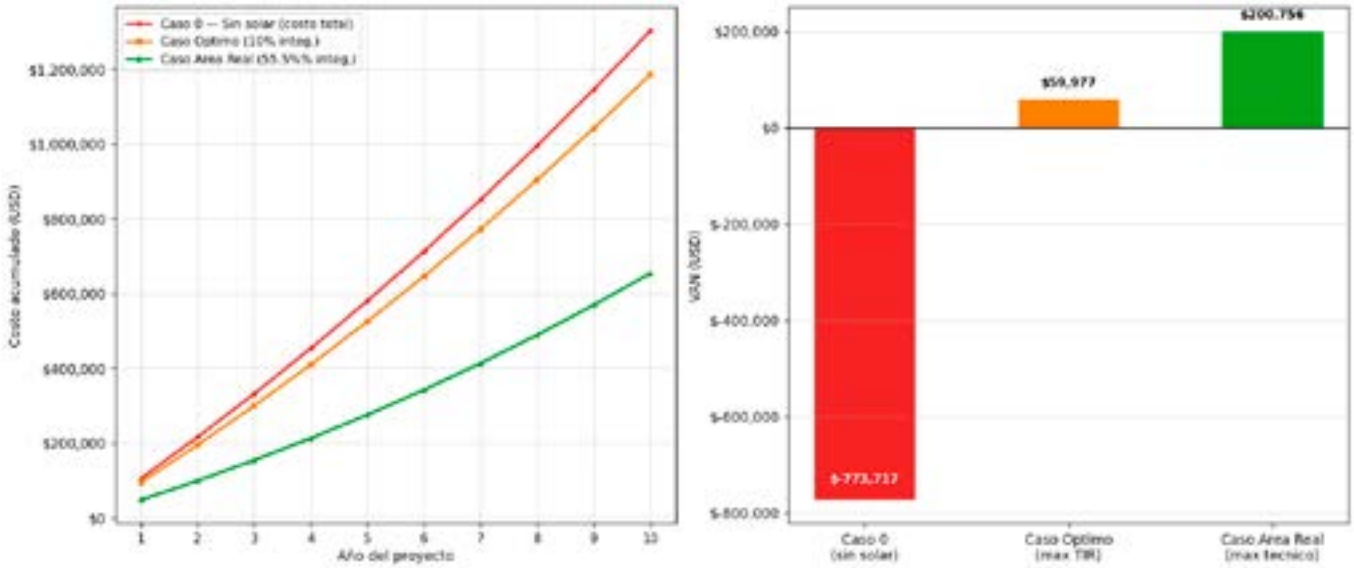


Fig. 5: (a) Evolución del costo acumulado del proyecto bajo distintos escenarios de integración solar; (b) Comparación del Valor Actual Neto (VAN) para los escenarios evaluados de integración solar.

IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A. Cálculo de la irradiancia

Se analizaron datos históricos de irradiancia solar global (GHI) y temperaturas correspondientes al periodo 2005–2025 para evaluar el potencial de generación fotovoltaica en Lima. De acuerdo a la Fig. 2 se verificó que la irradiancia anual presenta una variabilidad relativamente baja alrededor de un promedio histórico de 1 831 kWh/m²·año, evidenciando una disponibilidad solar estable para aplicaciones fotovoltaicas.

A partir de las condiciones de irradiancia evaluadas y considerando un área disponible de 1 500 m² con un factor de ocupación del 70%, el modelo determinó un área útil efectiva de 1 050 m² para la instalación de módulos fotovoltaicos. Empleando paneles de 325 Wp y un factor de desempeño (PR) de 78%, se estimó la instalación de 626 paneles fotovoltaicos, alcanzando una potencia instalada total de 203.5 kWp.

Bajo estas condiciones de operación, el sistema fotovoltaico alcanzó una generación eléctrica estimada de 290.6 MWh durante el primer año de funcionamiento, logrando un porcentaje de integración solar efectiva de 55.51%.

B. Costos de Capital y de Operación

La evaluación económica del sistema fotovoltaico se realizó considerando tanto los costos de inversión inicial (CAPEX) como los costos anuales de operación y mantenimiento (OPEX). Para el escenario evaluado, el costo unitario de los módulos fotovoltaicos fue de $65.25 por panel, mientras que los costos asociados al sistema, incluyendo inversores, estructuras, cableado, protecciones, instalación e

ingeniería, representaron el 69.5% del costo de los módulos. Bajo estas condiciones, el sistema alcanzó un CAPEX total de implementación de $190 613. Asimismo, los costos operativos anuales del sistema se estimaron en $2 571 durante el primer año de operación, equivalentes al 1.35% del CAPEX total.

C. Rentabilidad del proyecto

A partir del flujo de caja proyectado y de los ahorros generados por la sustitución parcial del consumo eléctrico convencional, se calcularon los principales indicadores financieros del proyecto. Los resultados obtenidos muestran un Valor Actual Neto (VAN) de $200,756 USD y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 28.53%, evidenciando una rentabilidad favorable para el escenario analizado con una inversión inicial de $190,613 USD.

De manera complementaria, el sistema presentó un ROI simple de 240.40%, un periodo de recuperación simple de 3.3 años y un payback descontado de 4.0 años, según la Fig. 3, indicando que los beneficios económicos proyectados superan significativamente los costos de implementación del sistema fotovoltaico dentro del horizonte de evaluación de 10 años.

El análisis probabilístico mediante simulación Monte Carlo, basado en el muestreo con reemplazo de los 21 años históricos de irradiancia, muestra en la Fig. 4, una distribución del VAN con baja dispersión — variación P5-P95 del 5.9%, equivalente a un rango de $187,127 (P5) a $198,456 (P95) — y una probabilidad P(VAN > 0) del 100%. El coeficiente de variación interanual de la irradiancia del sitio (CV = 2.6%) confirma la estabilidad del recurso solar, validando que el promedio histórico de 1,831 kWh/m²/año es un estimador robusto y que el proyecto mantiene su viabilidad económica bajo cualquier escenario de irradiancia históricamente plausible.

D. Análisis comparativo de escenarios de integración

El costo acumulado a valor presente de operar sin integración solar asciende a $773 717 en 10 años, estableciendo el umbral de referencia que debe superar cualquier escenario de inversión, según se aprecia en la Fig. 5. Asimismo, la Tabla 3 presenta los indicadores económicos para los tres escenarios evaluados.

Por otro lado, el Caso usuario, con 1 500 m² disponibles y 50% de integración, genera un VAN de $200 756 y recupera la inversión en 3.3 años, confirmando la viabilidad económica bajo las condiciones reales de la refinería. El Caso óptimo, identificado por el barrido sistemático como el punto de máxima TIR (83.15%), requiere únicamente 270 m² con un punto de equilibrio de 1.2 años, siendo el escenario de mayor eficiencia del capital invertido.

La implementación de la optimización muestra que el VAN crece sostenidamente con el nivel de integración mientras que la TIR decrece a altos niveles de esta, evidenciando retornos marginales decrecientes que permiten identificar el punto óptimo donde se maximiza el retorno sin sobredimensionar el sistema.

Tabla 3. Resultados del análisis para cada caso

Parámetros/Casos	Caso de no Integración	Caso Usuario	Caso Óptimo
Área disponible	0	1 500 m²	270 m²
%Integración	0%	50%	10%
VAN	-	$ 200 756	$ 59 977
TIR	-	28.53%	83.15%
Punto de equilibrio	-	1.2 años	3.3 años

V. CONCLUSIONES

El programa desarrollado en Python permitió evaluar de manera integrada la viabilidad técnica y económica de sistemas fotovoltaicos en instalaciones del sector Oil & Gas, demostrando resultados consistentes bajo condiciones operativas reales. El análisis del recurso solar evidenció una baja variabilidad interanual de la irradiancia, lo que permitió estimar un potencial fotovoltaico confiable y reducir la incertidumbre del desempeño energético. Asimismo, el modelo de balance energético y optimización mostró que la integración solar puede cubrir una parte significativa de la demanda eléctrica y mejorar el VAN, identificando niveles óptimos de penetración fotovoltaica. Los análisis probabilísticos mediante simulación Monte Carlo confirmaron la robustez financiera del proyecto, evidenciada por la baja dispersión del VAN y la alta probabilidad de escenarios económicamente favorables. En conjunto, los indicadores económicos obtenidos y periodos de recuperación reducidos confirman que la integración fotovoltaica representa una alternativa viable y competitiva para reducir costos energéticos en instalaciones industriales del sector Oil & Gas en el Perú, validando además el potencial del modelo como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en proyectos de energías renovables.

REFERENCES

[1] J. Hartmann, A. C. Inkpen, and K. Ramaswamy, “Different shades of green: Global oil and gas companies and renewable energy,” Journal of International Business Studies, vol. 51, no. 6, pp. 1050–1074, 2020, doi: 10.1057/s41267-020-00326-w.

[2] C. Kienzler, A. Lichy, H. Tai, and F. van der Marel, “How oil and gas companies can be successful in renewable power,” McKinsey & Company, Feb. 2023.

[3] E. Alagoz and Y. Alghawi, “The energy transition: Navigating the shift towards renewables in the oil and gas industry,” Journal of Energy and Natural Resources, vol. 12, no. 2, pp. 21–24, Jun. 2023, doi: 10.11648/j.jenr.20231202.12.

[4] Y. Choi, C. Lee, and J. Song, “Review of renewable energy technologies utilized in the oil and gas industry,” International Journal of Renewable Energy Research, vol. 7, no. 2, pp. 592–598, 2017.

[5] M. Kiamansouri, “Integration of renewable energy sources in oil and gas operations: A sustainable future,” Eurasian Journal of Chemical, Medicinal and Petroleum Research, vol. 4, no. 1, pp. 63–87, 2025.

[6] M. Absi Halabi, A. Al-Qattan, and A. Al-Otaibi, “Application of solar energy in the oil industry—Current status and future prospects,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 43, pp. 296–314, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2014.11.030.

[7] J. R. Angulo, A. Berastain, L. A. Conde, A. Carhuavilca, V. Pleshcheva, J. Montes-Romero, M. A. García, V. Campos-Falcon, A. Montoya, W. Gosgot, E. Coaquira, P. Puma, E. Alfaro, R. J. Vidal, N. J. Beltran, L. Chirinos, M. Cataño, R. Condori, E. Palo-Tejada, M.

Barrena, C. A. Polo, R. Espinoza, E. Muñoz-Cerón, J. de la Casa, and J. A. Töfflinger, "Yield and performance analysis of PERC, HIT, and CIGS photovoltaic systems in five Peruvian city-climates," Solar Energy, vol. 304, p. 114204, Dec. 2025. doi: 10.1016/j.solener.2025.114204.

[8] Z. G. Younis, S. M. Abdulaziz, and R. M. Fadhil, "Integration of solar cells in selected petroleum refinery units at Al-Qayarah and Baiji refineries," Journal of Petroleum and Mining, vol. 1, no. 2, pp. 115–131, 2025.

[9] International Electrotechnical Commission (IEC). *Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring*. 2nd ed. Geneva (CH): IEC; 2021. 136 p. (IEC 61724-1:2021)

[10] Jordan DC, Kurtz SR. Photovoltaic degradation rates — an analytical review. Prog Photovolt Res Appl. 2013;21(1):12–29

[11] Peters MS, Timmerhaus KD, West RE. Plant design and economics for chemical engineers. 6th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2023.

[12] National Renewable Energy Laboratory (NREL). U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, With Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2023. Golden (CO): NREL; 2023. Report No.: NREL/TP-6A20-87303. Disponible en: https://docs.nrel.gov/docs/fy23osti/87303.pdf

[13] International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable power generation costs in 2023. Abu Dhabi: IRENA; 2024. ISBN: 978-92-9260-621-3.

[14] Virtanen P, Gommers R, Oliphant TE, Haberland M, Reddy T, Cournapeau D, et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. Nat Methods. 2020;17(3):261–72.

[15] Stack-Kołbyk A, Jędras I. Integrated risk assessment in construction contracts: comparative evaluation of risk matrix and Monte Carlo simulation on a high-rise office building project. Appl Sci. 2025;15(17):9371. doi:10.3390/app15179371

[16] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). Informe N.° 0155-2026-GRT-OS/SAIP. Informe obtenido mediante Solicitud de Acceso a la Información Pública (Expediente N.° 202600041844). Lima (PE): OSINERGMIN; 2026.

[17] Stackhouse PW, Whitlock CH, Brown DE, Chandler WS, Hoell JM. Surface meteorology and solar energy: a renewable energy resource web site (release 6.0) [Internet]. Hampton (VA): NASA Langley Research Center; 2024 [citado 2025]. Disponible en: https://power.larc.nasa.gov/

[18] Panasonic Corporation Eco Solutions Company. Photovoltaic module HIT: VBHN330SJ47 / VBHN325SJ47 / VBHN320SJ47 [ficha técnica]. Tokio: Panasonic Corporation; 2016. Disponible en: http://panasonic.net/ecosolutions/solar

Dynamic Simulation of an Oscillating Multibody Wave Energy Converter Under Caribbean Sea Conditions

1st Manuel Alejandro Salinas Casseres
Escuela de Ingeniería, Arquitectura & Diseño
Universidad Tecnológica de Bolívar
Cartagena, Colombia
msalinas@utb.edu.co

2nd Edgardo William Arrieta Ortiz
Escuela de Ingeniería, Arquitectura & Diseño
Universidad Tecnológica de Bolívar
Cartagena, Colombia
earrieta@utb.edu.co

***Abstract*—This paper presents the dynamic simulation and preliminary experimental evaluation of SALUM, a floating multibody wave energy converter excited by experimentally reconstructed irregular waves. The system dynamics were formulated using the Euler–Lagrange formalism coupled with the Cummins equation to incorporate hydrodynamic radiation and added-mass effects. Hydrodynamic coefficients were obtained through the Boundary Element Method (BEM) implemented in Capytaine.**

Unlike conventional approaches based on ideal sinusoidal wave excitation, this study employed a reconstructed polychromatic wave profile obtained from experimental wave tank measurements using Fast Fourier Transform (FFT) analysis. The power take-off (PTO) system was modeled using a DC microgenerator represented by an equivalent viscous damping coefficient.

The results demonstrated stable oscillatory multibody behavior under irregular wave excitation, with angular responses approaching 10° and incident hydrodynamic wave power levels on the order of $1.4, \mathrm{W}$. Furthermore, experimental measurements confirmed the generation of transient electrical power during converter operation.

The obtained results validate the dynamic feasibility of the SALUM concept and establish a foundation for future hydrodynamic and electromechanical optimization of multibody wave energy converters.

***Index Terms*—Wave Energy Converter; Multibody Dynamics; Euler–Lagrange Modeling; Cummins Equation; Irregular Wave Excitation; Boundary Element Method (BEM); Power Take-Off (PTO).**

I. Introduction

Access to reliable electrical energy remains a significant challenge for coastal and island communities where connection to conventional power grids is limited or economically unfeasible. In this context, ocean wave energy has emerged as a promising renewable alternative owing to its high energy density and superior predictability compared to solar and wind sources [1], [3].

Among different existing configurations, floating multibody systems have generated increasing interest because they enable the distribution of hydrodynamic loads and expand energy capture bandwidth through multiple coupled degrees of freedom. These converters exploit relative motion between oscillating bodies to increase energy transfer to the power take-off (PTO) system, particularly under irregular wave conditions [4], [5]. Dynamic analysis of multibody converters requires formulations capable of accurately representing fluid–structure interaction and transient hydrodynamic effects present in the system. The Euler–Lagrange formalism has been widely employed to model coupled dynamics of oscillatory multibody systems applied to floating wave energy converters [12], [13]. In particular, Salinas-Casseres et al. developed a multibody dynamic model for the SALUM converter using Lagrangian formalism to represent the system's coupled oscillatory behavior [12].

Meanwhile, the Cummins equation allows incorporation of added-mass effects, radiation damping, and hydrodynamic memory in the time domain, being extensively used in hydrodynamic models of wave energy converters [14], [15]. Associated hydrodynamic coefficients are commonly obtained through the Boundary Element Method (BEM), enabling calculation of excitation and radiation forces on floating bodies with high precision [4]. Although numerous works have addressed wave energy converter simulation using ideal sinusoidal excitations, recent investigations have demonstrated the importance of employing irregular and experimentally reconstructed wave profiles to represent system hydrodynamic behavior more realistically. Wu et al. performed dynamic simulations and analyses of oscillating converters under irregular waves using nonlinear hydrodynamic models with numerical validation in MATLAB and AQWA, evidencing significant differences compared to monochromatic excitations [6]. Similarly, Kim et al. developed multibody simulations under irregular wave conditions to analyze hydrodynamic interaction and power capture in floating rotational converters [7]. Furthermore, Chandrasekaran and Sricharan conducted time-domain simulations of a floating multibody converter using WEC-Sim, incorporating BEM hydrodynamics and linear PTO systems under realistic dynamic conditions [5].

Within the Colombian context, recent studies have explored the potential for wave energy exploitation along Colombian Caribbean and Pacific coasts. Romero-Menco et al. developed

conceptual converter designs targeted at the Colombian Pacific coast [8], while Rubio-Clemente et al. conducted experimental wave channel modeling to represent Colombian marine conditions at reduced scale [9]. More recently, Berrio et al. analyzed the behavior of wave energy converter arrays for coastal mitigation and energy exploitation in the Colombian Caribbean [10]. However, limited national research currently integrates hydrodynamic modeling, nonlinear multibody dynamics, and experimental validation under reconstructed irregular waves simultaneously.

This work presents the dynamic simulation and preliminary experimental evaluation of the SALUM wave energy converter, a floating oscillating multibody system developed at the Universidad Tecnológica de Bolívar. System dynamics were formulated using the Euler–Lagrange formalism coupled with the Cummins equation and an electromechanical power take-off model based on a DC microgenerator. Unlike conventional approaches based on ideal sinusoidal wave excitation, the model employs an experimentally reconstructed polychromatic profile reconstructed via Fast Fourier Transform (FFT) from measurements obtained in an experimental wave tank.

The proposed methodology integrates hydrodynamic modeling, multibody dynamics, experimental wave reconstruction, and electromechanical energy conversion within a unified time-domain simulation framework. The obtained results enable analysis of dynamic behavior, energy transfer, and electrical generation capacity of the SALUM system under experimental irregular wave conditions.

II. Methodology

A. Mathematical Model

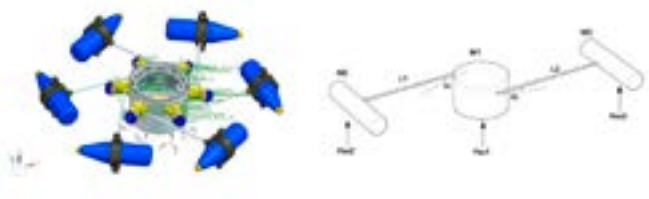


Fig. 1: a) Seven-body SALUM device, b) reduced three-body model.

1) System Description and Generalized Coordinates: The SALUM converter was modeled as a two-dimensional multibody system comprising a cylindrical central floater connected via rigid arms of lengths l_1 and l_2 to two lateral floaters. To simplify the nonlinear dynamic formulation, the original seven-body system was reduced to an equivalent three-body model, preserving the global oscillatory behavior and principal mechanical coupling of the device (Fig. 1).

The system is described by the generalized coordinate vector $\mathbf{q}(t) = \begin{bmatrix} y_1 & \theta_1 & \theta_2 \end{bmatrix}^T$ where y_1 represents the vertical displacement of the central floater, while θ_1 and θ_2 correspond to angular displacements of the lateral floaters with respect to the vertical.

B. Equations of Motion (Euler-Lagrange)

The SALUM converter dynamics were formulated using the Euler–Lagrange formalism applied to the system Lagrangian: $\mathcal{L} = T - U$, where T and U represent kinetic and gravitational potential energy, respectively. The kinematic relationships of the lateral floaters were defined by $x_i = l_i \sin(\theta_i), \quad y_i = y_1 - l_i \cos(\theta_i)$ Applying the Euler–Lagrange equation.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = 0$$

A system of coupled nonlinear differential equations was obtained describing the dynamic interaction between the central floater's vertical motion and the lateral floaters' angular oscillations.

The complete multibody dynamic model formulation, including detailed analytical development of the equations of motion, was previously presented in [12].

C. Incorporation of Hydrodynamic Effects

Fluid–structure interaction was incorporated using a Cummins equation-inspired formulation including added-mass effects, hydrodynamic damping, and hydrostatic restoring forces obtained via frequency-domain hydrodynamic analysis using BEM.

The coupled converter dynamics were expressed as:

$$\begin{aligned}(\mathbf{M}(\mathbf{q}) + \mathbf{A}_\infty)\,\ddot{\mathbf{q}} + \int_0^t \mathbf{K}(t-\tau)\dot{\mathbf{q}}(\tau)d\tau + \mathbf{h}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{B}_{eq}\dot{\mathbf{q}}... \\ .... + \mathbf{C}_{hyd}\mathbf{q} = \mathbf{F}_{exc}(t)\end{aligned} \tag{1}$$

where $\mathbf{A}_\infty$ represents the added mass at infinite frequency, $\mathbf{K}(t)$ corresponds to the hydrodynamic memory function associated with radiation damping, $\mathbf{B}_{eq}$ represents the system's equivalent damping, $\mathbf{C}_{hyd}$ is the hydrostatic restoring matrix, and $\mathbf{F}_{exc}(t)$ corresponds to excitation forces induced by experimental waves.

In this implementation, dissipative effects associated with the convolutional term were approximated through equivalent damping incorporated within $\mathbf{B}_{eq}$.

D. Hydrodynamic Parameter Extraction via Capytaine

The SALUM converter's hydrodynamic coefficients were obtained using the Boundary Element Method (BEM) implemented in the Capytaine library. The analysis was performed on the multibody model comprising the central floater and two lateral floaters, discretized superficially via panels.

From the frequency-domain hydrodynamic problem, added-mass coefficients $\mathbf{A}(\omega)$, radiation damping $\mathbf{B}(\omega)$, and hydrodynamic excitation forces $\mathbf{F}_{exc}(\omega)$ were calculated.

Hydrodynamic memory effects associated with the Cummins equation were represented via the impulse response function $\mathbf{K}(t)$, obtained from the frequency-domain radiation damping coefficients $\mathbf{B}(\omega)$.

The obtained parameters were subsequently incorporated into the system's dynamic formulation. In particular, the infinite-frequency added mass $\mathbf{A}_\infty$ was integrated into the

inertia matrix, while hydrodynamic and radiation dissipative effects were approximated through equivalent damping $\mathbf{B}_{eq}$.

Excitation forces were constructed from the experimental wave profile reconstructed via FFT and incorporated as temporal forcing during converter dynamic simulation.

Finally, the coupling between the nonlinear multibody model and hydrodynamic parameters obtained via BEM enabled representation of the SALUM system's fluid–structure interaction under experimental irregular wave excitation.

E. Modeling of the Power Take-Off (PTO) System

The power take-off (PTO) system of the SALUM wave energy converter was implemented using miniature DC microgenerators of type N20, mechanically coupled to the angular motions of the lateral floats. The angular velocities associated with the rotational degrees of freedom were defined as:

$$\omega_i(t) = \dot{\theta}_i(t)$$

The electromechanical behavior of the generator was represented through a simplified DC machine approximation, where the back electromotive force (EMF) was assumed proportional to the angular velocity:

$$e(t) = K_e \omega(t)$$

The electromechanical constant K_e was experimentally estimated via a no-load test, in which the generator was externally driven at approximately 2000 rpm, yielding an induced voltage close to 7 V.

Neglecting inductive effects, the electrical current was approximated as

$$i(t) \approx \frac{K_e}{R}\omega(t)$$

This formulation allows the PTO to be represented as an equivalent rotational damping term

$$\tau_{PTO}(t) = B_{pto}\omega(t)$$

where:

$$B_{pto} = \frac{K_t K_e}{R}$$

The total equivalent damping of the system was expressed as

$$\mathbf{B}_{eq} = \mathbf{B}_{pto} + \mathbf{B}_{struct}$$

thus incorporating contributions from the electromechanical PTO, mechanical losses, and viscous dissipation inherent to the experimental setup.

Finally, the instantaneous power captured by each PTO was computed as

$$P_i(t) = B_{pto}\dot{\theta}_i^2(t)$$

while the total power extracted by the converter was obtained from the sum of both rotational contributions.

F. Experimental Wave Profile Reconstruction and Lagrangian Fluid Modeling

To represent wave conditions closer to actual physical behavior, an irregular experimental profile obtained in a wave tank via a longitudinal array of nine uniformly spaced ultrasonic sensors was employed. For temporal reconstruction used in simulation, a representative sensor was selected, obtaining the free-surface elevation signal $\eta(t)$. The experimental signal was preprocessed and interpolated via PCHIP to reconstruct a continuous free-surface representation. Subsequently, the wave was spectrally decomposed using Fast Fourier Transform (FFT), enabling expression of the free surface as:

$$\eta(x,t) = \bar{\eta} + \sum_{n=1}^{N} A_n \cos(k_n x - \omega_n t + \phi_n) \tag{2}$$

where A_n, k_n, ω_n, and ϕ_n represent the amplitude, wavenumber, angular frequency, and spectral phase of each harmonic, respectively. Wavenumbers were defined as:

$$k_n = \frac{2\pi n}{L}$$

while angular frequencies were calculated using the linear dispersion relation:

$$\omega_n = \sqrt{g k_n \tanh(k_n h)}$$

To analyze fluid kinematics, the domain was discretized using a two-dimensional Lagrangian mesh of 25×12 particles, yielding a total of 300 fluid particles. Lagrangian trajectories for each harmonic were expressed as:

$$(\xi_n, \zeta_n) = (\alpha_n \cos\Phi_n,\ \beta_n \sin\Phi_n)$$

where:

$$\Phi_n = k_n x - \omega_n t + \phi_n$$

and:

$$\alpha_n = A_n \frac{\cosh(k_n d)}{\sinh(k_n h)}, \qquad \beta_n = A_n \frac{\sinh(k_n d)}{\sinh(k_n h)}$$

with $d = h + z$ being the relative depth of each particle. Horizontal and vertical velocities were obtained by temporally differentiating Lagrangian trajectories:

$$(u_n, w_n) = (\alpha_n \omega_n \sin\Phi_n,\ -\beta_n \omega_n \cos\Phi_n)$$

Harmonic contributions were superposed to obtain the total fluid velocity field:

$$u, w = \sum_{n=1}^{N} (u_n, w_n) \tag{3}$$

The RMS velocity of the domain was calculated via:

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_p}\sum_{i=1}^{N_p} v_i^2}$$

where N_p represents the total number of particles. Instantaneous kinetic energy of the waves was estimated via:

$$KE_{total} = \frac{1}{2}\rho V_{cell} \sum_{i=1}^{N_p} v_i^2 \tag{4}$$

where $V_{cell} = \Delta x \Delta z b$ is the control volume associated with each particle. Finally, average wave power was approximated via:

$$P_{wave} = \frac{KE_{total}}{T_f} \tag{5}$$

where T_f corresponds to the dominant harmonic period of the experimental spectrum. This procedure enabled incorporation of polychromatic hydrodynamic excitation based on actual wave tank measurements, providing a representation closer to actual wave physical behavior compared to ideal sinusoidal approximations.

G. Numerical Implementation

The SALUM converter's temporal simulation was implemented in Python using NumPy and SciPy. The nonlinear dynamic system was formulated in state space and temporally integrated using a fourth-order explicit Runge–Kutta scheme (RK4). Generalized accelerations were calculated via $\ddot{\mathbf{q}} = (\mathbf{M}(\mathbf{q}) + \mathbf{A}_\infty)^{-1} \mathbf{F}_{total}$ where $\mathbf{F}_{total}$ includes hydrodynamic excitation, hydrostatic restoring, equivalent damping, and PTO system effects. During simulation, converter displacements, velocities, accelerations, and instantaneous power were calculated. Fig. 2 summarizes the general flow of the implemented methodology.

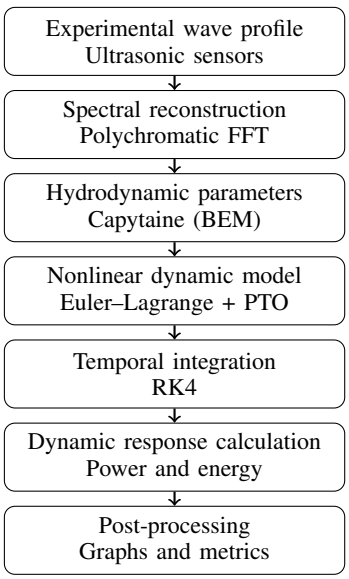


Fig. 2: General flow of the numerical methodology implemented for the SALUM converter.

H. Experimental Instrumentation



Fig. 3: Complete experimental setup of the SALUM wave energy converter during instrumented wave tank testing. The configuration includes the floating multibody system, ultrasonic sensor array, data acquisition electronics, and electromechanical PTO system.

Fig. 3 presents the complete experimental setup used during hydrodynamic testing of the SALUM converter in the instrumented wave tank. Experimental data acquisition from the SALUM converter was implemented using ESP32 microcontrollers and sensors distributed across the mechanical and electrical prototype systems. Electrical variables associated with the PTO were measured using INA219 sensors, enabling recording of voltage, current, and instantaneous power generated by DC microgenerators. System kinematic response was measured using an MPU9250 inertial measurement unit installed on the central floater, while angular displacements of lateral arms were recorded using encoders integrated in GA12-N20 motors. Fig. 4 presents the PCBs developed for experimental data acquisition of the system, including the acquisition board for the ultrasonic sensor array and the main PCB used for electrical measurement and inertial sensing of the converter.

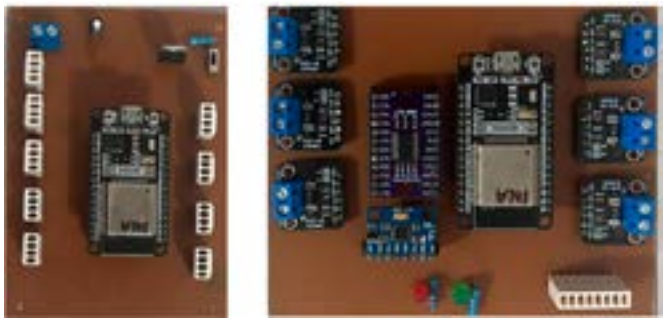


Fig. 4: PCBs developed for the SALUM experimental system: a) acquisition board for HC-SR04 ultrasonic sensors, b) main ESP32-based PCB for electrical acquisition, inertial sensing, and PTO system monitoring.

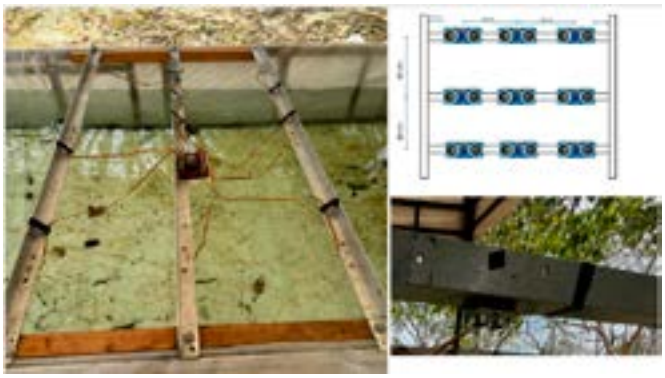


Fig. 5: Experimental wave profile acquisition system: a) physical installation of ultrasonic sensor network, b) spatial distribution of HC-SR04 sensors over the tank, c) detail of installed measurement system.

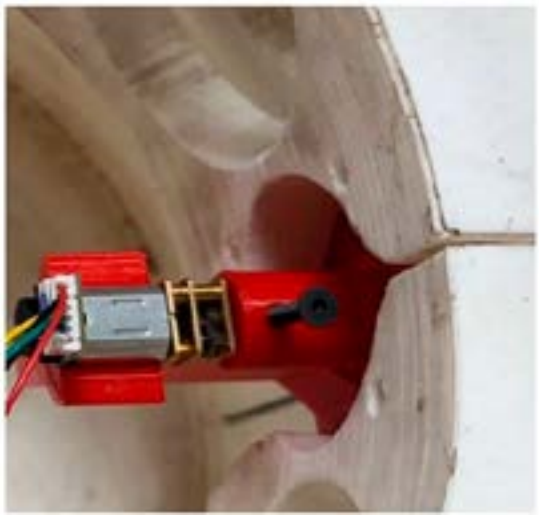


Fig. 6: Experimental PTO system implemented using N20-type DC microgenerator coupled to the SALUM converter's rotational mechanism.

Experimental wave characterization was performed using a network of nine HC-SR04 ultrasonic sensors distributed longitudinally over the experimental tank with uniform spacing of $60\,\mathrm{cm}$, enabling temporal reconstruction of the free-surface profile subsequently used in hydrodynamic simulation. Fig. 5 presents the implemented experimental acquisition system. The SALUM converter's PTO system was implemented using N20-type DC microgenerators mechanically coupled to the lateral floaters' rotational motion. Fig. 6 presents the electromechanical system used during experimental testing.

I. Wave Tank and Wave Generation

Experimental testing was conducted in a wave tank of $4.0\,\mathrm{m}$ length, $1.4\,\mathrm{m}$ width, and $0.6\,\mathrm{m}$ depth, operating with approximately $0.4\,\mathrm{m}$ water depth. Waves were generated using an oscillating paddle driven by a $0.5\,\mathrm{HP}$ electric motor coupled to a mechanical reduction system. Fig. 7 presents the experimentally implemented wave generation mechanism and its corresponding CAD model.



Fig. 7: Wave generation system implemented in the experimental tank: a) constructed physical mechanism, b) CAD model of the oscillating paddle system.

Although the system produces predominantly periodic excitations, experimental measurements evidenced multiple frequency components and dispersive effects associated with actual tank dynamics. For this reason, the wave profile used in simulation was experimentally reconstructed via FFT spectral analysis, enabling representation of polychromatic excitation closer to actual fluid physical behavior. Integration of the instrumented tank, wave generation system, and data acquisition network enabled obtaining the experimental signals subsequently employed in hydrodynamic simulation and energy analysis of the SALUM converter.

III. Results

A. Experimental Wave Profile

Comparison between the measured experimental profile and FFT spectral reconstruction is presented in Fig. 8. Results evidence high concordance between both signals, adequately reproducing crest location, troughs, and primary wave amplitudes. Most notable differences appear in high-curvature regions, particularly in pronounced crests associated with higher-frequency components and local nonlinear effects. Spectral reconstruction of the profile was expressed via (2), enabling representation of converter hydrodynamic excitation from dominant experimental wave components. Results show that waves generated in the tank exhibit polychromatic behavior, with spatial variations and surface deformations differing from ideal sinusoidal excitation.

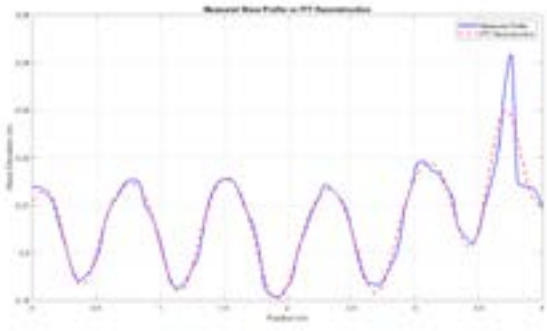


Fig. 8: Comparison between measured experimental profile and polychromatic harmonic reconstruction obtained via FFT.

B. Lagrangian Hydrodynamic Field and Wave Power

Lagrangian reconstruction of the velocity field associated with experimental waves is illustrated in Fig. 9, using approximately 300 particles distributed in the fluid domain. Results present characteristic elliptical orbital trajectories of gravitational waves, where surface-near particles exhibit larger amplitudes and velocities, progressively diminishing with depth. Maximum velocity obtained in the domain was $v_{max} \approx 0.197$ m/s, while average RMS velocity reached $v_{rms} \approx 0.058$ m/s. Instantaneous kinetic energy of waves was estimated using equation 4. Hydrodynamic reconstruction further enabled estimation of power transported by experimental waves subsequently employed in the converter's energy analysis.

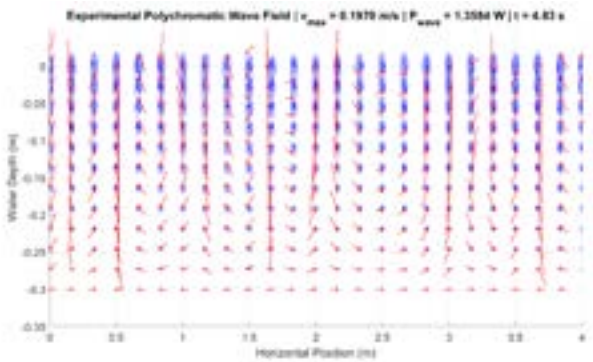


Fig. 9: Lagrangian reconstruction of velocity field and orbital trajectories of experimental waves using approximately 300 fluid particles.

C. Hydrodynamic Wave Energy and Power

Temporal evolution of kinetic energy and hydrodynamic wave power is shown in Fig. 10, associated with experimental waves reconstructed via the Lagrangian model. Fluid kinetic energy, calculated via 4, presented non-stationary oscillatory behavior with values approximately between $3.10 \text{ J} \leq KE_{total} \leq 3.43 \text{ J}$, while hydrodynamic wave power oscillated in the range $1.28 \text{ W} \leq P_{wave} \leq 1.42 \text{ W}$. Energy maxima coincide temporally with increases in fluid particle velocity and constructive interference regions among dominant spectral components of the reconstructed wave. Results show continuous temporal fluctuations in both energy and power, associated with the polychromatic behavior of the experimental profile used during dynamic simulation.

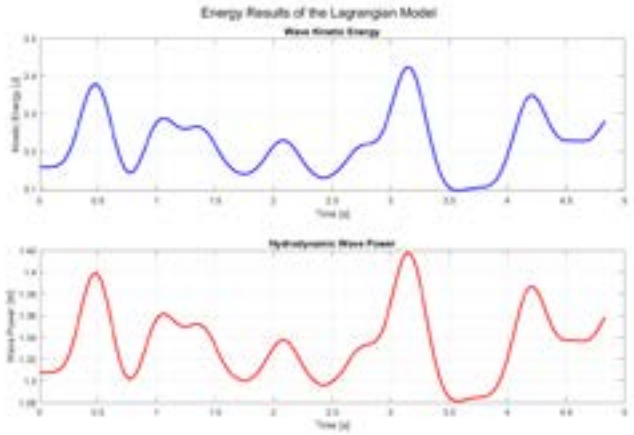


Fig. 10: Temporal evolution of kinetic energy and hydrodynamic power of experimental waves reconstructed via the Lagrangian model.

D. Displacement and System Temporal Response

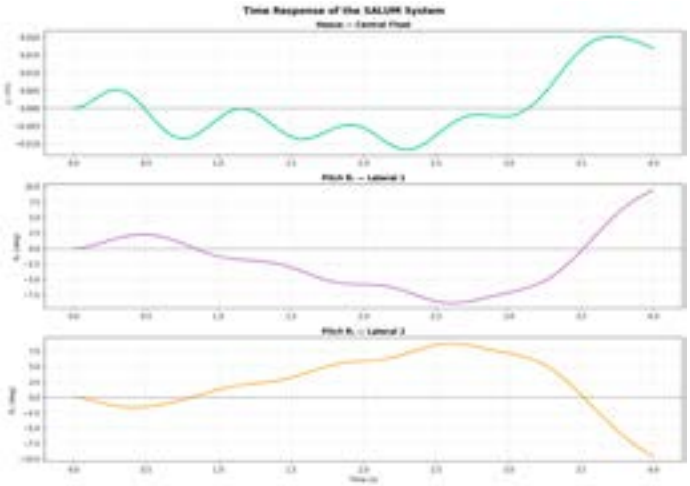


Fig. 11: Temporal response of SALUM system under experimental polychromatic excitation.

Temporal response of the SALUM converter under experimental polychromatic excitation is presented in Fig. 11. Central floater vertical displacement presented non-stationary oscillatory response within approximate range $-0.012 \text{ m} leqy_1(t) \leq 0.020$ m, with amplitude increases observed around $t \approx 3.5$ s. Angular oscillations of lateral floaters reached approximately $-9° \leq \theta_1(t) \leq 10°$ and $-10° \leq \theta_2(t) \leq 9°$ Results show coupled dynamic behavior between both lateral floaters, with approximately antisymmetric response and temporal amplitude modulations induced by the polychromatic nature of experimental waves. Additionally, largest angular amplitudes coincide temporally with regions of maximum power captured by the PTO system.

E. Linear and Angular Velocities of SALUM System

Linear and angular velocities obtained for the SALUM system are shown in Fig. 12. Central floater vertical velocity presented non-stationary oscillatory behavior with values approximately between -0.047 m/s $\leq \dot{y}_1 \leq 0.052$ m/s, with amplitude increases observed around $t \approx 3.3$ s, associated with regions of energy concentration of reconstructed waves. Angular velocities of lateral floaters reached ranges $-10\,^\circ/\text{s} \leq \dot{\theta}_1 \leq 25\,^\circ/\text{s}$ and $-24\,^\circ/\text{s} \leq \dot{\theta}_2 \leq 8\,^\circ/\text{s}$. Results show coupled dynamic response between both lateral floaters, with approximately antisymmetric behavior and temporal amplitude variations induced by the polychromatic nature of hydrodynamic excitation. Additionally, signals present amplitude modulations and dynamic regime changes over time, evidencing interaction among multiple spectral components of experimental waves. Maximum angular velocities coincide temporally with highest power capture levels by the PTO system.

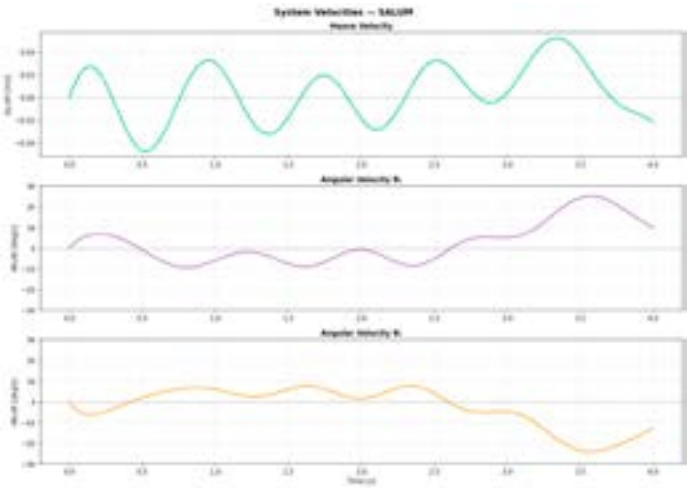


Fig. 12: Linear and angular velocities obtained for SALUM system under experimental polychromatic excitation.

F. Power Captured by PTO

Temporal dynamics of power captured by the PTO system can be observed in Fig. 13. Results show transient and non-stationary behavior, with temporal fluctuations induced by the polychromatic nature of experimental waves. Both floaters present similar energetic responses, with significant power increase observed around $t \approx 3.5$ s, coinciding with maximum angular velocities of the system. Maximum total power obtained was approximately $P_{total,max} \approx 1.5 \times 10^{-7}$ W while individual contributions from each floater remained on the order of 10^{-8} W.

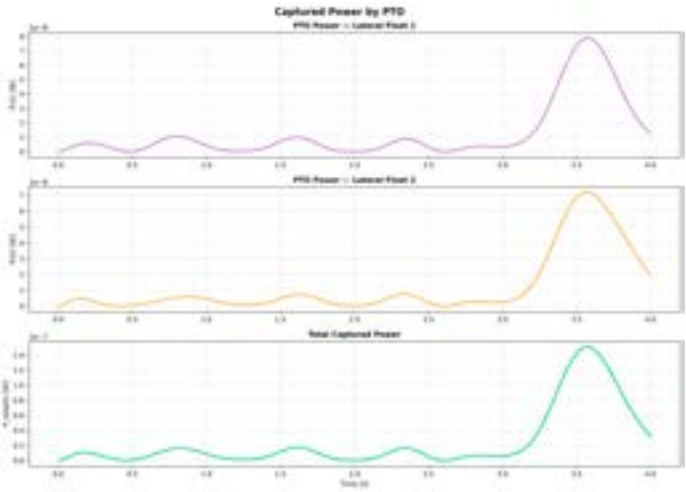


Fig. 13: Instantaneous power captured by PTO system associated with lateral floaters of SALUM converter.

G. Experimental Electrical Power

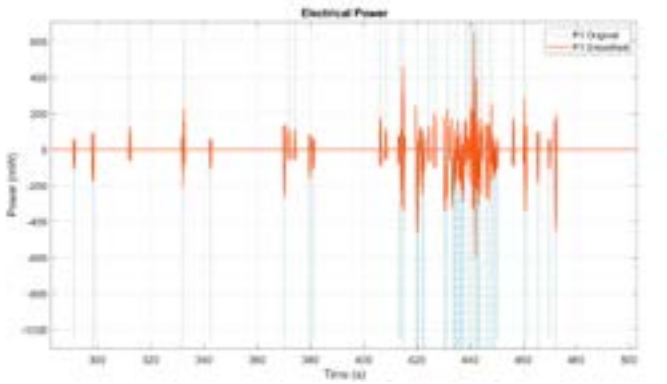


Fig. 14: Experimental electrical power measured via acquisition PCB during SALUM converter testing in wave tank.

Electrical power obtained experimentally during tank testing is shown in Fig. 14. Results show transient and intermittent behavior of generated power, characterized by multiple positive and negative peaks irregularly distributed in time. Most significant energetic events concentrated approximately between 430 s and 450 s, coinciding with regions of greater dynamic excitation of the system. The original signal presents rapid fluctuations associated with instantaneous variations of angular velocity and electromechanical perturbations of the experimental system. To identify the dominant energetic trend, temporal smoothing of the measured signal was applied. Experimental results evidenced power events on the order of hundreds of milliwatts, reaching approximate peaks of $P_{exp,max} \approx 650$ mW. Additionally, much of the signal remains near zero between generation events, indicating that energy capture occurs primarily during temporal intervals of greater hydrodynamic excitation. Finally, experimental results present qualitative correspondence with trends observed in numerical simulation, particularly regarding the transient

character of generation and appearance of localized energetic peaks.

IV. Conclusions

This work presented dynamic modeling, hydrodynamic simulation, and preliminary experimental validation of the SALUM multibody wave energy converter under experimentally reconstructed irregular wave excitation. The system was formulated using Euler–Lagrange formalism coupled with Cummins equation-inspired hydrodynamic representation, incorporating added-mass effects, damping, and hydrostatic restoring obtained via Boundary Element Method (BEM) using Capytaine.

Obtained results demonstrated that the experimental profile reconstructed via FFT adequately reproduces the polychromatic nature of waves generated in the tank, enabling dynamic excitation of the converter under conditions more realistic than conventional sinusoidal approximations. Similarly, Lagrangian reconstruction of the velocity field evidenced orbital trajectories coherent with gravitational wave theory and enabled estimation of hydrodynamic energy content available to the system.

Converter dynamic response showed stable coupled oscillations in both heave and pitch, reaching angular displacements near $(10°)$ and angular velocities sufficient to drive the rotational PTO system implemented via DC microgenerators. Numerical results further evidenced strong dependence between spectral distribution of waves and energy transfer to mechanical degrees of freedom of the system.

Although average captured power and overall efficiency obtained were reduced due to experimental prototype limitations and low electromechanical coupling of the employed PTO, experimental measurements conducted via the acquisition PCB confirmed generation of actual transient electrical power events during converter operation. These results physically validate the operating principle of the SALUM system and the capability of the implemented model to represent coupling among hydrodynamics, multibody dynamics, and electromechanical energy conversion.

From a methodological perspective, the work experimentally integrates wave spectral reconstruction, BEM hydrodynamic simulation, nonlinear multibody dynamics, and actual electrical measurement within a unified analytical framework, providing a useful foundation for future optimization and scaling stages of floating wave energy converters.

As future work, it is proposed to extend the methodology toward hydrodynamic conditions representative of the Colombian Caribbean Sea through incorporation of actual ocean spectra, meteorological-oceanographic data, and sea states obtained in field campaigns. Furthermore, optimization of the PTO system, improvement of electromechanical coupling, incorporation of control strategies, and experimental testing in actual marine environments are planned to evaluate converter energetic performance under larger-scale and more complex operational conditions.

References

[1] A. F. O. Falcão, "Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 899–918, 2010.

[2] M. A. Mustapa, O. Yaakob, Y. M. Ahmed, C. D. Rheem, K. K. Koh, and F. A. Adnan, "Wave Energy Device and Breakwater Integration: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 43–58, 2017.

[3] Y. Zhang, D. Zhao, H. Peng, et al., "Ocean Wave Energy Converters: Technical Principle, Device Realization, and Performance Evaluation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, Art. no. 110764, 2021.

[4] J. Davidson and R. Costello, "Efficient Nonlinear Hydrodynamic Models for Wave Energy Converter Design: A Scoping Review," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 1, Art. no. 35, 2020.

[5] M. Chandrasekaran and K. Sricharan, "Numerical Analysis of a New Multi-Body Floating Wave Energy Converter with a Linear Power Take-Off System," *Renewable Energy*, vol. 160, pp. 396–412, 2020.

[6] S. Wu, Y. Liu, Y. Li, et al., "Experimental Analyses of Two-Body Wave Energy Converters Under Irregular Waves," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 14, pp. 20371–20389, 2021.

[7] J. Kim, I. Cho, and H. Cho, "Experimental Study of Multiple Hemisphere Wave Energy Converters Arrayed in Irregular Waves," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 15, pp. 1–14, 2023.

[8] L. Shangguan et al., "Research on Laboratory Test Method of Wave Energy Converters Under Irregular Waves," *Energies*, vol. 16, no. 2, Art. no. 1001, 2023.

[9] F. J. Romero-Menco et al., "Design of a Wave Energy Converter System for the Colombian Pacific Ocean," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 38, no. 2, pp. 120–135, 2020.

[10] A. Rubio-Clemente et al., "Design of a Water Channel to Model the Wave Conditions in the Colombian Pacific," in *Proc. Int. Conf. Renewable Energies Power Quality (ICREPQ)*, 2022.

[11] Y. Berrio et al., "The Power of Wave Energy Converter Arrays to Mitigate Coastal Erosion in the Colombian Caribbean," *Coastal Engineering Proceedings*, vol. 1, no. 38, 2024.

[12] M. A. Salinas-Casseres et al., "Dynamic Model of the Salum Floating Oscillating Energy Converter System," in *2025 IEEE Colombian Conf. Autom. Control (CCAC)*, Cartagena, Colombia, 2025.

[13] M. A. Shabara et al., "Dynamic Modeling and Vibrations of Variable-Shape Wave Energy Converters," arXiv:2210.17297, 2022.

[14] J. Ramos et al., "On Implementing Cummins Equation to Represent Accurate Wave Radiation Forces in Modelica," in *Proc. Int. Modelica Conf.*, 2023.

[15] A. M. Ermakov et al., "On the Value of Fano Resonance in Wave Energy Converters," *Applied Ocean Research*, vol. 145, Art. no. 103980, 2024.

Control of a modular multilevel converter in the *abc* reference frame for rectifier stations in HVDC systems

1st Ronnie Alexander Malagón Fuentes; 2nd Santiago Jared Caballero Manrique; 3rd María Alejandra Mantilla Villalobos.
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia
ronnie2210243@correo.uis.edu.co; santiago2211568@correo.uis.edu.co; marialem@uis.edu.co

***Abstract*—High Voltage Direct Current (HVDC) transmission has emerged as an efficient solution for transporting large amounts of electrical power over long distances, particularly in scenarios requiring high controllability and system stability. Among the available technologies, Voltage Source Converters (VSC) based on Modular Multilevel Converters (MMC) have become a prominent option due to their scalability, superior waveform quality, and operational flexibility. In this context, this work considers the use of a full-bridge MMC topology for a rectifier station in HVDC systems, selected for its enhanced robustness under DC-side conditions and its improved control capabilities compared to other configurations.**

The main contribution of this paper is the implementation of a deadbeat predictive current control strategy in the *abc* reference frame, directly applied to converter variables without requiring coordinate transformations. This approach enables an accurate current tracking. Additionally, a DC bus controller based on a PI regulator is incorporated to regulate the DC-side voltage and generate the current reference signals required by the predictive controller. The modulation stage is implemented using Phase-Shifted Carrier Pulse Width Modulation (PSC-PWM), which is particularly well suited for multilevel converters due to its inherent capability to balance submodule capacitor voltages, effectively distribute switching events, and mitigate voltage ripple in the DC bus.

The development and analysis of such control strategies are particularly relevant in contexts such as Colombia, where HVDC implementation is still in early stages. In particular, initiatives such as the GCM (Guajira–Cesar–Magdalena) transmission expansion plan aim to integrate large-scale renewable generation from the northern region into the National Interconnected System (SIN), highlighting the need to strengthen technical capabilities in advanced power conversion and control technologies in emerging HVDC-based infrastructures. Accordingly, this work adopts this case study as a reference for the sizing of the simulated system. The system is modeled in MATLAB/Simulink, and its performance is evaluated under steady-state operating conditions through the analysis of electrical variables, including waveform quality and metrics such as Total Harmonic Distortion (THD) and Mean Square Error (MSE).

This work provides an integrated control framework for MMC-based HVDC rectifier stations, combining predictive current control, DC bus regulation, and PSC-PWM, all implemented directly in the abc reference frame without requiring additional coordinate transformations.

Keywords*—High Voltage Direct Current (HVDC), Modular Multilevel Converter (MMC), Voltage Source Converter (VSC)

I. Introduction

The increasing global demand for electrical energy has driven the evolution of transmission technologies aimed at improving system efficiency and stability. In this context, High-Voltage Direct Current (HVDC) transmission has emerged as a key solution due to its high controllability, low losses, and capability to integrate renewable energy sources, as well as its ability to interconnect asynchronous systems [1]. Among HVDC technologies, modular multilevel converters (MMC) stand out for their scalability, operational flexibility, and high performance [2], making the development of control strategies essential to ensure optimal operation under real conditions.

In Colombia, the modernization of the transmission network is a strategic priority to facilitate the integration of non-conventional renewable energy sources and to improve the capacity of the National Interconnected System. Within this framework, the Mining and Energy Planning Unit (UPME) proposed the Guajira–Cesar–Magdalena (GCM) project in Colombia, an HVDC link exceeding 3 GW that will enable the exploitation of La Guajira's wind potential and alleviate transmission constraints in the Caribbean region [3]. This system, based on VSC-MMC converters, introduces significant challenges in terms of modeling and control.

This paper presents the design and simulation of a control strategy for a VSC-MMC converter station operating in rectifier mode, based on the technical parameters of the GCM project. The proposed strategy aims to ensure efficient energy conversion, with low harmonic distortion on the AC side and reduced ripple in the DC bus voltage. In this way, this work contributes to the development of solutions that support the reliable implementation of HVDC systems in the Colombian context.

II. MMC-Based HVDC Systems

HVDC transmission is based on the use of power electronic converters to enable energy exchange between alternating current (AC) and direct current (DC) systems, allowing direct control of power flow through the regulation of variables such

as voltage and current. Compared to conventional AC transmission, HVDC decouples power transfer from frequency, phase angle, and line impedance, providing enhanced controllability, higher transmission capacity, and improved dynamic performance [1].

Within voltage source converter (VSC)-based HVDC systems, the modular multilevel converter (MMC) has emerged as a leading topology due to its superior scalability and output waveform quality. An MMC is composed of multiple submodules (SMs) connected in series within each converter arm, as seen in Fig. 1, where each submodule typically consists of semiconductor devices and an energy storage element, usually a capacitor. The submodules commonly correspond to single-phase Half-Bridge (HB) or Full-Bridge (FB) topologies; however, they can also be implemented using more advanced multilevel topologies. By appropriately inserting or bypassing these submodules, the converter is capable of synthesizing a staircase-like voltage waveform with low harmonic distortion and reduced filtering requirements [4].

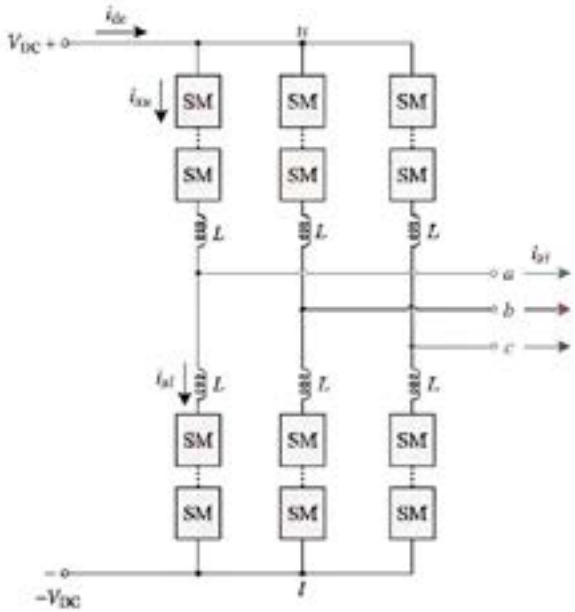


Fig. 1. General structure of a Modular Multilevel Converter (MMC).

As shown in Fig. 1, the phase current denoted as i_{xi} with $x \in \{a, b, c\}$, corresponds to the current flowing from the midpoint of each converter leg to the AC grid in each phase. This current is responsible for the power exchange between the AC and DC sides of the converter.

On the other hand, i_{xu} and i_{xl} with $x \in \{a, b, c\}$, represent the upper (u) and lower (l) arm currents, respectively, in each phase. The arm inductance (L) is primarily used to limit the circulating currents flowing within the converter arms.

The internal circulating current in each phase flows between the upper and lower arms without being transferred to the external system. This current arises due to instantaneous voltage difference between the arms, switching effects, internal harmonic components, and possible system unbalances. Although it does not directly contribute to power transfer, its presence significantly affects the dynamic behavior of the converter and plays an important role in the design of the arm inductances and overall system performance [5].

A. Submodule Topology: Full-bridge

Based on the previously described MMC structure, this work adopts a configuration composed of full-bridge (FB) submodules. Each submodule consists of four power electronic switches and an energy storage element, typically a capacitor, as illustrated in Fig. 2. This topology is selected due to its enhanced voltage control capability and its ability to block DC-side faults, which are critical features in HVDC applications.

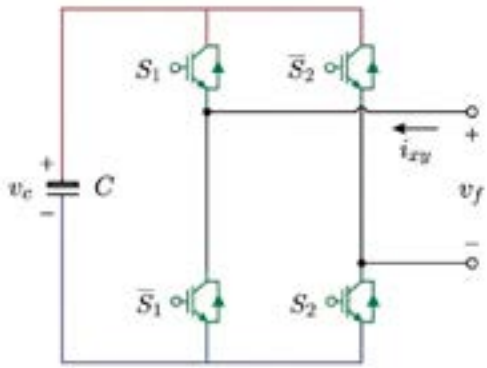


Fig. 2. Full-bridge submodule topology used in MMC converters.

The bipolar voltage generation capability of the full-bridge submodule enables greater flexibility in the synthesis of the converter output voltage, which is particularly advantageous under transient and unbalanced operating conditions. Additionally, its inherent DC fault blocking capability prevents the propagation of fault currents from the DC side, enhancing system protection and operational security. Consequently, the full-bridge topology represents a suitable solution for HVDC applications where high reliability and fault tolerance are required.

The behavior of the full-bridge submodule can be analyzed based on its switching states, which are defined by the activation of its electronic switches. In practical terms, four main operating states can be identified, as summarized in Table 1. These states determine the voltage contribution of the submodule and its interaction with the converter arm.

TABLE I. SWITCHING STATES OF THE FULL-BRIDGE SUBMODULE

State	S_1	S_2	v_f	$i_{xy} > 0$	$i_{xy} \leq 0$
1	1	1	v_c	$v_c \uparrow$	$v_c \downarrow$
2	1	0	0	$v_c \approx$	$v_c \approx$
3	0	1	0	$v_c \approx$	$v_c \approx$
4	0	0	-v_c	$v_c \downarrow$	$v_c \uparrow$

From the switching combinations presented, three main operating modes can be identified:

- **Positive voltage (v_C)**: This state occurs when switches S_1 and S_2 are activated ($S_1 = 1$, $S_2 = 1$). In this condition, the submodule inserts the capacitor voltage into the output. Depending on the direction of the arm current i_{xy}, the capacitor may either charge or discharge.
- **Zero voltage (bypass)**: This mode takes place when only one of the switches S_1 or S_2 is activated, i.e., when $S_1 = 1$ and $S_2 = 0$ (state 2), or $S_1 = 0$ and $S_2 = 1$ (state 3). In this case, the submodule does not contribute voltage to the output, allowing the current to flow through the arm without significantly affecting the capacitor voltage.
- **Negative voltage ($-v_C$)**: This state occurs when both switches S_1 and S_2 are deactivated ($S_1 = 0$, $S_2 = 0$), enabling the insertion of a negative voltage at the submodule output. In HVDC applications, this mode is associated with the blocking capability of full-bridge submodules, which is used to prevent fault current propagation during DC-side faults, thereby enhancing system protection. In this work, this operating state is not considered under normal conditions, as the analysis focuses on steady-state rectifier operation.

B. *Operating Principle*

The operation of the MMC topology relies on the controlled insertion or bypassing of submodules within each converter arm. Through this process, the output voltage is synthesized by combining the voltages contributed by the capacitors of the inserted submodules. An inserted submodule contributes its capacitor voltage to the arm voltage, whereas a bypassed submodule does not participate in the voltage generation process. By continuously adjusting the number of active submodules, the converter is capable of producing a multilevel stepped waveform in the AC-side that closely approximates a sinusoidal signal.

When operating in rectifier mode, the converter absorbs power from the AC network and transfers it to the DC side. Proper converter operation requires regulation of the AC-side current as well as balancing the capacitor voltages across the submodules, since these capacitors represent the main energy storage elements of the converter.

C. *Per-phase equivalent model*

For the analysis of the modular multilevel converter operating in rectifier mode, a per-phase equivalent model is adopted, which captures the system behavior in terms of the converter arm variables. This representation allows the dynamic interaction between the AC and DC sides to be described using the upper and lower arm quantities. The resulting model is illustrated in Fig. 3, where each phase is composed of an upper (u) and a lower (l) arm [4].

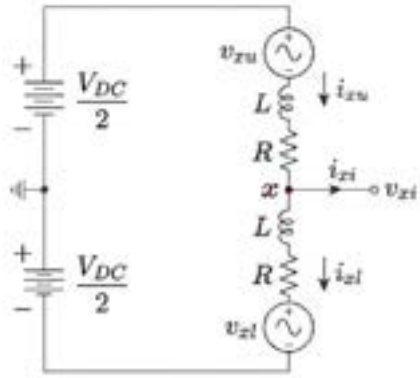


Fig. 3. Per-phase equivalent model of the MMC. Figure adapted from [4].

In this model, the submodules of the upper and lower arms are represented as controlled voltage sources (v_{xu} and v_{xl}, respectively), while the DC system is modeled as a voltage source V_{DC}, equally split between both arms of the converter [4]. Additionally, each arm includes an inductance L and an equivalent resistance R that represent the arm inductor, which limit the internal circulating currents.

Based on this equivalent circuit, the converter behavior can be described through the upper and lower arm equations [4]:

$$v_{xu} = \frac{V_{dc}}{2} - v_{xi} - L\frac{di_{xu}}{dt} - Ri_{xu} \quad (1)$$

$$v_{xl} = \frac{V_{dc}}{2} + v_{xi} - L\frac{di_{xl}}{dt} - Ri_{xl} \quad (2)$$

where $x \in \{a, b, c\}$ denotes each phase of the system; v_{xu} and v_{xl} are the modulation voltages of the upper and lower arms, respectively; i_{xu} and i_{xl} are the corresponding arm currents; and v_{xi} represents the converter phase voltage on the AC side.

For simplification, it is common to assume ideal conditions in which arm resistances and circulating current effects are neglected. Under these assumptions, the modulation equations can be expressed in a simplified form [4]:

$$v_{xu} = \frac{V_{DC}}{2} - v_{xi} - v_{xz} \quad (3)$$

$$v_{xl} = \frac{V_{DC}}{2} + v_{xi} - v_{xz} \quad (4)$$

where v_{xz} represents the voltage drop across the arm inductance associated with circulating currents.

These expressions describe the steady-state behavior of the converter and provide the basis for generating the modulation signals in each arm.

III. Control Strategy

The control system of the MMC plays a fundamental role in regulating the current and, consequently, the power exchange between the AC and DC sides. In this type of system, a hierarchical control structure is typically adopted, consisting of an outer loop and an inner loop, which enable the regulation of power and current variables. In addition to these control loops, the modulation strategy is an integral component of the overall control scheme, as it defines how the voltage references are synthesized at the converter arms.

Fig. 4 illustrates the general scheme of the rectifier station, including the MMC connected to the grid through a three-phase filtering inductance L_i, along with the complete control system. The point of common coupling (PCC) defines the connection point with the AC network. The proposed control structure comprises three main elements: the DC bus voltage control (outer loop), the current control (inner loop), and the phase-shifted carrier pulse-width modulation (PSC-PWM) strategy, which is used to generate the switching signals of the power converter based on the control references.

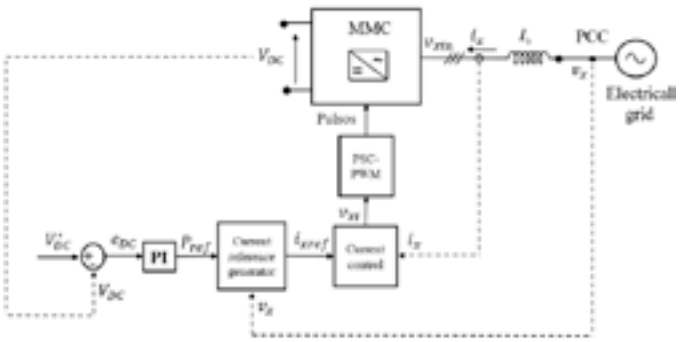


Fig. 4. General scheme of the grid-connected rectifier station, including the MMC control structure.

A. DC bus voltage control

The outer control loop is responsible for regulating the DC bus voltage, which is directly related to the power transferred in the system. To achieve this, a proportional–integral (PI) controller is employed, comparing the measured DC-link voltage of the rectifier (V_{DC}) with a predefined reference value (V_{DC}^*). The control error is defined as:

$$e_{DC}(t) = V_{DC}^*(t) - V_{DC}(t) \tag{5}$$

Based on this error, the controller generates a signal associated with the active power required by the system, expressed as:

$$P_{ref}(t) = K_p\, e_{DC}(t) + K_i \int e_{DC}(t)\, dt \tag{6}$$

This reference power is then used to determine the AC-side current references of the three-phase system. For this purpose, the instantaneous power formulation in the stationary *a-b-c* frame is considered:

$$p(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \tag{7}$$

where $p(t)$ represents the instantaneous active power drawn from the grid, v_x with $x \in \{a, b, c\}$ corresponds to the voltage at the PCC, and i_x is the current demanded from the grid in each phase. It is noted that $i_x = -i_{xi}$ according to the adopted sign convention.

The AC-side current references are defined such that the power absorbed by the converter matches the reference power (P_{ref}). Thus, the reference currents can be expressed as [6]:

$$i_{aref}(t) = \frac{P_{ref}(t)}{v_a^2(t) + v_b^2(t) + v_c^2(t)}\, v_a(t) \tag{8}$$

$$i_{bref}(t) = \frac{P_{ref}(t)}{v_a^2(t) + v_b^2(t) + v_c^2(t)}\, v_b(t) \tag{9}$$

$$i_{cref}(t) = \frac{P_{ref}(t)}{v_a^2(t) + v_b^2(t) + v_c^2(t)}\, v_c(t) \tag{10}$$

In this way, the DC voltage control loop indirectly determines the amount of power transfer, establishing the current references to be tracked by the inner control loop.

B. Current controller

The inner control loop is responsible for regulating the system currents, ensuring accurate tracking of the reference currents generated by the DC bus voltage control loop. In this work, a predictive Dead-Beat control strategy is employed, which uses a discrete-time model of the system to compute the control action at each sampling instant.

This method determines the converter phase voltage on the AC-side (v_{xi}) required to drive the measured current (i_x) to its reference value (i_{xref}), within one sampling period. The AC-side voltage of the converter, referred to the grid neutral, can be expressed as:

$$v_{xin}(t) = v_x(t) - L_i \frac{di_x(t)}{dt}, \qquad x \in \{a, b, c\} \tag{11}$$

The derivative term can be approximated in discrete form as:

$$\frac{di_x(t)}{dt} \approx \frac{i_x(k+1) - i_x(k)}{T_s} \tag{12}$$

where T_s is the sampling period. Substituting into (11), the discrete-time expression becomes:

$$v_{xin}(k) = v_x(k) - L_i \frac{i_x(k+1) - i_x(k)}{T_s} \tag{13}$$

To enforce current tracking within one sampling step, $i_x(k+1)$ is replaced by $i_{xref}(k)$, leading to the control law [7]:

$$v_{xin}(k) = v_x(k) - L_i \frac{i_{xref}(k) - i_x(k)}{T_s} \tag{14}$$

For the three-phase case, this formulation can be extended in matrix form as presented in [7], allowing the computation of the converter reference voltages with respect to the midpoint of the DC bus, i.e., v_{xi} with $x \in \{a, b, c\}$, as:

$$\begin{bmatrix} v_{ai}(k) \\ v_{bi}(k) \\ v_{ci}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(k) - \frac{L_i}{T_s}\Delta i_a \\ v_b(k) - \frac{L_i}{T_s}\Delta i_b \\ v_c(k) - \frac{L_i}{T_s}\Delta i_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

where Δi_x, represents the current tracking error in each phase:

$$\Delta i_x = i_{xref}(k) - i_x(k), \qquad x \in \{a, b, c\} \quad (16)$$

This formulation provides the reference voltages required at the converter AC terminals to ensure fast and accurate current tracking. These voltage references are subsequently used to compute the modulation voltages of the upper and lower arms, v_{xu} and v_{xl} in equations (3) and (4), respectively, which are the inputs to the PSC-PWM modulation strategy.

C. PSC-PWM

The modulation strategy in the MMC defines the switching states of the submodules at each instant in order to synthesize the desired output voltage. Since this voltage is constructed from multiple discrete levels, the selected modulation technique has a direct impact on the waveform quality and harmonic performance.

In this work, the phase-shifted carrier pulse-width modulation (PSC-PWM) technique is adopted. This method is based on the use of multiple triangular carrier signals that are phase-shifted with respect to each other and compared against a reference signal. Such an approach distributes the switching events over time, resulting in a smoother output waveform with reduced harmonic distortion. For the MMC, the reference signals correspond to the modulation voltages v_{xu} and v_{xl} defined in (3) and (4) for the upper and lower arms, respectively.

The phase shift between carrier signals depends on the number of submodules per arm. For a system with N submodules per arm, the phase displacement between carriers is given by:

$$\phi_c = \frac{360^\circ}{N} \quad (17)$$

Additionally, the phase shift between the carrier signals of the upper and lower arms is determined using the following equation:

$$\phi_{ci} = \frac{360^\circ}{2N} \quad (18)$$

This arrangement ensures an even distribution of switching actions and improves the quality of the generated voltage waveform [4]. An example of the carriers and reference signals for N = 2 is shown in Fig. 5 and Fig. 6. A more detailed description of the PSC-PWM technique, including carrier arrangement and gate signal generation, can be found in [4, pp. 51–58].

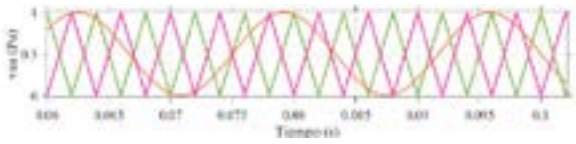


Fig. 5. Example of phase-shifted carrier signals and a sinusoidal reference signal for the upper arm with two submodules per arm (N=2).

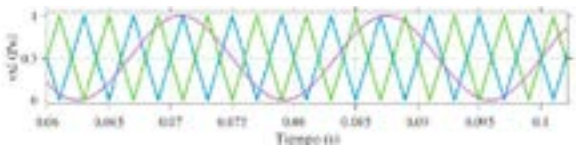


Fig. 6. Example of phase-shifted carrier signals and a sinusoidal reference signal for the lower arm with two submodules per arm (N=2).

Additionally, one of the advantages of the PSC-PWM technique is its contribution to the balancing of submodule capacitor voltages. This behavior arises from the uniform distribution of switching actions over time, which promotes a more even utilization of the submodules during voltage synthesis. As a result, the capacitor voltages tend to remain within a bounded range under balanced operating conditions. However, in practical implementations, additional control mechanisms are typically required to ensure accurate voltage balancing, especially under transient or unbalanced conditions [4].

IV. Simulation Model

For the analysis of the MMC operating in rectifier mode, the power-stage configuration shown in Fig. 7 is adopted, which incorporates the behavior of both the AC-side system and the DC link. The AC grid is modeled as an ideal balanced three-phase sinusoidal voltage source with positive-sequence components, connected to the converter through a filter inductance (L_i). A resistor (R_L) is connected to the DC bus, whose value is determined according to the transferred power. The calculation of this resistor must be consistent with the power levels under analysis, considering that variations in the resistor value directly affect the transferred power.

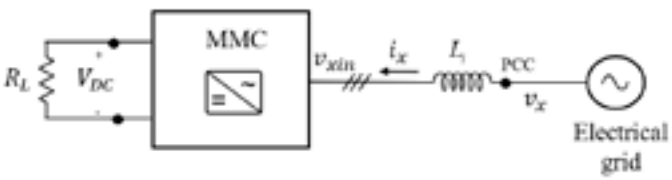


Fig. 7. Simplified modeling of the power stage.

A. Case Study and parameter definition

For the sizing and parameter definition of the system under study, the HVDC system proposed for the GCM (Guajira–Cesar–Magdalena) project was adopted as the reference case [3],[8]. Based on this benchmark, the rectifier station is designed to transmit a maximum power of 3 GW and to operate at an AC line-to-line voltage of 500 kV RMS. To ensure proper converter operation, the DC-side voltage must exceed the peak value of the AC line voltage, which yields:

$$V_{DC} > V_{L,pico} = 500kV * \sqrt{2} = 707{,}1\ kV \quad (19)$$

Accordingly, a DC-link voltage of 800 kV is selected. The value of the resistance load, corresponding to a transferred power of 3 GW, is calculated as:

$$R_L = \frac{V_{DC}^2}{P} = \frac{(800 \times 10^3)^2}{3 \times 10^9} = 213{,}33\Omega \quad (20)$$

For simulation purposes, a resistance value of $R = 214\Omega$ was used.

Regarding the number of submodules in the MMC converter, a configuration of 128 submodules per arm was selected to ensure the practical feasibility of implementing the topology using commercially available power semiconductor devices and capacitors. According to the MMC literature, the total DC-link voltage can be expressed as the product of the number of submodules per arm and the nominal voltage of each submodule capacitor, i.e.:

$$V_{DC} = N\, V_C \quad (21)$$

Therefore, for $N = 128$, the nominal voltage per submodule is given by:

$$Vc = \frac{V_{DC}}{N} = \frac{800kV}{128} = 6250\ V \quad (22)$$

This value serves as the main design criterion for selecting both the capacitor and the operating voltage rating of the semiconductor devices in each submodule. The following table presents the electrical and electronic components selected according to the system sizing requirements.

TABLE III. SYSTEM COMPONENT SELECTION

Component	Reference / model	Main nominal parameter	Justification
Submodule capacitor	DryDCap – Hitachi Energy	2.6 kV, 4–9.6 mF	It was selected due to its high energy density, low inductance, and dry-type design, which ensures high reliability in multilevel converter and HVDC applications [9].
Submodule IGBT	FZ1000R65KE4 – Infineon	6.5 kV 1000 A	It was selected due to its suitable characteristics for HVDC applications, as well as its high reliability and low conduction losses [10].
Arm Inductance / Filter Inductance	Reactor air-core (Trench HVDC)	50 mH / 0.12H	It was selected due to its widespread use in HVDC systems, as well as its capability to control converter dynamics and reduce harmonic distortion [11].

Nevertheless, due to the hardware and software constraints of the simulation environment, the detailed MATLAB/Simulink model was implemented with a reduced number of submodules per arm. This simplification preserves the operating principle of both the converter and the control strategies without compromising the main dynamic analysis of the system. Therefore, although the converter is theoretically designed with 128 submodules per arm, the detailed simulations are performed using 32 submodules per arm ($N = 32$) to ensure computational feasibility with the available simulation resources. This leads to a nominal voltage per submodule of:

$$Vc = \frac{V_{DC}}{N} = \frac{800kV}{32} = 25\ kV \quad (23)$$

B. Implementation in MATLAB/Simulink

The system simulations are performed in the MATLAB/Simulink environment, resulting in the complete model presented in Fig 8. A sampling frequency of 10 kHz was considered for the control system signals. The total simulation time is set to 7 seconds, allowing the analysis of both the transient response and the steady-state operation of the system.

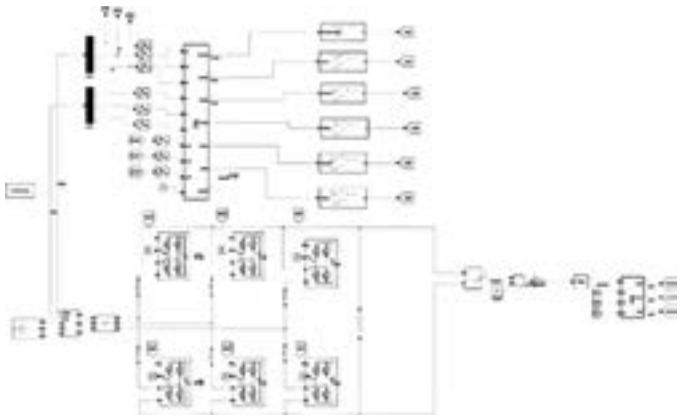


Fig. 8. System diagram in MATLAB/Simulink

In this model, the arm inductance is set to 50 mH, the capacitance of each submodule capacitor is 5 mF, and the filter inductance is set to 120 mH.

For the case analyzed in this work, 32 submodules per arm are considered. Therefore, the phase shift angle between the carrier signals in the PSC-PWM strategy is defined as:

$$\phi_c = \frac{360^\circ}{32} = 11.25^\circ \quad (24)$$

Additionally, a phase shift between the carrier signals of the upper and lower arms can be considered, defined as:

$$\phi_{ci} = \frac{360^\circ}{2 * 32} = 5.625^\circ \quad (25)$$

These values allow the switching actions to be uniformly distributed over time, thereby improving the output waveform quality and reducing the harmonic content generated by the converter.

Furthermore, the operating frequency of the IGBTs is calculated as follows:

$$f = \frac{f_s}{N} = \frac{10000}{32} = 312.5Hz \quad (26)$$

To ensure a stable and realistic simulation startup, appropriate initial conditions are defined for the main system variables, thereby preventing undesired transient responses at the beginning of the simulation. In particular, the voltages across the submodule capacitors are initialized at 25 kV in t=0 s. Additionally, the main variables of interest, including the AC-side current, reference current, DC-link voltage, and transferred power, are monitored and recorded for subsequent analysis of the system dynamic performance.

V. Results

Fig. 9 presents the DC-side voltage response. An initial transient behavior lasting approximately 5 s can be observed, after which the system reaches steady-state operation. Under steady-state conditions, the DC voltage accurately tracks the reference value of 800 kV, thereby validating the proper performance of the DC-bus voltage control loop (outer loop).

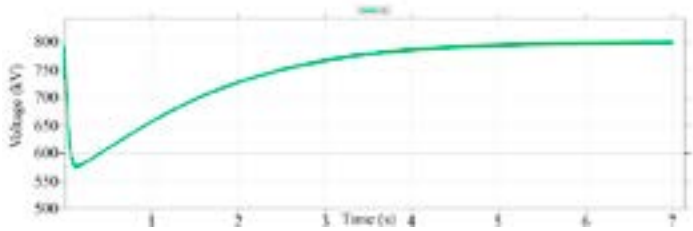


Fig. 9. DC bus voltage over the entire simulation interval.

Fig. 10 shows a zoomed view of the DC bus voltage under steady-state conditions. The peak-to-peak ripple in V_{DC} is defined as the difference between its maximum and minimum values, $\Delta V_{DC} = V_{DC,max} - V_{DC,min}$. The resulting DC-voltage ripple is approximately 5 kV.

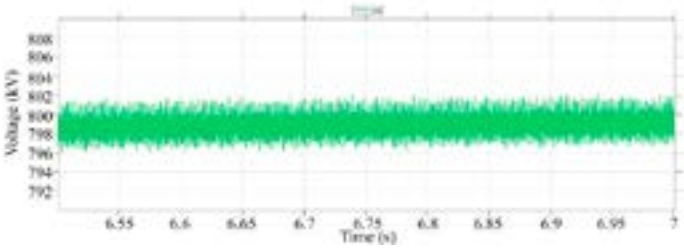


Fig. 10. Detailed view of the DC bus voltage in steady-state.

Fig. 11 presents the reference and measured current demanded from the grid for phase *a* under steady-state conditions. The measured current closely tracks the reference signal, exhibiting only a slight phase shift that can be attributed to the effect of the arm inductance. As observed, the current waveform remains stable and sinusoidal, reaching a peak value of approximately 4782 A. These results validate the proper operation of both the current control loop and the PSC-PWM modulation strategy.

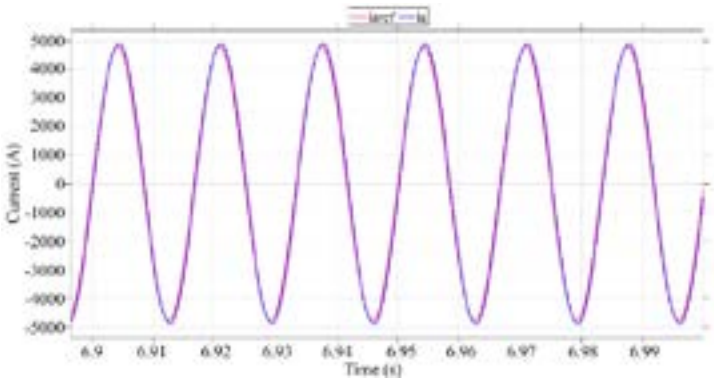


Fig. 11. Detailed view of the reference and measured current demanded from the grid for phase *a* in steady-state.

Fig. 12 shows the currents demanded from the grid for the three phases under steady-state conditions. As observed, the currents exhibit balanced sinusoidal waveforms, thereby confirming the proper performance of the inner current control loop.

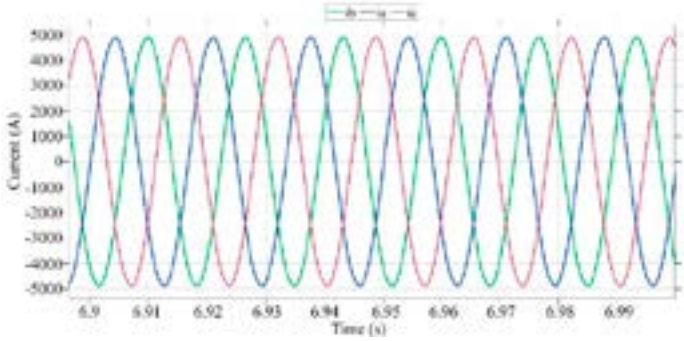


Fig. 12. Detailed view of the three-phase currents demanded from the grid under steady-state conditions.

Regarding the voltage behavior of the submodule capacitors (see Fig. 13), a transient response followed by a balancing and stabilization process around 25 kV can be observed. This behavior is attributed to the employed modulation strategy, thereby confirming its proper operation.

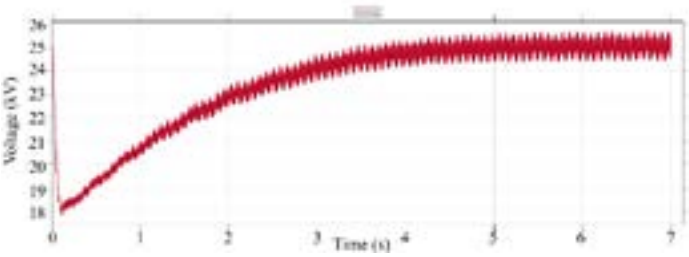


Fig. 13. Voltage behavior of one submodule capacitor over the total simulation time.

Under steady-state conditions, the capacitor voltages exhibit a peak-to-peak ripple of approximately 1 kV, as shown in Fig. 14.

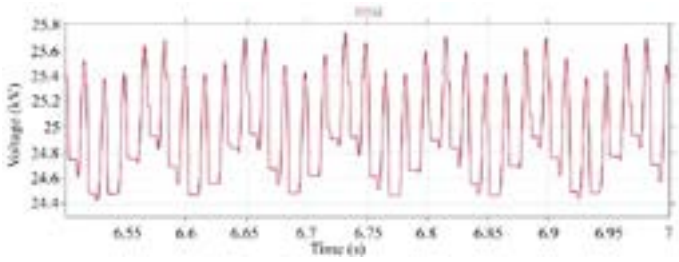


Fig. 14. Detailed view of the submodule capacitor voltage in steady-state.

Finally, Fig. 15 shows the power consumed by the rectifier over the 7 s simulation interval. Under steady-state conditions, the transferred power reaches approximately 3 GW, corresponding to the nominal operating point defined for the system.

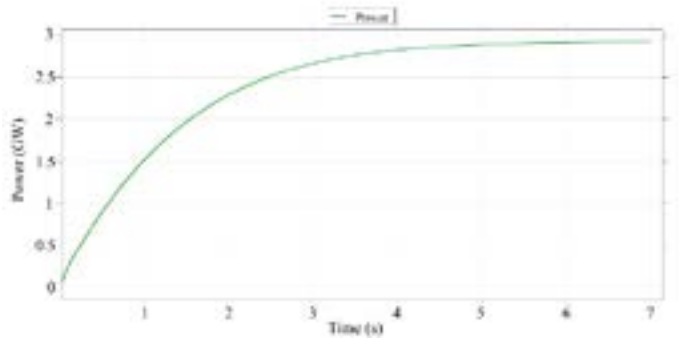


Fig. 15. Power consumed over the entire simulation interval.

Table III summarizes the rectifier performance parameters in order to evaluate its overall behavior. Most of these values were obtained directly in MATLAB using measurement blocks to compute quantities such as total harmonic distortion (THD), root mean square (RMS) values, average values, and root mean square error (MSE).

Based on these measurements, the THD of the current demanded from the grid for phase *a*, the form factor of the DC-bus voltage, the peak-to-peak ripple of both the DC-bus voltage and the submodule capacitor voltages, as well as the root mean square error (MSE) associated with the tracking of both the reference current for phase *a* and the DC-bus voltage, were determined. These metrics allow the tracking accuracy of these signals to be quantitatively evaluated.

TABLE IIIII. RECTIFIER PERFORMANCE PARAMETERS

Parameter	**Value**
THD of i_a	0.4195 %
Form factor of V_{DC}	1.0000
Peak-to-peak ripple of V_{DC}	~5 kV
Peak-to-peak ripple of V_C	~1 kV
MSE of V_{DC} tracking	1138.1354 V
MSE of i_a tracking	211.4678 A

As shown in Table III, the current demanded from the grid exhibits very low harmonic distortion, below 1%, indicating the high quality of the AC-side current waveform, which is nearly sinusoidal. Additionally, the DC bus voltage presents a form factor very close to unity, demonstrating the proper performance of the rectification process.

VI. CONCLUSIONS

This paper presented the design and simulation-based implementation of a control strategy for an MMC with Full-Bridge submodules applied to a rectifier station in HVDC systems. The proposed control operates directly in the *abc* reference frame, thereby avoiding additional coordinate transformations and simplifying its implementation.

The system was dimensioned based on the Guajira–Cesar–Magdalena HVDC project in Colombia, considering an operating power of approximately 3 GW, an AC line voltage of 500 kV, and a DC bus voltage of 800 kV.

Simulation results in MATLAB/Simulink for a three-phase MMC with 32 submodules per arm demonstrate that the proposed strategy achieves stable operation after a transient period of approximately 5 s, reaching the desired steady-state operating point. The results show accurate tracking of key variables under steady-state operation, particularly the transferred power, which converges to the expected value of 3 GW. The DC bus voltage remains stable with low ripple, confirming proper regulation of the energy transfer. Although ripple is observed in both the DC voltage and submodule capacitor voltages, it remains within acceptable limits and can be further reduced by increasing the number of submodules per arm.

The PSC-PWM modulation strategy exhibits favorable performance, contributing to a natural balancing of submodule capacitor voltages and an adequate distribution of switching events, which helps reduce switching stress on power devices. Additionally, the harmonic analysis shows a current THD of 0.4195%, indicating high waveform quality and compliance with IEEE 519 standards. The error analysis confirms that the DC voltage deviation is small relative to its nominal value, while the current tracking error remains low, with minor transient deviations associated with the system dynamics. Overall, the proposed control strategy proves to be effective and suitable for high-power HVDC applications.

As recommendations for future work, it is proposed to implement simulation models capable of representing the complete MMC configuration with 128 submodules per arm by employing averaged submodule models or more advanced computational resources. In addition, the converter performance should be evaluated under non-ideal operating conditions, such as grid unbalances, load variations, and AC/DC-side disturbances, in order to further validate the robustness of the implemented control strategy. Finally, advanced control techniques for submodule capacitor voltage balancing should be incorporated while considering practical non-idealities, including switching-time differences, component tolerances, circulating currents, and converter asymmetries.

REFERENCES

[1] M. H. Okba, M. H. Saied, M. Z. Mostafa, and T. M. Abdel-Moneim, "High voltage direct current transmission: A review, part I," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012.

[2] M. K. Bucher and C. M. Franck, "Contribution of multi-terminal VSC HVDC to the frequency containment reserve of power systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 113, 109246, 2019.

[3] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), "Plan de expansión de referencia generación - transmisión 2022-2036," Ministerio de Minas y Energía, 2022.

[4] S. Du, A. Dekka, B. Wu, and N. R. Zargari, Modular Multilevel Converters: Analysis, Control, and Applications. IEEE Press/Wiley, 2018.

[5] H. Saad and J. Mahseredjian, Modular Multilevel Converters: Modeling, Control and Applications. Wiley-IEEE Press, 2019.

[6] M. A. Mantilla, J. F. Petit, and G. Ordoñez, "Control of multi-functional grid-connected PV systems with load compensation under distorted and unbalanced grid voltages," Electric Power Systems Research, 2021

[7] G. A. Vargas Cáceres, J. C. Gélvez Lizarazo, M. A. Mantilla Villalobos, and J. F. Petit Suárez, Active Power Filters: A Comparative Analysis of Current Control Techniques. Universidad Industrial de Santander, 2010.

[8] Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), "SIP-013-2024," 2024. [Online]. Available: https://fenoge.gov.co/documentos-pdf/proveedores/SIP0132024/SIP-013-2024-FENOGE_signed.pdf

[9] Hitachi Energy. (s.f.). *Dry DC-link capacitors (DryDCap)*. https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/capacitors-and-filters/high-voltage-capacitors-and-filters/capacitor-units/dc-dry-type-capacitors-drydcap

[10] Infineon Technologies AG. (2024). *FZ1000R65KE4 datasheet*. https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/60/49/infineon-fz1000r65ke4-datasheet-en.pdf

[11] Trench Group, "Air core reactors for HVDC," 2024. [Online]. Available: https://trench-group.com/air-core-coils/acr-for-hvdc/

Impacts of Energy Communities: A Case Study of Renewable Energy Appropriation and Energy Efficiency.

Santiago Hoyos
Faculty of Engineering
Tecnológico de Antioquia I.U
Medellín, Colombia.
santiago.hoyos@tdea.edu.co

Joan Sebastián Ruíz Zapata
Faculty of Engineering
Tecnológico de Antioquia I.U
Medellín, Colombia
joan.ruiz44@tdea.edu.co

Andrés Montoya
Faculty of Engineering
Tecnológico de Antioquia I.U
Medellín, Colombia
fac.ingenieria@tdea.eduu.co

***Abstract*—This article presents the impacts of energy communities in Colombia. Environmental impacts are assessed in terms of CO2e emissions; economic impacts are measured through energy prices; and systemic impacts are evaluated based on energy consumption reductions. These results are derived from a system dynamics simulation model that approximates the functioning of the Colombian electricity market and its current regulatory framework for energy communities.**

Keywords: Energy communities, Photovoltaic self-generation, System dynamics, Energy transition, Net metering

I. Introduction

The energy transition is a fundamental process for addressing the climate crisis and achieving the Sustainable Development Goals promoted by the United Nations. According to the United Nations Development Programme (UNDP, 2025), this process seeks to progressively replace fossil fuels with renewable energy sources, both on the supply and demand sides, transforming the way economic sectors and households produce and consume energy. In this context, energy communities emerge as a relevant strategy for accelerating the energy transition, as they contribute to reducing

CO2 emissions and lowering energy costs for households and businesses, thereby enhancing their sustainability and competitiveness.

Globally, energy-related carbon dioxide emissions reached approximately 37,723 Mt CO2 in 2023. The largest share came from coal combustion (45%), followed by oil (33%) and natural gas (22%) (IEA, 2025). The sectors with the highest emissions were electricity and heat generation, as well as final energy consumption in industrial activities, transportation, and buildings. The

industrial sector accounted for 46% of final emissions, transportation for 41%, and buildings for 14% (IEA, 2025).

In Colombia, although the largest emissions come from agriculture, livestock, and land use—responsible for more than 55% of the total—the energy sector contributes approximately 32%, equivalent to 91.6 Mt CO2 in 2021 (IDEAM, 2024).

Within this sector, transportation is the main contributor with 46% of emissions, followed by energy generation and industry. Compared to the global context, Colombia's energy-related emissions represent only 0.6% of worldwide emissions.

Global energy consumption in 2023 was concentrated primarily in transportation, industry, and buildings. Fossil fuels represented 67% of total global energy consumption (EIA, 2025). Colombia presents a similar structure, where transportation accounts for 42% of energy consumption, followed by industry and the residential sector. Approximately 70% of the energy consumed in the country comes from fossil fuels, mainly oil and natural gas (UPME, 2025a). Colombia's final energy consumption represents approximately 0.34% of global consumption.

Regarding electricity generation, the world still largely depends on non-renewable sources. Although 45% of installed global capacity corresponds to renewable energy, effective generation continues to be dominated by fossil fuels (IEA, 2025). Colombia, in contrast, has a cleaner electricity mix, with 70% of installed capacity from renewables and electricity generation composed 77% of renewable sources, mainly hydropower (XM, 2024). However, solar energy participation remains low compared to the global average.

In socioeconomic terms, Colombia represents approximately 0.65% of the world's population and 0.21% of global GDP. Additionally, global per capita income is approximately three times higher than Colombia's. This is compounded by high economic inequality, reflected in a GINI coefficient of 0.546 and the fact that 33% of the population lives in poverty (DANE, 2024, 2024a, 2024b; WB, 2025). The article concludes by noting that energy communities and their impacts on the electricity market, the economy, and the environment will be analyzed subsequently.

The Indicative Action Plan of the Rational and Efficient Energy Use Program (PAI-PROURE) 2022–2030 shows that the potential for efficiency in the country's energy consumption corresponds to 1,688 PJ, of which the tertiary sector—which includes the public sector—would contribute 0.78%. The Useful

Energy Balance indicates that with the adoption of best available technologies, savings of 27% could be achieved (UPME, 2024).

II. Modeling

A. Causality and Effect

A model is described that focuses on the electricity consumption of Colombian households and on the gradual incorporation of solar photovoltaic systems and energy efficiency measures. These systems allow a reduction in dependence on the centralized electricity grid, generate savings in energy expenditures through the net metering mechanism, and provide additional income from the sale of energy surpluses to the electricity system (CREG, 2021).

The collective incorporation of renewable energy and energy efficiency measures in households gives rise to energy communities.

The model also establishes an equilibrium cycle that regulates the growth of installed capacity of Non-Conventional Renewable Energy Sources (NCRES), with the objective of gradually reaching the government's target of a 4% share in the energy commercialization market, as well as the corresponding reduction in consumption through efficiency measures such as appliance replacement. This depends on the impact of public policies and household decisions. Likewise, a balance is maintained between self-generation, efficiency, and energy consumption to ensure the stability of the energy and economic system.

Like energy efficiency measures, local renewable energy systems—especially residential photovoltaic systems—generate environmental benefits by reducing pollutant emissions and economic benefits through savings on energy costs and the possibility of earning income from the sale of electricity surpluses.

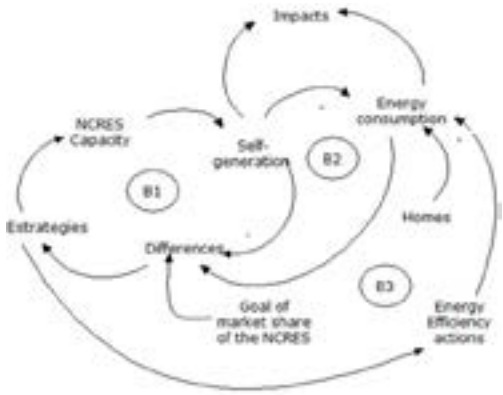


Figure 1 Causal Diagram modified from (Hoyos et al, 2026)

B. Functional Relationships

Residential energy consumption depends on population growth and average household consumption, as well as the established efficiency factor.

$$P(t) = P(t-1)(1+r_p)$$
$$NH(t) = \frac{P(t)}{NPF}$$
$$CEH(t) = CEH(t-1)(1+r_{CEH})$$
$$CE(t) = \frac{NH(t) \times CEH(t)}{10^6} * (1 - \mathrm{FE(t)})$$

Donde:

- $P(t)$: population.
- $NH(t)$: number of households.
- NPF: persons per household.
- $CEH(t)$: average consumption per household.
- $CE(t)$: total residential consumption in GWh.
- $(1 - \mathrm{FE(t)})$: effect of the efficiency factor on consumption reduction over time.

Energy communities are based on self-generation and distributed generation, reducing energy demand on the centralized system.

Self-generated energy from photovoltaic systems is calculated as:

$$AG(t) = CAPAG(t) \times HPS \times (1 - P)$$

Donde:

- $CAPAG$: capacidad instalada.
- HPS: peak solar hours.
- P: technical losses.

Generated energy is divided between self-consumption and grid injection:

$$AG_{AC}(t) = AG(t) \times F_{AC}$$
$$AG_{SIN}(t) = AG(t) \times F_{SIN}$$
$$F_{AC} + F_{SIN} = 1$$

Injected energy can be allocated to net metering or sale:

$$AG_{Neteo}(t) = AG_{SIN}(t) \times F_{Neteo}$$
$$AG_{Venta}(t) = AG_{SIN}(t) \times F_{ve}$$
$$F_{Neteo} + F_{ve} = 1$$

Self-generation reduces CO_2 emissions by decreasing grid energy consumption.

Emissions avoided through self-consumption:

$$E_{AC} = AG_{AC}(t) \times FE_{SIN}$$

Emissions avoided by solar energy injection to the grid:

$$E_{Red} = AG_{SIN}(t) \times FE_{Solar}$$

Donde:

- FE_{SIN}: factor de emisión del sistema eléctrico.
- FE_{Solar}: factor de emisión de la energía solar.

Identify applicable funding agency here. If none, delete this text box.

Economic benefits come from savings and income from the sale of energy surpluses.

Savings from self-consumption

$$A_{AC}(t) = AG_{AC}(t) \times Tarifa(t)$$

The tariff evolves as:

$$Tarifa(t) = Tarifa(t-1)(1 + r_{tarifa})$$

Savings from net metering

$$A_{Neteo}(t) = AG_{Neteo}(t) \times (Tarifa(t) - CV(t))$$

Income from surplus energy sales

$$I(t) = AG_{Venta}(t) \times P_c$$

Donde:

- $CV(t)$: commercialization cost.
- P_c: energy contract price.

Altogether, self-generation and energy efficiency measures at the residential level allow for a reduction in emissions, a decrease in energy costs, and the generation of additional income for households.

III. Case Study and Application

The case study of the simulation model focuses on the residential electricity consumer sector in Colombia, considered as a potential scenario for the development of energy communities. The model analyzes energy consumption in aggregate form, assuming similar consumption patterns across households.

According to the National Administrative Department of Statistics (DANE), Colombia had a population of 53 million inhabitants in 2024, with an average of 3.4 persons per household, equivalent to approximately 15.8 million households (DANE, 2025). The country has an electricity coverage rate of 93% and an average residential consumption of 161 kWh per month per household (UPME, 2023; SUI, 2025). The energy efficiency factor considered was 15% over a 10-year analysis horizon, applied linearly on an annual basis. These variables constitute the initial conditions of the simulation model.

The Colombian electricity market is divided into regulated and unregulated markets. The regulated market represents 69% and is composed mainly of residential users and small businesses, while the unregulated market corresponds mostly to the industrial sector and large companies (XM, 2025c). This highlights the importance of analyzing the residential sector within the energy transition and energy communities.

In economic terms, the average electricity tariff is COP $719/kWh with an annual growth rate of approximately 5%. The average energy price in contracts is COP $311/kWh with a growth rate close to 3% annually (XM, 2025).

From an environmental perspective, the emission factor of the National Interconnected System (SIN) is 0.117 tCO2e/MWh, while solar photovoltaic energy registers a factor of 0.34 tCO2e/MWh in avoided emissions accounting projects (UPME, 2024).

It is estimated that the technology adoption process for solar photovoltaic systems and the formation of energy communities in households requires approximately 18 months per unit, including permitting, investment, and installation, according to the Colombian Solar Energy Association.

IV. Results Analysis

A household with 1 kW of installed photovoltaic capacity costs approximately COP $8 million (USD $2,000). This installed capacity generates approximately 100 kWh/month.

Given the typical energy consumption patterns of Colombian households, 50% of the generated energy is self-consumed and 50% is injected into the grid.

Individual economic savings amount to approximately COP $430,000 per year.

A straightforward way to aggregate households into energy communities is to consider 10 households per community, with 10 kW of installed capacity per community.

With self-generation of 1,000 kWh/month per community, annual savings of COP $4,300,000 would be achieved.

The CO2 equivalent reduction per community would be 2 tCO2e/year.

Household energy consumption decreases from 2,740 kWh/month at the start of the simulation to 2,904 kWh/month per community by the end of the 10-year period, compared to an unconstrained scenario of 3,250 kWh/month. This represents an approximate energy saving of 11% per community.

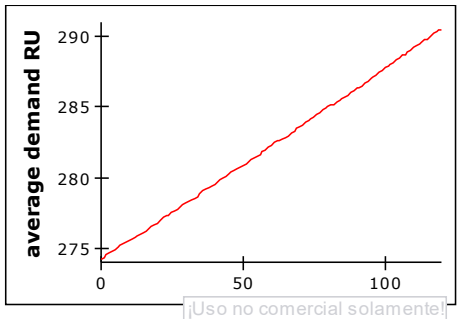


figure 2 Average energy consumption per household

At the end of the analysis period, total savings of USD $66 million per month would be achieved, as shown in the following figure.

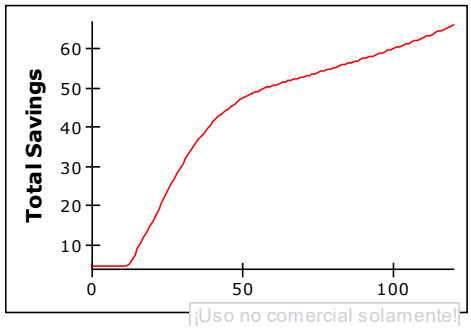


figure 3 Total savings

V. Conclusions

Colombia has a limited global share in energy, economic, demographic, and pollution terms, contributing less than 1% in indicators such as installed and generated electricity capacity, energy consumption, GDP, and CO2 emissions from the energy sector. However, as occurs globally, the transportation and industrial sectors are the main energy consumers and pollution generators, which means the country must rethink its energy policy in the short and medium term toward an energy transition and its contribution to climate change mitigation.

Both in Colombia and worldwide, fossil fuels continue to represent approximately 70% of energy supply and consumption, evidencing the need for more effective public policies to advance the decarbonization of the economy and accelerate the energy transition.

Although Colombia has a higher share of renewable energy in its electricity mix compared to the global average—primarily due to its strong dependence on hydroelectric power—it has a low development of non-conventional sources such as solar photovoltaic energy, whose share is only 2%, compared to 17% at the global level.

A direct relationship was found between income and energy consumption, as energy is a driver of economic development. In this regard, when energy consumption comes from renewable sources, it contributes to sustainable development and climate change mitigation.

It is concluded that Colombia's energy communities policy must expand beyond electricity to include energy production and consumption across all economic activities and sectors, both in rural and urban areas.

The implementation of energy efficiency measures—such as unplugging appliances not in use, keeping the refrigerator closed when not in use, turning off lights when not needed (during the day), unplugging chargers after charging electronic devices, among others—generates significant environmental, technical, and economic impacts. The revolution of small actions: a small contribution in one household makes a cumulative difference for millions of households worldwide.

Acknowledgments

The authors of this article thank the Tecnológico de Antioquia I.U. for its technical and financial support through the Energy Communities project of the Research and Innovation Center, the GITIMA research group, and the Smart Energy research seedbed of the Faculty of Engineering.

References

[1] UNDP (2025). What is the Sustainable Energy Transition and Why is it Key to Tackling Climate Change? United Nations Development Programme, 3 February 2025. https://climatepromise.undp.org/news-and-stories/what-sustainable-energy-transition-and-why-it-key-tackling-climate-change (Accessed: July 2025)

[2] IEA (2024). World Energy Outlook 2024. International Energy Agency, 2025. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024

[3] IDEAM (2024). National Atmospheric Emissions Inventory of Colombia. Presentation at the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity, Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), Cali, 21 October 2024. https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/eventos/cali_presentacion_lanzamiento_cop.pdf.

[4] UPME (2025a). Plan 6GW+. Mining and Energy Planning Unit (UPME), May 2025. https://www.upme.gov.co/simec/ciclos-6gw/

[5] XM (2024). Experts in Markets – Information System and Data Source for the SIN and MEM.
https://sinergox.xm.com.co/oferta/Paginas/Informes/CapacidadEfectiva.aspx.

[6] DANE (2024). Gross Domestic Product by Department – Technical Bulletin. National Administrative Department of Statistics (DANE), Bogotá, 30 May 2024. https://www.dane.gov.co/files/operaciones/PIB/bol-PIBDep-2023pr.pdf

[7] DANE (2024). Press Release – National Quality of Life Survey 2024. National Administrative Department of Statistics (DANE), Bogotá, 24 April 2024. https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/calidad-de-vida-ecv/encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-ecv-2024

[8] DANE (2024b). Main Results – Monetary Poverty in Colombia 2023. National Administrative Department of Statistics (DANE), Bogotá, July 2024. https://www.dane.gov.co/files/operaciones/PM/cp-PMClaseSociales-2023.pdf

[9] World Bank (2025). World Bank Data. https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.CD?locations=CO (Accessed: 14 July 2025).

[10] UPME (2024). Resolution 16 of the 2024. "Baseline methodology and estimated savings". Mining and Energy Planning Unit (UPME). URL: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_upme_0016_2024.htm

[11] CREG (2021). Integration of Non-Conventional Renewable Energy Sources into the National Interconnected System - Self-generation and Distributed Generation. Resolution CREG 174 of 2021. URL: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0174_2021.htm

[12] XM (2025). Historical Electricity Demand in Colombia. Experts in Markets SINERGOX platform. https://www.xm.com.co/consumo/historicos-de-demanda

[13] UPME (2024). Energy Communities – Analysis for Defining Maximum Power and Distribution Limits for Collective Self-Generation and Collective Distributed Generation. Discussion Paper. Mining and Energy Planning Unit (UPME). https://www1.upme.gov.co/Documents/Enfoque-territorial/Paper_Mineria_Potencia_y_dispersion_CE.pdf (Accessed: 15 July 2025)

[14] Hoyos, S., Ruíz, S., Montoya Rendón, A. F., Gutiérrez, Y., Barrientos Marín, J. H., & Ramìrez, M. A. (2026). Effects of the Energy Communities: A Case of Application in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *16*(2), 854–864. https://doi.org/10.32479/ijeep.22644

Evaluación aerodinámica de venas guías omnidireccionales en una turbina Savonius para entornos urbanos utilizando OpenFOAM

Marcela, Montoya
Estudiante de Ingeniería Mecánica
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
marcela.montoya020@pascualbravo.edu.co

Jhon Fredy, Hincapie
Docente del departamento de Ingeniería Mecánica
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
jhon.hincapie@pascualbravo.edu.co

Ivan David Patiño
Docente del departamento de Ingeniería Mecánica
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
i.patinoar@pascualbravo.edu.co

Resumen*— Este estudio evalúa numéricamente la implementación de un dispositivo de venas guía omnidireccionales para una turbina eólica de eje vertical (VAWT) tipo Savonius para uso en entornos urbanos, caracterizados por viento a bajas velocidades, alta variabilidad direccional y altamente turbulentos. Las venas guía omnidireccionales (ODGV) son dispositivos periféricos diseñados para mejorar el rendimiento de las VAWT, permitiendo redirigir y concentrar el flujo de viento de los alrededores hacia el lado cóncavo de las palas. Disminuyendo el torque negativo en el lado convexo de las palas. La geometría propuesta en este proyecto emplea una configuración de perfiles aerodinámicos con una sección de entrada de gran apertura para la captación masiva del flujo de viento y una sección de salida suavizada para entregar el flujo de viento hacia la pala cóncava, reduciendo la separación de la capa limite y minimizando las perdidas asociadas a la turbulencia. Este estudio evaluó el desempeño aerodinámico de las turbinas tipo Savonius con venas guía omnidireccionales para captar energía eólica en entornos urbanos para diferentes condiciones de operación mediante simulaciones en 3D de dinámica de fluidos computacional (CFD) utilizando el software de código abierto OpenFOAM.

La implementación de estas configuraciones geométricas es fundamental para el desarrollo de sistemas de energía renovable, ya que las venas guía omnidireccionales permiten redirigir y concentrar el flujo de viento hacia las palas de las turbinas, reduciendo el torque negativo y mejorando el coeficiente de potencia para entornos urbanos.

Palabras clave*— Turbina Savonius, Venas guía omnidireccionales, OpenFOAM, Energía eólica, Aerodinámica de VAWT

I. INTRODUCCIÓN

La dependencia de combustibles fósiles ha generado una necesidad urgente de transición hacia fuentes de energía limpias y renovables. El uso del carbón, petróleo y gas es responsable del casi 90% de las emisiones de dióxido de carbono causadas por el hombre, lo que ha contribuido al incremento a los cambios climáticos [1]. Ante este panorama, que amenaza la salud pública con millones de muertes prematuras y pone en peligro la estabilidad de la vida en la Tierra, las energías renovables se han consolidado como una alternativa fundamental para mitigar el cambio climático y alcanzar el objetivo de Neto Cero para 2050 [1][2]. En este contexto, esta crisis es el principal motor de innovación en el sector de las energías renovables, donde la energía eólica destaca por su alta rentabilidad y rendimiento [3]. De esta manera, estas fuentes limpias permiten una transición energética justa, reduciendo la dependencia de recursos no renovables y minimizando la degradación ambiental [4]

Existen distintos tipos de energías renovables, destacando la energía solar, la hidráulica, la geotérmica y la eólica. Entre estas, la energía eólica es considerada una de las opciones con mayor potencial debido a su alta rentabilidad y rendimiento [5]. En este sentido, ésta funciona con recursos de una fuente limpia, abundante en la mayoría del planeta y de bajo costo, lo que la posiciona como un pilar fundamental en los planes globales de energía sostenible [6]. Asimismo, los avances tecnológicos han permitido que la energía eólica sea menos costosa que la electricidad generada por combustibles fósiles, lo que, a su vez, facilita el suministro eléctrico en diversos sectores económicos [1]. Dentro de la energía eólica, estos dispositivos se clasifican según la orientación de su eje de rotación con respecto a la dirección del viento: turbinas de eje horizontal (HAWT) y turbinas de eje vertical (VAWT). En particular, las VAWT son especialmente adecuadas para aplicaciones en entornos urbanos debido a su naturaleza omnidireccional, lo que les permite captar el viento desde cualquier dirección sin necesidad de mecanismos de ajuste [5].

Uno de los modelos VAWT más comunes es la turbina tipo Savonius, la cual se caracteriza por su geometría simple, bajo costo de fabricación, capacidad de autoarranque y elevado torque inicial [4], permitiendo operar de manera silenciosa y robusta incluso ante velocidades de viento reducidas [7]. Sin embargo, tiene limitaciones críticas como una baja eficiencia aerodinámica y la aparición de un torque negativo; mientras una pala recibe el viento en su superficie cóncava para generar par positivo, la otra superficie convexa se desplaza en sentido opuesto al flujo de viento generando torque negativo [4]. Para mejorar su desempeño, diversas investigaciones han propuesto el uso de venas guía omnidireccionales (ODGV) que concentran el flujo de viento hacia las palas cóncavas y bloquean el viento en las palas convexas para reducir el torque negativo [3]. Bajo este enfoque, Alli y Jayavel (2019) demostraron por medio de simulaciones numéricas que el uso de ODGV puede incrementar significativamente el coeficiente de potencia [4], otros estudios

como los de Sugiharto (2019) y Zemamou (2020) han explorado la optimización geométrica de las palas mediante curvas de Bézier para maximizar la extracción de energía en zonas de vientos moderados [8][9]. De igual manera, Tjahjana et al. (2019) estudiaron cómo diferentes ángulos de inclinación en las ODGV afectan el rendimiento, encontrando que un ángulo de 60° es óptimo para captar vientos urbanos [7]. La mayoría de estas investigaciones se han centrado únicamente en variaciones de numero de venas guía, sus ángulos de inclinación y la utilización de perfiles planos o curvos para su construcción, existiendo una carencia de información sobre cómo interactúa el flujo de viento entre las venas guía (estátor) y la turbina Savonius (rotor) bajo diferentes condiciones de flujo. Al mismo tiempo que hay pocos trabajos que profundicen en cómo evitar la separación del flujo de aire en la superficie de las venas guía antes de llegar al rotor y como afectan los perfiles aerodinámicos del estator para reducir la separación de la capa limite.

En este estudio se propone la implementación de un dispositivo de venas guía omnidireccionales para una turbina eólica de eje vertical (VAWT) tipo Savonius para uso en entornos urbanos, caracterizados por viento a bajas velocidades, variables y altamente turbulentos. La geometría propuesta en este proyecto emplea una configuración de perfiles aerodinámicos con una sección de entrada de gran apertura para la captación de un mayor caudal de flujo de viento y una sección de salida suavizada para entregar el flujo de viento hacia la pala cóncava, reduciendo la separación de la capa limite y minimizando las perdidas asociadas a la turbulencia.

II. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el dominio computacional, el modelado geométrico, la generación de malla y las condiciones de frontera utilizadas en las simulaciones. Además, se presenta el análisis de sensibilidad de malla y la validación del modelo computacional utilizado para evaluar el desempeño aerodinámico de la turbina Savonius con y sin ODGV.

A. Parámetros de Evaluación del Desempeño

El desempeño aerodinámico de la turbina Savonius se evaluó mediante parámetros adimensionales, especialmente el coeficiente de potencia (C_p), el coeficiente de torque (C_t) y la relación de velocidad de punta (TSR). Estos parámetros permiten comparar el rendimiento de la turbina independientemente de su escala física o de la velocidad específica del viento. Permitiendo evaluar la eficiencia de cualquier diseño que sea dimensionalmente similar [10].

El coeficiente de potencia se define como la relación entre la potencia mecánica extraída por la turbina y la potencia disponible en el flujo de viento. Esta se calcula de la siguiente forma:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V^3} \quad (1)$$

Por su parte, el coeficiente de torque permite cuantificar la capacidad de la turbina para generar torque aerodinámico bajo una configuración geométrica. Esta se calcula de la siguiente forma:

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A V^2 D} \quad (2)$$

Finalmente, la relación de velocidad de punta TSR (tip speed ratio), se emplea para relacionar la velocidad tangencial del extremo de la pala con la velocidad del flujo de viento entrante. Esta se calcula de la siguiente forma:

$$TSR = \frac{2\pi R}{60V} \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad del aire $[kg/m^3]$, A es el área frontal de la turbina $[m^2]$ y V es la velocidad del viento [m/s], T es el torque [Nm] y ω la velocidad angular [rad/s], l es la distancia del radio [m], R el radio del rotor [m]. Estos parámetros permiten comparar el rendimiento aerodinámico y la capacidad de conversión de energía eólica asociados a cada configuración geométrica, así como establecer relaciones directas entre la geometría de las venas guía y la generación de torque sobre las superficies de las palas.

B. Diseño Geométrico de la Turbina y de las Venas Guía

En este trabajo se utilizó una turbina Savonius tridimensional compuesta por dos palas semicirculares, caracterizada por una geometría simple que transforma la energía cinética del viento a través de fuerzas de arrastre [8]. La turbina Savonius consta de dos palas con perfil semicircular convencional, con un radio r_p = 0.0575 [m], un diámetro de la turbina de D = 0.20 [m], una altura de la turbina de H = 0.20 [m], un diámetro de un diámetro de placa terminales de D_0 = 1.1 D, y una relación de solapamiento, e/D = 0.15, que tiene un papel fundamental en el comportamiento aerodinámico y la generación del torque. El espesor de las palas, para todos los casos, fue de 4 [mm].

El diseño de las ODGV tiene como propósito redirigir el flujo de entrada hacia la superficie cóncava de las palas, disminuyendo el torque negativo en la superficie convexa. Para este fin, se dispone un estator fijo dotado de venas guía que rodea la turbina Savonius. Cada vena guía presenta un perfil aerodinámico con geometría asimétrica, con una sección de entrada de amplia apertura, diseñada para capturar y redirigir un mayor caudal de flujo de viento hacia la turbina. Y una sección de salida suavizada para entregar el flujo de viento hacia la pala cóncava, reduciendo la separación de la capa limite y minimizando las perdidas por turbulencia.

La configuración geométrica de las venas guía fue construida a partir del área proyectada del lado convexo de la pala de la turbina Savonius sobre el diámetro interior, D_{int} = 0.243 [m], y el diámetro exterior, D_{ext} = 0.40 [m], del estator. Con un ángulo de α = 30° y otra de β = 15° con respecto a la línea de proyección, redondeos de 0.010 [m] en sus artistas, y con cinco venas guía igualmente espaciadas, permitiendo dirigir progresivamente el flujo hacia la zona de trabajo de la pala cóncava. Logrando un balance ente la captura de los flujos de viento y la obstrucción de la superficie convexa de la turbina Savonius. Adicionalmente, las venas guía presentan una inclinación de γ = 35° en sentido axial, desde el D_{ext} hacia el D_{int}, del estator fijo, favoreciendo la conducción del flujo hacia

las palas de la turbina. Finalmente, la sección de salida del estator presenta una transición gradual, reduciendo la separación de la capa límite y minimizan las pérdidas asociadas a la turbulencia. Como se muestra en la Fig. 1.

C. *Generación de Malla*

La malla fue generada con las herramientas de OpenFOAM, blockMesh que crea una malla base y snappyHexMesh que ajusta la malla base a superficies más complejas. Se creó una zona de refinamiento local alrededor de la turbina Savonius con ODGV, mejorando la precisión de los flujos separados o de estela encontrado en cada simulación. Adicionalmente, sobre las superficies de las palas se establecieron capas prismáticas de inflado, con una relación de crecimiento de 1.15 y una altura inicial de 0.25 [mm]. Permitiendo controlar el valor del y+<30, adecuado para simulaciones de turbomáquinas. El tamaño de las capas de inflación y las celdas cercana a las palas de la turbina Savonius desempeña un papel fundamental en la precisión de las simulaciones, especialmente en la predicción de la separa de flujo y del torque aerodinámico. Ver Fig. 2.

D. *Condiciones de Frontera*

Las ecuaciones que describen el flujo turbulento incompresible, adiabático y transitorio fueron modeladas mediante las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS), utilizando el método de volúmenes finitos. Se asignaron las condiciones de frontera al dominio computacional. Para la región rectangular fija se tiene que la superficie de entrada tiene una velocidad constante de 6 m/s, y una intensidad turbulenta de 0.05%. La superficie de salida tiene una presión fija de cero, las superficies laterales se aplicó una condición de deslizamiento (slip). La turbina y las venas guía tiene una condición de no deslizamiento (noSlip). La región cilíndrica giratoria se aceleró mediante una rampa lineal de velocidad angular, ω. La rotación se inició mediante una rampa de aceleración entre 0 [s] a 4 [s], donde la velocidad angular aumenta linealmente hasta alcanzar el valor definido por el TSR. A partir de los 4 [s], la velocidad angular se mantiene constante. La velocidad angular para la región cilíndrica giratoria en cada simulación se definió en función del TSR. La interfaz deslizante se definió mediante una condición de tipo cyclicAMI, el cual permite la transferencia de información entre mallas que no comparten nodos ni caras coincidentes. Para todas las simulaciones realizadas, el fluido de trabajo fue aire a 20 °C, con sus propiedades constantes; densidad de 1,225 [kg/m³] y una viscosidad cinemática de 1.7894×10^{-5} [kg/m·s]. Estas se muestran en la Fig. 3.

El dominio computacional está compuesto por dos regiones separadas por una interfaz deslizante. Una región cilíndrica giratoria, donde se encuentra inmersa la turbina Savonius, y una región rectangular fija, donde se representa el entorno circundante. La región cilíndrica giratoria tiene un diámetro de 0.231 [m] y una altura de 0.248 [m], y se encuentra centrada respecto al eje de rotación de la turbina Savonius. Adicionalmente, se cuenta con un volumen rectangular que ayuda al refinamiento de la malla. Las dimensiones del dominio rectangular fijo se determinaron en función del diámetro de la turbina. El dominio se extiende 8D aguas arriba, 16D aguas debajo de la turbina, y se estableció una sección transversal cuadrada de 12D, distancia suficiente para evitar perturbaciones en el campo de flujo.

Según la revisión bibliográfica realizada, uno de los modelos de turbulencia de dos ecuaciones más utilizado es el modelo κ-OmegaSST (Shear Stress Transport), que garantiza una buena precisión en los gradientes de presión y los flujos separados alrededor de cuerpos con superficies complejas, como son las

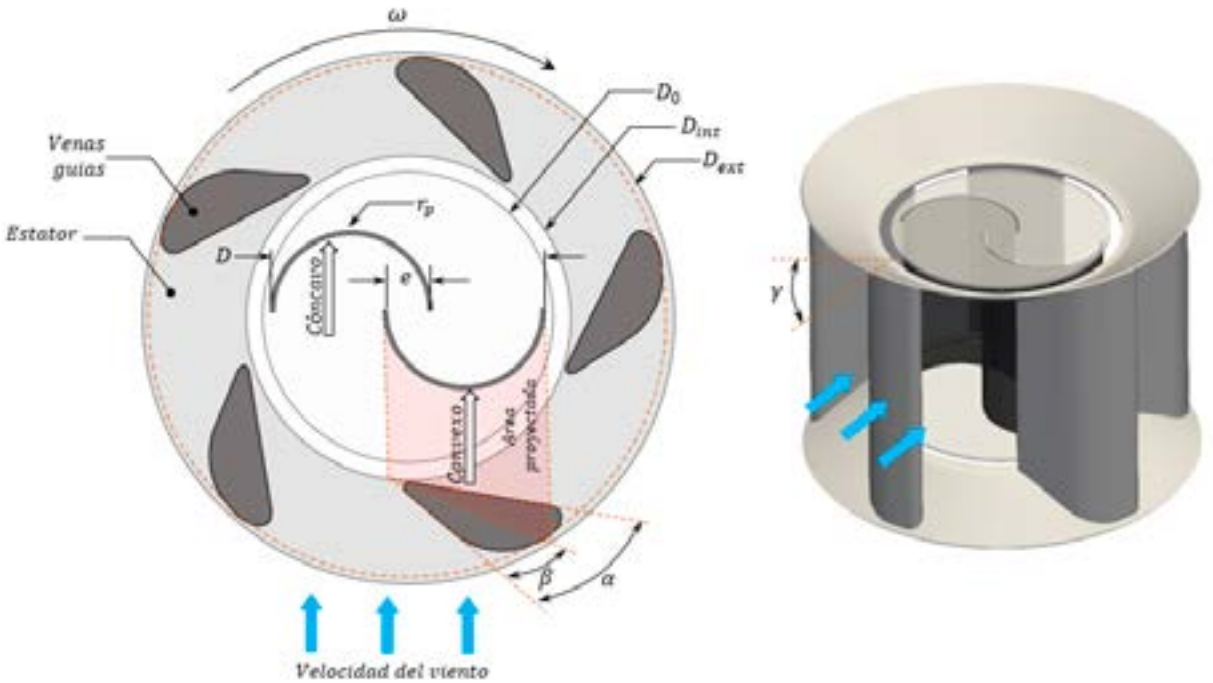


Fig. 1. Configuración geométrica de la turbina Savonius con ODGV

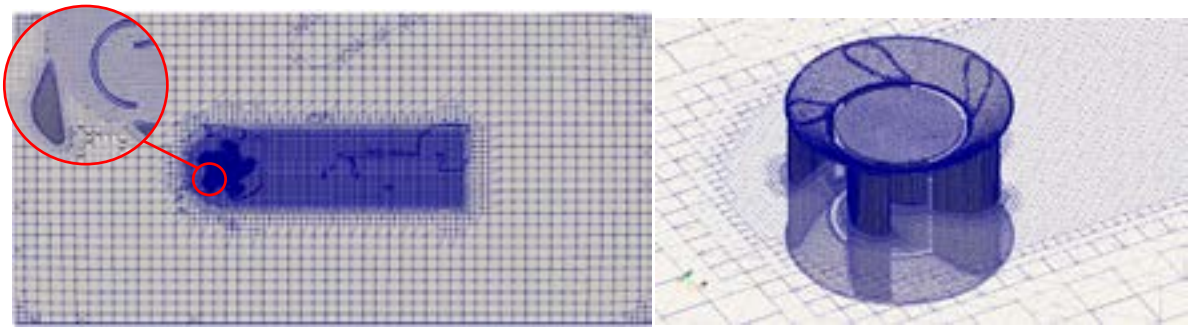


Fig. 2. Configuración de malla

turbinas Savonius [11]. Este modelo de turbulencia combina la robustez de la formulación κ-ω en las regiones cercanas a la pared y la formulación κ-ε en las regiones lejanas a la pared, lo que lo hace adecuada para capturar los flujos separados alrededor de las superficies complejas [12].

Se utilizó el solucionador pimpleFoam para realizar las simulaciones transitorias en el dominio computacional con interfaz deslizante. Este solucionador emplea un algoritmo hibrido PIMPLE (PISO-SIMPLE) para acoplar los campos de presión y velocidad, permitiendo el uso de pasos de tiempo (Δt) más grandes respecto al algoritmo PISO clásico. Los pasos de tiempo para simulaciones transitorias con métodos explícitos son controlados por el número de Courant-Friedrichs-Lewy, (CFL). En este estudio se empleó un número máximo de Courant, CFL< 30, con el fin de garantizar la estabilidad y precisión numérica necesaria en análisis con dominios con partes móviles.

III. Sensibilidad de malla y validación

Con el fin de garantizar la precisión de los resultados obtenidos se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de malla variando el número de celdas en cada simulación. En la Fig. 4 se muestran los valores obtenidos, del torque en el lado cóncavo y convexo de las palas de la turbina Savonius. Adicionalmente, se calculó el torque total. Se puede apreciar que el T_{Total} tiende a estabilizarse a partir de 2.20×10^6 celdas, con una variación menor al 2%, respecto a mallas más refinadas. La misma tendencia se puede apreciar para $T_{Cóncavo}$ y $T_{convexo}$, indicando una baja dependencia de los resultados obtenidos frente a la malla utilizada. Ofreciendo un equilibrio entre precisión numérica y costo computacional.

El modelo computacional realizado en OpenFOAM se validó comparando el coeficiente de potencia, C_p, obtenido numéricamente con los resultados analíticos publicado por Budi Sugiharto, Sudjito Soeparman, Denny Widhiyanuriyawan and

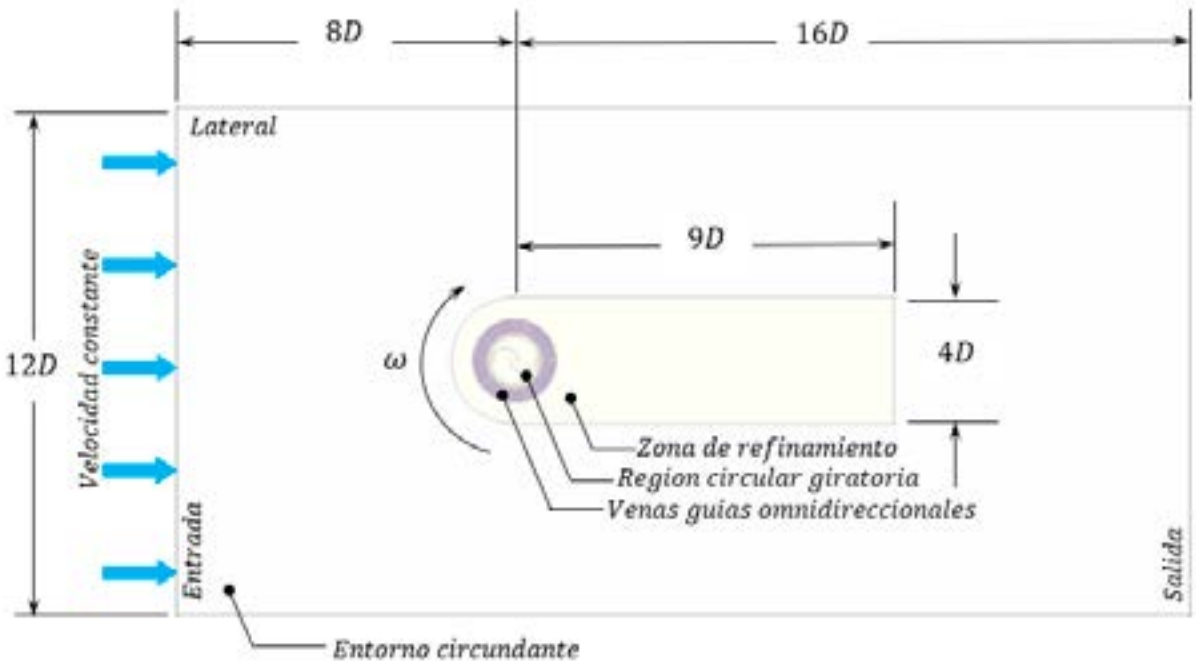


Fig. 3. Condiciones de frontera utilizadas en la simulación numérica

Slamet Wahyudi [13], para diferentes TSR. Para esto, se utilizó una turbina Savonius sin ODGV, con las mismas características geométricas, permitiendo reproducir el comportamiento aerodinámico de la turbina antes de incorporar el efecto de los dispositivos de dirección de flujo. Los resultados presentados en la Fig. 5, muestran una tendencia entre los valores obtenidos del C_p OpenFOAM y el C_p Analítico. El modelo computacional realizado en OpenFOAM reproduce con precisión el C_p a bajos índices de TSR, cercana al rendimiento máximo de la turbina. Mientras que, a valores de TSR más altos, se presenta una desviación entre los resultados numéricos con los analíticos. Esto puede atribuirse al comportamiento turbulento del fluido, efectos transitorios o la interacción dinámica entre la turbina y el entorno circundante.

Por último, el uso de interfaz deslizante en las simulaciones permitió representar con precisión el movimiento giratorio entre la región cilíndrica giratoria y la región rectangular fija, proporcionando una estrategia numérica adecuada para capturar los efectos asociados a cuerpo giratorios en este tipo de simulaciones transitorias. Esta estrategia resulta especialmente relevante en las turbinas Savonius, donde el torque y el C_p dependen en gran medida de la posición angular de la turbina, la separación de flujo, la formación de vórtices y la variación de las fuerzas aerodinámicas.

IV. Resultados y Discusión

En la Fig. 6 se muestra el torque total de unas turbinas Savonius sin ODGV (línea roja) y con ODGV (línea negra), en función del tiempo. La simulación tuvo una duración de 10 [s]. Durante los primeros 4 [s] se aplicó una rampa de aceleración para la velocidad angular, a partir 4 [s], la velocidad angular se mantuvo constante, con el fin de mejorar la estabilidad de la solución durante los primeros pasos de tiempo. El signo negativo del torque se debe al sistema de referencia adoptado por la rotación de la región cilíndrica en OpenFOAM.

A partir de los 4 [s], cuando la velocidad angular permanece constante, ambas configuraciones presentan un comportamiento periódico asociado al paso de las palas durante la rotación. Sin embargo, la turbina Savonius con ODGV mantiene valores de torque con una mayor magnitud en comparación con la turbina Savonius sin ODGV. Indicando una mejora en el aprovechamiento de la energía cinética del flujo de viento incidente sobre la superficie cóncava de la pala, favoreciendo el desempeño aerodinámico. Esto sugiere que las ODGV pueden mejorar la generación de torque y el desempeño operativo de la turbina Savonius bajo las condiciones simuladas.

Los valores del coeficiente de potencia, C_p, obtenidos para diferentes TSR de una turbina Savonius sin y con ODGV se muestran en la Fig. 7. La línea punteada corresponde a los valores obtenidos numéricamente para una configuración sin ODGV. Por su parte, los triángulos corresponden a los valores obtenidos numéricamente para una configuración con ODGV.

Se observa que la turbina Savonius con ODGV presenta valores superiores de C_p en todos los valores de TSR evaluados. Donde, el C_p alcanza valores cercanos al 22 – 23 % para valores de TSR entre 0.6 a 0.7, superando el desempeño de la turbina Savonius sin ODGV. Este incremento puede atribuirse al efecto de las ODGV sobre la dirección del flujo, ya que este dispositivo favorece la canalización del viento hacia las superficies cóncava de las palas y reduce parcialmente la incidencia hacia las superficies convexa de las palas, generando un mayor torque, y en consecuencia un mayor C_p.

Se compararon los campos de presión y velocidad de la turbina Savonius sin y con ODGV, como se muestra en la Fig. 8. Donde se observa que la incorporación de ODGV modifica sustancialmente la estructura aerodinámica alrededor de las palas de la turbina Savonius. Para la configuración sin ODGV (Fig. 8a), el campo de presión presenta una presión alta en la superficie convexa situada aguas debajo de la turbina, y una presión baja en la superficie convexo situada aguas arriba de la turbina. Este comportamiento es característico de las turbinas Savonius, que operan principalmente por resistencia aerodinámica, en la que la diferencia de presión entre las superficies de las palas determina la generación de torque. Sin embargo, para la configuración con ODGV (Fig. 8b), se observa una redistribución del campo de presión alrededor de las palas de la turbina Savonius. Las venas guía provocan zonas de presión alta y bajas en el borde de entrada y salida, respectivamente. Esto sugiere una aceleración local del flujo de

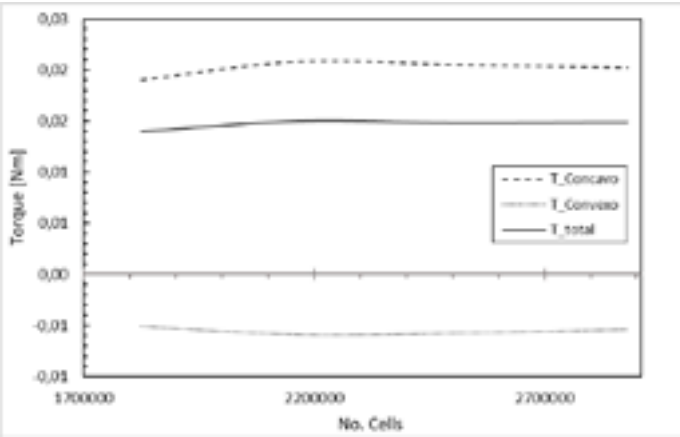


Fig. 4. Valores de sensibilidad de malla para la turbina Savonius con ODGV

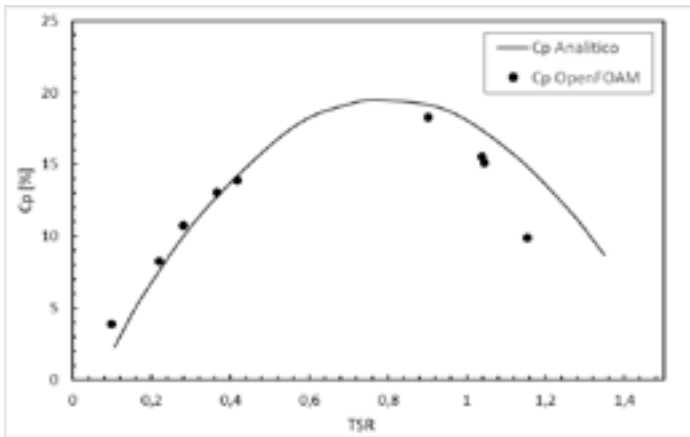


Fig. 5. Comparación del Cp para una turbina Savonius sin ODGV

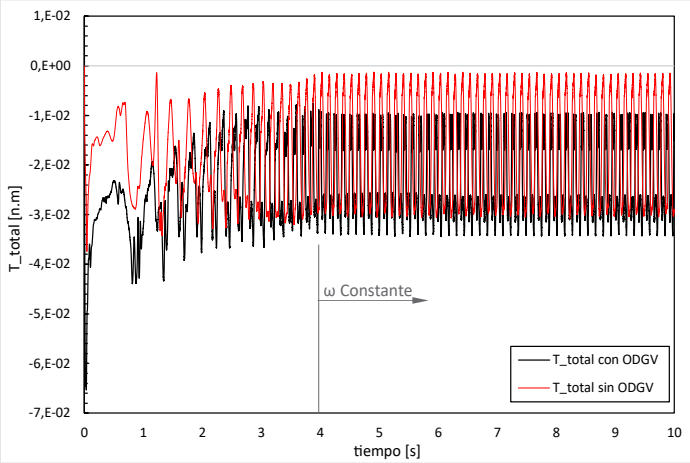


Fig. 6. Torque total para turbinas Savonius con ODGV y sin ODGV

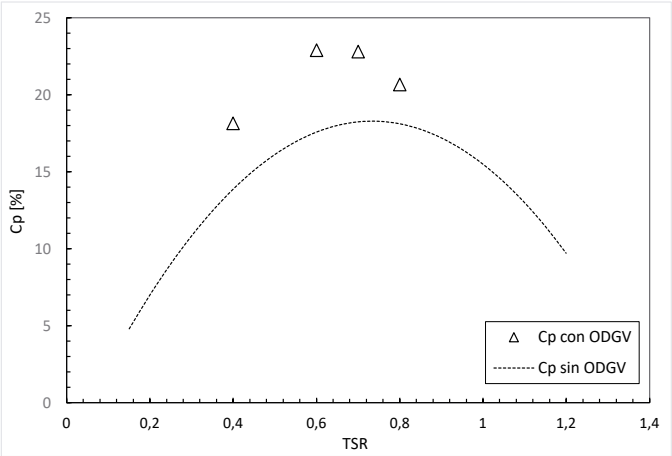


Fig. 7. Coeficiente de potencia de turbinas Savonius con ODGV y sin ODGV en función del TSR

viento y una orientación más favorable hacia las superficies cóncava de las palas.

Para el campo de velocidad, la configuración sin ODGV (Fig. 8C), presenta una distribución del campo de velocidades característicos de las turbinas Savonius, con zonas de baja velocidad asociadas a la separación de la capa limite y flujo de estela aguas abajo de la turbina Savonius. Sin embargo, para la configuración con ODGV (Fig. 8d), se produce una aceleración de flujo entre las venas guía, incrementando la magnitud de la velocidad en las proximidades de las palas de la turbina Savonius, favoreciendo una interacción más intensa entre el flujo de viento entrante y la superficie cóncava de las palas. En general, los resultados sugieren que el ODGV no solo actúa como un dispositivo de orientación del flujo, sino también como un dispositivo capaz de intensificar los gradientes de presión y el campo de velocidad local, redistribuyendo la energía cinética del entorno circundante hacia las superficies de las palas de la turbina Savonius.

En la Fig. 9 se muestran las líneas de corriente para la turbina Savonius sin y con ODGV. En la configuración sin ODGV, las líneas de corriente muestran una zona de recirculación moderada aguas abajo, asociadas a la separación del flujo de viento en las plas y a la formación de flujo de estala de baja energía. Por el contrario, para la configuración con ODGV, se observa una zona de alta recirculación aguas abajo, asociadas a aceleraciones locales del flujo de viento entre las venas guía y las palas de la turbina. Además, la implementación del modelo de turbulencia permite captar con mayor detalle las regiones de recirculación y separación, lo que sugiere que la implementación de ODGV intensifica la interacción fluido-estructura.

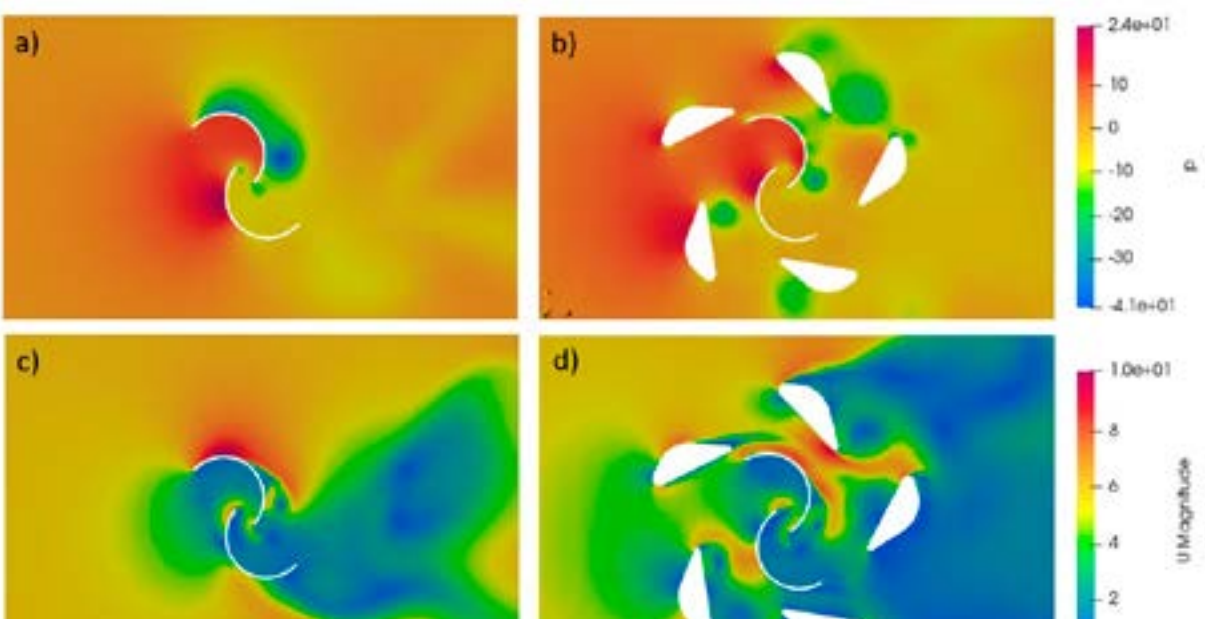


Fig. 8. Contornos de presión y velocidad a) Contorno de presión turbina Savonius sin ODGV, b) Contorno de presión para turbina con ODGV, c) Contorno de velocidad para turbina Savonius sin ODGV, d) Contorno de velocidad para turbina Savonius con ODGV

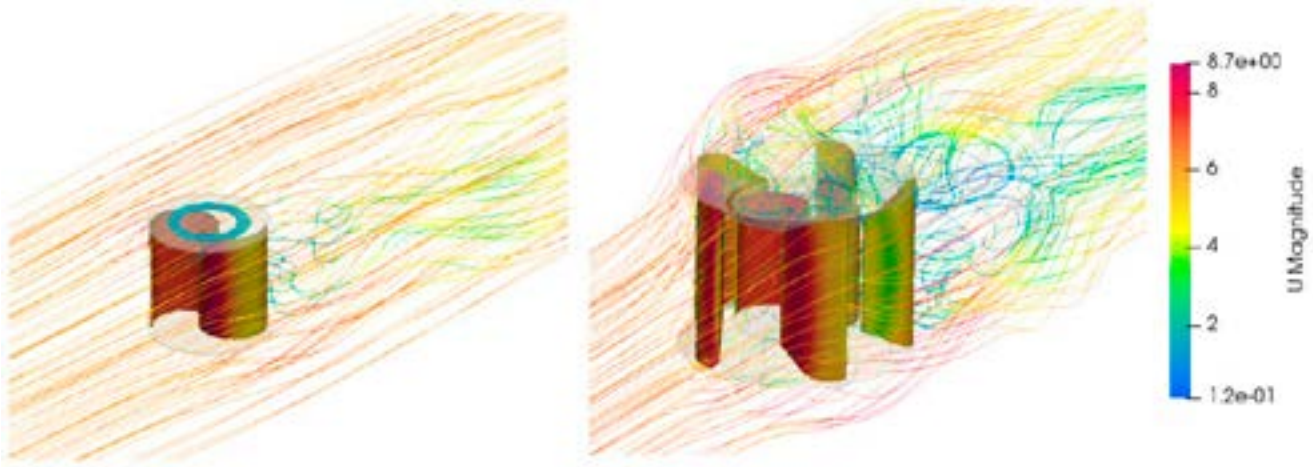


Fig. 9. Líneas de corriente para turbina Savonius sin ODGV y con ODGV.

V. Conclusiones

En este estudio, se desarrolló una simulación CFD tridimensional utilizando OpenFOAM con mallas deslizantes, para analizar el comportamiento aerodinámico de una turbina Savonius sin y con venas guía omnidireccionales. Las venas guía permitió redirigir el flujo de ciento hacia las superficies cóncava de las palas, reduciendo parcialmente la incidencia del flujo de viento sobre la superficie convexa.

Los resultados mostraron que la turbina Savonius con ODGV presento una mayor magnitud del torque y valores más elevados del C_p en comparación de la configuración sin ODGV. El análisis de los campos de presión, velocidad y las líneas de corrientes indicó que las ODGV modifica la estructura aerodinámica del flujo de viento alrededor de la turbina, generando aceleraciones locales entre las venas guía y las superficies de las palas de la turbina, contribuyendo a mejorar la canalización del flujo de viento hacia las zonas de mayor aporte aerodinámico.

References

[1] S. Wolf *et al.*, "Scientists' warning on fossil fuels," *Oxford Open Clim. Chang.*, vol. 5, no. 1, 2025, doi: 10.1093/oxfclm/kgaf011.

[2] D. Devin, L. Halim, B. M. Arthaya, and J. Chandra, "Design and CFD simulation of guide vane for multistage Savonius wind turbine," *J. Mechatronics, Electr. Power, Veh. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. 186–197, 2023, doi: 10.14203/j.mev.2023.v14.186-197.

[3] M. Al-Ghriybah, M. F. Zulkafli, D. H. Didane, and S. Mohd, "Review of the recent power augmentation techniques for the savonius wind turbines," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 60, no. 1, pp. 71–84, 2019.

[4] M. S. Alli and S. Jayavel, *Numerical study on performance of savonius-type vertical-axis wind turbine, with and without omnidirectional guide vane*. Springer Singapore, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-1903-7_52.

[5] M. A. Moreno-Armendáriz *et al.*, "Wind booster optimization for on-site energy generation using vertical-axis wind turbines," *Sensors*, vol. 21, no. 14, pp. 1–21, 2021, doi: 10.3390/s21144775.

[6] K. Kaygusuz, "Renewable energy: Power for a sustainable future," *Energy Explor. Exploit.*, vol. 19, no. 6, pp. 603–626, 2001, doi: 10.1260/0144598011492723.

[7] B. Sugiharto, "The Performance of Savonius Windmill With Guide Vane," *Conf. Senat. STT Adisutjipto Yogyakarta*, vol. 4, 2018, doi: 10.28989/senatik.v4i0.233.

[8] B. Sugiharto, S. Soeparman, D. Widhiyanuriyawan, S. Wahyudi, and I. N. G. Wardana, "Utilization of guide vanes to concentrate flows to the blade and block vortex to improve the power factor of savonius wind turbine," *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 6, no. 8–102, pp. 55–61, 2019, doi: 10.15587/1729-4061.2019.183160.

[9] M. Zemamou, A. Toumi, K. Mrigua, Y. Lahlou, and M. Aggour, "A novel blade design for Savonius wind turbine based on polynomial bezier curves for aerodynamic performance enhancement," *Int. J. Green Energy*, vol. 17, no. 11, pp. 652–665, 2020, doi: 10.1080/15435075.2020.1779077.

[10] J. B. S. Kalluvila and B. Sreejith, "Numerical and experimental study on a modified Savonius rotor with guide blades," *Int. J. Green Energy*, vol. 15, no. 12, pp. 744–757, 2018, doi: 10.1080/15435075.2018.1529574.

[11] I. Marinić-Kragić, D. Vučina, and Z. Milas, "Global optimization of Savonius-type vertical axis wind turbine with multiple circular-arc blades using validated 3D CFD model," *Energy*, vol. 241, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122841.

[12] G. Ferrari, D. Federici, P. Schito, F. Inzoli, and R. Mereu, "CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis," *Renew. Energy*, vol. 105, pp. 722–734, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.12.077.

[13] B. Sugiharto, S. Soeparman, D. Widhiyanuriyawan, and S. Wahyudi, "Characteristics of the savonius wind turbine using multiple guide vanes," *Int. J. Fluid Mach. Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 606–614, 2020, doi: 10.5293/IJFMS.2020.13.3.606.

Energy Management System for a Hybrid Hospital Microgrid with In-Situ Medical Oxygen and Green Hydrogen Production

1st Nav. Eng. CN RA Didier Fernando Duarte Garay
Electronics Department
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
didier.duarte01@javeriana.edu.co

2nd Luis G. Marín
Electronics Department
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
luis_marinc@javeriana.edu.co

3rd José Vuelvas
Electronics Department
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
vuelvasj@javeriana.edu.co

Abstract— This paper presents a hybrid hospital microgrid with in-situ production of medical oxygen and green hydrogen through proton-exchange membrane (PEM) electrolysis, designed for territories with low-resilience grid infrastructure. The proposed formulation integrates distributed energy resource (DER) models, including photovoltaic, wind, hydrokinetic, lithium-ion battery, PEM electrolyzer, gaseous storage, and PEM fuel cell (PEMFC), coordinated through a lexicographic mixed-integer linear programming (MILP) energy management system (EMS). The EMS enforces a strict operational hierarchy that prioritizes O_2 inventory safety, critical-load continuity, and economic operation. Piecewise-linear (PWL) representations of the PEM electrolyzer and PEMFC preserve equipment behavior while maintaining computational tractability. In the grid-connected scenario, the system fully supplies critical and flexible loads while producing 873.97 m^3 of medical O_2, exceeding the weekly demand. In the off-grid contingency scenario, the electrolyzer–PEMFC–storage subsystem sustains critical-load operation for 51 h, equivalent to 30.36% of the evaluated horizon. The results demonstrate that lexicographic optimization effectively preserves clinical priorities and that the H_2/O_2 subsystem significantly enhances hospital microgrid resilience.

Keywords— Hybrid hospital microgrid; Energy Management System (EMS); medical oxygen; green hydrogen; Distributed Energy Resources (DERs); mixed-integer linear programming (MILP); lexicographic optimization.

I. Introduction

The uninterrupted supply of medical oxygen and electricity is a critical operational requirement for hospitals, particularly in regions with low-resilience grid infrastructure, long distances from supply centers, and dependence on transport systems constrained in both capacity and availability. In these contexts, energy disruptions are not merely economic events; they directly compromise patient safety, interrupt life-support equipment, and exhaust O_2 inventories whose replenishment may take days or weeks. Accordingly, the design of a hospital microgrid should not be limited to reducing energy costs. Instead, it must be conceived as resilience infrastructure capable of guaranteeing service continuity by prioritizing critical loads, sustaining O_2 inventories, and leveraging local renewable resources to provide backup energy during grid-disconnection events.

Recent literature has addressed microgrids with H_2 storage, energy management systems, renewable electrolysis, and H_2/O_2 co-production for hospital applications. However, these approaches generally focus on techno-economic feasibility, with less emphasis on coordinated EMS operation, leaving the operational integration among oxygen production, hybrid storage, fuel-cell dispatch, and clinical priorities insufficiently developed [1]–[4]. The convergence of proton-exchange membrane (PEM) electrolysis, high-pressure gaseous storage, and fuel-cell technology creates a unique opportunity for hospital microgrids. The electrolyzer can simultaneously produce the two resources most critically required in hospitals: green H_2 as a long-duration energy carrier and medical-grade O_2 as a clinical supply, both generated from a single renewable-powered process. This dual-output characteristic fundamentally changes the design logic of the EMS. Rather than treating O_2 production as a byproduct or secondary objective, it must be elevated to a safety constraint that conditions every other dispatch decision, including battery cycling, fuel-cell commitment, and grid-purchasing strategy. Managing such a system, however, is not a conventional economic dispatch problem. Hospital operation imposes a strict priority hierarchy that cannot be fully captured by a cost function alone: O_2 inventory safety must be guaranteed before any other objective is pursued, critical electrical loads must be sustained regardless of tariff conditions, and economic efficiency becomes meaningful only after clinical continuity is secured. This ordering is not merely a design preference; it is a clinical and regulatory imperative. Translating it into an optimization framework requires a formulation that enforces sequential, non-negotiable priorities, rather than trading off competing objectives through weighted sums that may silently sacrifice safety for cost under certain operating conditions.

This paper addresses this gap through a hybrid microgrid composed of renewable DERs, a lithium-ion battery, a PEM electrolyzer, gaseous storage, and a PEMFC, coordinated by an EMS formulated as a lexicographic MILP to evaluate on-grid/off-grid operation, in-situ production of medical O_2 and green H_2, operating cost, and resilience.

This paper is organized as follows. Section II defines the problem and motivates the proposed architecture for logistically constrained territories. Section III describes the mathematical models of the distributed energy resources. Section IV presents the lexicographic MILP-based energy management system. Section V compares the operational results for on-grid and off-grid scenarios, while Section VI evaluates key energy, economic, and resilience performance indicators. Finally, Section VII concludes the paper.

II. Problem Statement

Electrical continuity and medical oxygen supply are critical for hospitals located in logistically constrained territories. Surveys in low- and middle-income countries (LMICs) show that fewer than half of health-care facilities have uninterrupted oxygen availability, and strengthening this supply could prevent up to 122,000 annual deaths from childhood pneumonia [5]. Although Colombia is currently classified as an upper-middle-income country [6], approximately 52% of its territory corresponds to Non-Interconnected Zones (ZNI), without connection to the National Interconnected System (SIN) [7]. In addition, low-quality rural

infrastructure, dependence on river or air transport in some territories, and the persistent effects of internal conflict hinder the logistics of essential medical supplies [8]. Therefore, the proposed solution integrates renewables, a battery, gaseous storage, PEM electrolysis, and a PEMFC to prioritize critical demand, produce medical oxygen and green hydrogen in situ, reduce operating cost, and partially solve the logistics chain in hard-to-reach areas [1], [9]–[12].

Therefore, the proposed solution integrates renewables, a battery, gaseous storage, PEM electrolysis, and a PEMFC to prioritize critical demand, produce medical oxygen and green hydrogen in situ, reduce operating cost, and partially solve the logistics chain in hard-to-reach areas [1], [9]–[12]. As shown in Fig. 1, the generation side comprises three non-dispatchable renewable sources, a 21 kW photovoltaic array, two 13 kW wind turbines, and three 5 kW hydrokinetic units, which feed a common bus together with a 107.5 kW lithium-ion battery bank and a 50 kW PEMFC. The electrochemical conversion subsystem integrates a 46 kW PEM electrolyzer that simultaneously produces hydrogen, stored in a 1,000 m^3-equivalent tank at 100 bar, and medical-grade oxygen, stored in a 10 m^3 geometric tank at 100 bar and subsequently purified before delivery to patients at an average rate of 4 m^3/h. Hydrogen is routed back to the PEMFC when grid power is unavailable, while the EMS acts as the central coordination layer, issuing dispatch signals to the battery, electrolyzer, and PEMFC based on real-time measurements from all subsystems.

III. Mathematical Modeling of Distributed Energy Resources

Models were selected based on explicit equations, accessible parameters, and complexity compatible with EMS optimization. Tables V–VIII document the selection and validation of the electrolyzer and PEMFC models; Tables IX–XIV summarize gaseous storage, renewable generation, and battery models; These tables provide the data to repeat the experiment and give an idea of the selection of models presented.

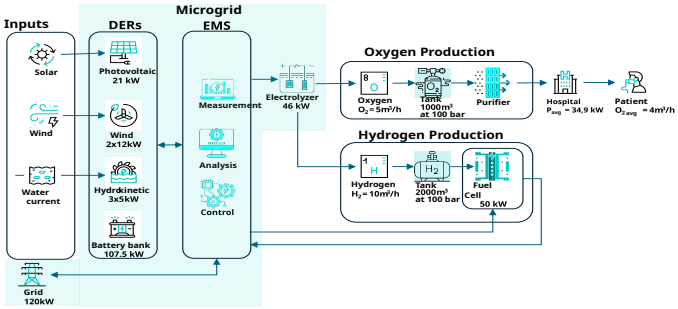


Figure 1. Hybrid hospital microgrid

A. PEM Electrolyzer

The final PEM electrolyzer model implemented in the code corresponds to the simplified Duarte 2026 version obtained after adapting the Valverde Isorna and González Madrid formulation to the 46 kW PEMWE unit reported by Espinosa-López et al. [1], [13], [14]. Direct scaling of the original model caused fitting difficulties at the modeled power level; therefore, the physical basis of polarization, Faraday conversion, and thermal balance was retained, while the polarization relationship was rewritten as a function of the power handled by the EMS. The result was validated through curve comparison. Fig. 2 shows that the modified equations (1)–(5) reproduce the electrochemical, thermal, and stoichiometric trends of the base model and the scaled system.

Simplified electrical model.

$$\begin{aligned} V_{el,stack}[k] = n_{el}\Bigg[& V_{el,rev} + \frac{RT_{el}[k]}{2F}\ln\left(p^{el}_{H_2}p^{el}_{O_2}\right) \\ & + \frac{RT_{el}[k]}{F}\operatorname{asinh}\left(\frac{P_{el}[k]}{2A_{el,stack}V_{el,stack}[k]i^{el}_{0,an}}\right) \\ & + \frac{RT_{el}[k]}{F}\operatorname{asinh}\left(\frac{P_{el}[k]}{2A_{el,stack}V_{el,stack}[k]i^{el}_{0,cat}}\right) \\ & + \frac{\delta^{el}_B P_{el}[k]}{A_{el,stack}\sigma^{el}_B V_{el,stack}[k]}\Bigg]. \end{aligned} \tag{1}$$

Simplified thermal model.

$$\dot{Q}^{el}_{cool}[k] = \begin{cases} 0, & T_{el}[k] < T^{el}_{\lim}, \\ \dot{Q}^{el}_{gen}[k] - \dot{Q}^{el}_{loss}[k], & T_{el}[k] \geq T^{el}_{\lim}. \end{cases} \tag{2}$$

$$\frac{dT_{el}}{d\tau} = \frac{P_{el}[k]\left(1-\frac{n_{el}V_r}{V_{el,stack}[k]}\right) - \frac{1}{R^{el}_{th}}\left(T_{el}[k]-T_a[k]\right) - \dot{Q}^{el}_{cool}[k]}{C^{el}_{th}}. \tag{3}$$

Stoichiometric model.

$$\dot{n}^{el}_{H_2}[k] = \frac{P_{el}[k]n_{el}}{2FV_{el,stack}[k]}, \qquad \dot{n}^{el}_{O_2}[k] = \frac{1}{2}\dot{n}^{el}_{H_2}[k]. \tag{4}$$

$$\dot{m}^{el}_{H_2}[k] = M_{H_2}\dot{n}^{el}_{H_2}[k], \qquad \dot{m}^{el}_{O_2}[k] = \frac{1}{2}\dot{m}^{el}_{H_2}[k]\left(\frac{M_{O_2}}{M_{H_2}}\right). \tag{5}$$

B. PEMFC Fuel Cell

The final PEMFC model corresponds to the reduced Duarte 2026 version built from the 50 kW stack reported by Kim, Han, and Yu. The electrochemical, thermal, and stoichiometric core was retained, while vehicle auxiliaries were replaced by EMS-equivalent parameters. In addition, the distributed membrane was represented through dynamic equivalent hydration, and the effective activation coefficient was adjusted to reproduce the polarization curve. The modified equations are the activation loss in (9), hydration and ohmic loss in (11), the lumped thermal block in (15)–(17), and the stoichiometric coupling in (18). Validation is presented by comparing the simplified model curves against Kim et al. [15]–[17].

Physical-electrochemical model.

$$\begin{aligned} & H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + \text{electrical energy} + \text{heat}, \\ & I_{fc}[k] = J_{fc}[k]A_{fc}, \\ & V_{fc,cell}[k] = E^{fc}_{ocv}[k] - V^{fc}_{act}[k] - V^{fc}_{ohm}[k] - V^{fc}_{conc}[k]. \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} E^{fc}_{ocv}[k] = {} & 1.229 - 8.5\times10^{-4}\left(T_{fc}[k]-298.15\right) \\ & + 4.308\times10^{-5}T_{fc}[k]\left[\ln\left(\frac{p^{fc}_{H_2}[k]}{1.01325}\right)\right. \\ & \left. + \frac{1}{2}\ln\left(\frac{p^{fc}_{O_2}[k]}{1.01325}\right)\right]. \end{aligned} \tag{7}$$

$$C^{fc}_{O_2}[k] = \frac{p^{fc}_{O_2}[k]}{5.08\times10^6\exp\left(-\frac{498}{T_{fc}[k]}\right)}, \qquad a^{fc}_{eq}[k] = \frac{p^{fc}_{w}[k]}{p_{sat}(T_{fc}[k])}. \tag{8}$$

Activation losses.

$$\begin{aligned} V^{fc}_{act}[k] = -\Big[& \xi^{fc}_{1,eff} + \xi^{fc}_{2,eff}T_{fc}[k] + \xi^{fc}_{3}T_{fc}[k]\ln(C^{fc}_{O_2}[k]) \\ & + \xi^{fc}_{4}T_{fc}[k]\ln\left(\frac{J_{fc}[k]}{n_{fc}}\right)\Big]. \end{aligned} \tag{9}$$

Membrane hydration model and ohmic losses.

$$\lambda^{fc}_{ss}[k] = \begin{cases} 0.043 + 17.81a^{fc}_{eq}[k] - 39.85(a^{fc}_{eq}[k])^2 \\ \quad + 36(a^{fc}_{eq}[k])^3, \\ \qquad 0 < a^{fc}_{eq}[k] \leq 1, \\ 14 + 1.4(a^{fc}_{eq}[k]-1), \\ \qquad 1 < a^{fc}_{eq}[k] \leq 3. \end{cases} \tag{10}$$

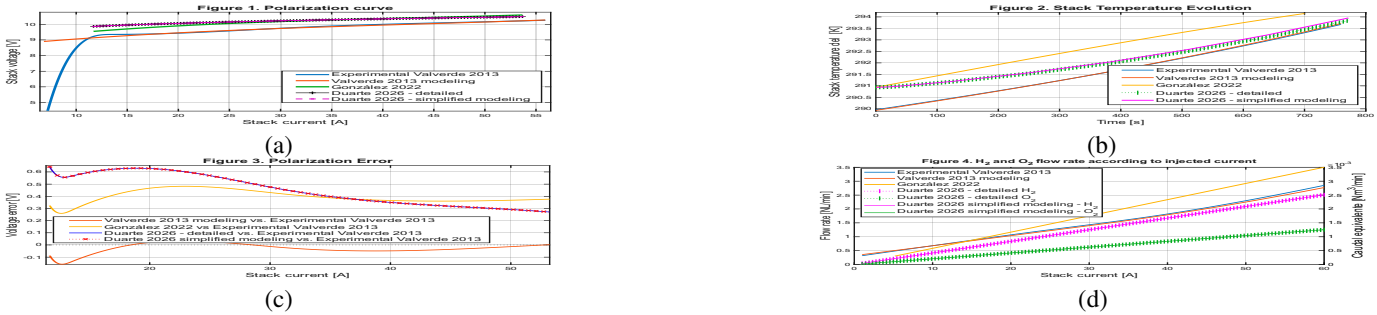


Figure 2. Electrochemical and thermal validation of the PEM electrolyzer model

$$\lambda_{eq}^{fc}[k+1] = \lambda_{eq}^{fc}[k] + \frac{\Delta t}{\tau_{\lambda}^{fc}}(\lambda_{ss}^{fc}[k] - \lambda_{eq}^{fc}[k]),$$
$$\sigma_{mem}^{fc}[k] = \exp\left[1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}[k]}\right)\right] \times (0.005139\lambda_{eq}^{fc}[k] - 0.00326), \tag{11}$$
$$R_{mem}^{fc}[k] = \frac{t_{mem}^{fc}}{A_{fc}\sigma_{mem}^{fc}[k]}, \quad V_{ohm}^{fc}[k] = I_{fc}[k]R_{mem}^{fc}[k].$$

Concentration losses and stack power.

$$\Pi^{fc}[k] = \frac{p_{O_2}^{fc}[k]}{0.1173} + p_{sat}(T_{fc}[k]). \tag{12}$$

$$c^{fc}[k] = \begin{cases} (7.16\times10^{-4}T_{fc}[k] - 0.622)\Pi^{fc}[k] \\ \quad + (-1.45\times10^{-3}T_{fc}[k] + 1.68), & \Pi^{fc}[k] < 2, \\ (8.66\times10^{-5}T_{fc}[k] - 0.068)\Pi^{fc}[k] \\ \quad + (-1.6\times10^{-4}T_{fc}[k] + 0.54), & \Pi^{fc}[k] \geq 2. \end{cases} \tag{13}$$

$$V_{conc}^{fc}[k] = I_{fc}[k]\left(\frac{c^{fc}[k]}{I_{fc}^{2.2}[k]}\right)^2, \quad V_{fc,stack}[k] = n_{fc}V_{fc,cell}[k], \tag{14}$$
$$P_{fc,stack}[k] = J_{fc}[k]A_{fc}V_{fc,cell}[k]n_{fc}.$$

Lumped thermal model.

$$\dot{Q}_g^{fc}[k] = I_{fc}[k]n_{fc}(V_{tn}^{fc} - V_{fc,cell}[k]), \quad \dot{Q}_a^{fc}[k] = \frac{T_{fc}[k] - T_a[k]}{R_{th}^{fc}}, \tag{15}$$
$$\dot{Q}_c^{fc}[k] = u_c^{fc}[k]\dot{Q}_{c,max}^{fc}.$$

$$u_c^{fc}[k] = \begin{cases} 1, & T_{fc}[k] \geq T_{on}^{fc}, \\ 0, & T_{fc}[k] \leq T_{off}^{fc}, \\ u_c^{fc}[k-1], & T_{off}^{fc} < T_{fc}[k] < T_{on}^{fc}. \end{cases} \tag{16}$$

$$T_{fc}[k+1] = T_{fc}[k] + \frac{\Delta t}{C_{th}^{fc}}(\dot{Q}_g^{fc}[k] - \dot{Q}_a^{fc}[k] - \dot{Q}_c^{fc}[k]). \tag{17}$$

Stoichiometric model.

$$\dot{n}_{H_2,r}^{fc}[k] = \frac{J_{fc}[k]A_{fc}n_{fc}}{2F}, \quad \dot{m}_{H_2,r}^{fc}[k] = M_{H_2}\dot{n}_{H_2,r}^{fc}[k],$$
$$\dot{n}_{O_2,r}^{fc}[k] = \frac{1}{2}\dot{n}_{H_2,r}^{fc}[k], \quad \dot{n}_{H_2,in}^{fc}[k] = s_{H_2}^{fc}\dot{n}_{H_2,r}^{fc}[k],$$
$$\dot{n}_{O_2,in}^{fc}[k] = s_{O_2}^{fc}\dot{n}_{O_2,r}^{fc}[k], \quad \dot{n}_{air,in}^{fc}[k] = \frac{\dot{n}_{O_2,in}^{fc}[k]}{y_{O_2}^{air}}, \tag{18}$$
$$\dot{n}_{H_2O,g}^{fc}[k] = \dot{n}_{H_2,r}^{fc}[k], \quad \dot{m}_{H_2O,g}^{fc}[k] = M_{H_2O}\dot{n}_{H_2O,g}^{fc}[k].$$

$$e_{V,\%}^{fc}[k] = \left|\frac{V_{fc,cell}^{mod}[k] - V_{fc,cell}^{Kim}[k]}{V_{fc,cell}^{Kim}[k]}\right| 100,$$
$$e_{P,\%}^{fc}[k] = \left|\frac{P_{fc,stack}^{mod}[k] - P_{fc,stack}^{Kim}[k]}{P_{fc,stack}^{Kim}[k]}\right| 100. \tag{19}$$

C. Hydrogen and Oxygen Storage

H_2 is represented through pressure and state of charge (SoC), whereas medical O_2 is tracked as an explicit inventory. Fig. 3 shows the hydrogen and oxygen storage responses used as validation support [1], [4], [9].

$$P_b[k] = P_{bi} + Z\frac{N_{H_2}[k]RT_b[k]}{M_{H_2}V_b}, \quad SoC_{H_2}[k] = \frac{P_{H_2}[k] - P_{H_2}^{\min}}{P_{H_2}^{\max} - P_{H_2}^{\min}}. \tag{20}$$

$$\frac{dV_{O_2,cons}}{dt} = \frac{N_{fc}I_{fc}\eta_F}{N_{st,O_2}F}V_{m,O_2},$$
$$\frac{dV_{H_2,cons}}{dt} = \frac{N_{fc}I_{fc}\eta_F}{N_{st,H_2}F}V_{m,H_2},$$
$$StockH_2[k+1] = StockH_2[k] + \Delta t\left(V_{H_2,ELZ\to tank}[k] - V_{H_2,tank\to FC}[k]\right), \tag{21}$$
$$StockO_2[k+1] = StockO_2[k] + \Delta t\left(V_{O_2,ELZ\to tank}[k] - V_{O_2,tank\to FC}[k]\right).$$

D. Photovoltaic Solar Panels

The Hohm–Ropp–Marín–González model retains the photovoltaic (PV) electrical module and constant-voltage maximum power point tracking (MPPT). Fig. 4 shows the relationship among irradiance, temperature, and PV power [1], [18], [19].

$$I_M = I_{SC}^M\left[1 - \exp\left(\frac{V_M - V_{OC}^M + I_M R_S^M}{N_{SM}V_t^C}\right)\right]. \tag{22}$$

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \cong K, \quad 0.73 \leq K \leq 0.80, \quad V_{MPP} = KV_{OC},$$
$$I_{MPP}^M = I_{SC}^M\left[1 - \exp\left(\frac{(K-1)V_{OC}^M + I_{MPP}^M R_S^M}{N_{SM}V_t^C}\right)\right], \tag{23}$$
$$P_{MPP}^M = KV_{OC}^M I_{MPP}^M.$$

E. Wind Turbine

The non-dispatchable wind source uses the piecewise curve of Zhou et al.; Fig. 5 shows the power curve and its time response under variable wind speed [20].

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0, & V(t) \leq V_{in} \text{ o } V(t) \geq V_{out}, \\ P_{rwt}\dfrac{V(t) - V_{in}}{V_r - V_{in}}, & V_{in} \leq V(t) \leq V_r, \\ P_{rwt}, & V_r \leq V(t) \leq V_{out}. \end{cases} \tag{24}$$

$$P_{GT} + P_{PV} + P_{WT} + P_{FC} = P_E + P_{EL} + P_{EC}. \tag{25}$$

F. Hydrokinetic Turbine

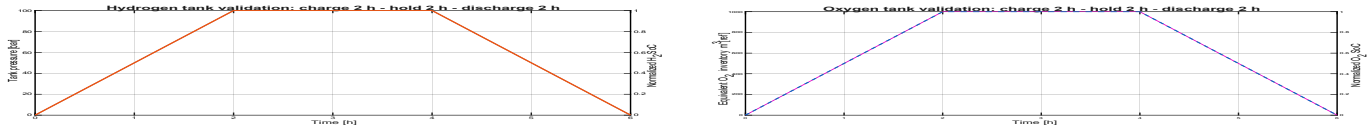
The hydrokinetic turbine (HKT) is modeled as a non-dispatchable block dependent on effective water velocity and compatible with the 5 kW SMART Monofloat unit. Fig. 6 presents the hydrokinetic power validation [21], [22].

$$P_{HKT} = \frac{1}{2}\rho_w A_H v^3 \kappa_{HKT}, \quad E_{HKT} = P_{HKT}\Delta t,$$
$$P_{PV}[k] + P_{HKT}[k] = P_{Load}[k] + P_{bat}[k]. \tag{26}$$

G. Lithium-Ion Battery Bank

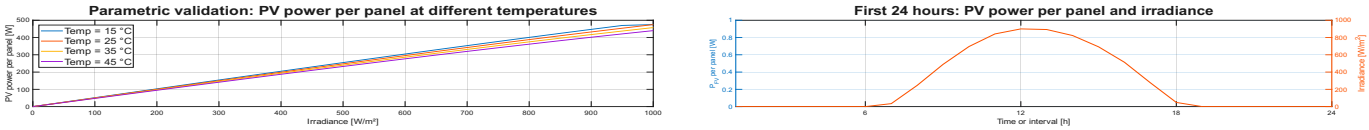
The battery model uses energy, SoC, and dynamic power limits, with positive values for discharge and negative values for charge. Fig. 7 illustrates the dynamic limits and the charge/discharge evolution of the bank [19], [21], [23]–[25].

$$E_b(k+1) = E_b(k) - T_s P_b(k), \quad SoC(k) = \frac{E_b(k)}{C_n},$$
$$E_{b,min} \leq E_b(k) \leq E_{b,max}, \tag{27}$$
$$E_{b,max} = C_n SoC_{max}, \quad E_{b,min} = C_n SoC_{min}.$$



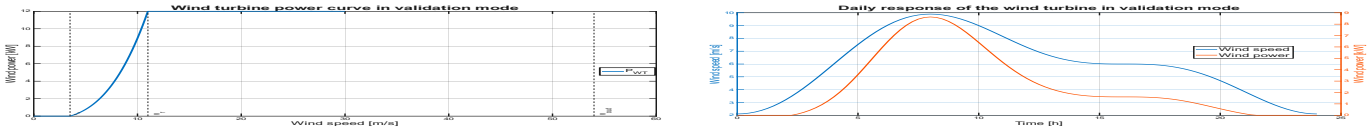
(a) (b)

Figure 3. Validation of gaseous storage: (a) hydrogen and (b) oxygen



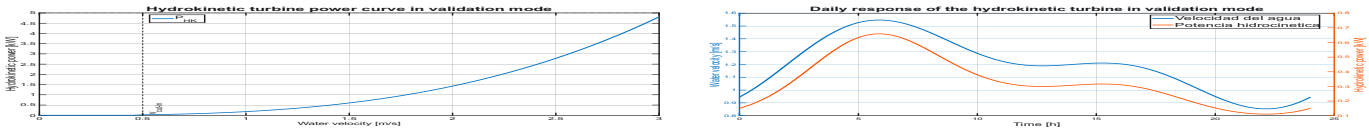
(a) (b)

Figure 4. Validation of the photovoltaic solar panel



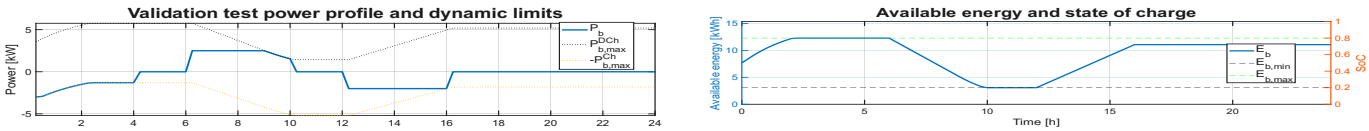
(a) (b)

Figure 5. Validation of the wind turbine



(a) (b)

Figure 6. Validation of the hydrokinetic turbine



(a) (b)

Figure 7. Validation of the lithium-ion battery mathematical model

$$
\begin{aligned}
P_b(k) &\le a_1 SoC(k) P^{DCh,fab}_{b,max},\\
P_b(k) &\ge -a_2[1-SoC(k)] P^{Ch,fab}_{b,max},\\
P^{DCh}_{b,max}(k) &= a_1 SoC(k) P^{DCh,fab}_{b,max},\\
P^{Ch}_{b,max}(k) &= a_2[1-SoC(k)] P^{Ch,fab}_{b,max},\\
-P^{Ch}_{b,max}(k) &\le P_b(k) \le P^{DCh}_{b,max}(k).
\end{aligned}
\tag{28}
$$

IV. Energy Management System

The DER models provide the EMS with available powers, consumptions, gaseous production, and storage states. The battery is embedded in the optimizer because its charge, discharge, energy, and SoC variables are part of the decision vector.

The EMS was formulated as a multi-energy mixed-integer linear programming (MILP) problem over 672 intervals of 15 min. Renewable DERs enter as non-dispatchable generation; the battery, electrolyzer, and PEMFC are optimized through continuous variables, binary variables, and piecewise-linear (PWL) maps. In the base case, the grid only purchases power, with $0 \le P_{grid,k} \le 120$ kW. In off-grid mode, $P_{grid,k} = 0$ is imposed and flexible load is suppressed; therefore, autonomy is evaluated over the critical load.

Operating maps. The electrolyzer uses 47 points and the PEMFC uses 50 points through incremental variables, preserving equipment behavior without introducing electrochemical nonlinearities into the optimization model.

$$
\begin{aligned}
P_{elz,k} &= \textstyle\sum_j dP_{elz,j}\theta_{elz,kj}, \quad H2_{elz,k} = \sum_j dH2_{elz,j}\theta_{elz,kj},\\
O2_{elz,k} &= \textstyle\sum_j dO2_{elz,j}\theta_{elz,kj}, \quad P_{fc,k} = \sum_j dP_{fc,j}\theta_{fc,kj},\\
H2_{fc,k} &= \textstyle\sum_j dH2_{fc,j}\theta_{fc,kj}.
\end{aligned}
\tag{EMS-1}
$$

$$
\begin{aligned}
&P_{grid,k} + P_{b,dis,k} + P_{fc,k} + P_{ren,k} + sCrit_k + sFlex_k\\
&= P_{load,k} + P_{b,ch,k} + P_{elz,k}, \quad P_{load,k} = P_{crit,k} + P_{flex,k}.
\end{aligned}
\tag{EMS-2}
$$

The battery preserves internal dynamics, SoC limits, and non-simultaneity:

$$
\begin{aligned}
E_{b,k+1} &= E_{b,k} + \Delta t P_{b,ch,k} - \Delta t P_{b,dis,k},\\
E_{b,min} &\le E_{b,k+1} \le E_{b,max},\\
0 &\le P_{b,ch,k} \le P_{ch,max} u_{b,ch,k},\\
0 &\le P_{b,dis,k} \le P_{dis,max} u_{b,dis,k},\\
u_{b,ch,k} + u_{b,dis,k} &\le 1,\\
P_{b,dis,k} &\le (P_{dis,max}/C_n) E_{b,k},\\
P_{b,ch,k} &\le P_{ch,max}(1 - E_{b,k}/C_n).
\end{aligned}
\tag{EMS-3}
$$

The tanks are updated through discrete balances and hard limits; O_2 has lexicographic safety and preferential filling:

$$
\begin{aligned}
N_{H2,k+1} &= N_{H2,k} + H2_{elz,k} - H2_{fc,k},\\
StockO2_{k+1} &= StockO2_k + O2_{elz,k} - O2_{dem,k},\\
0 &\le N_{H2,k+1} \le N_{H2,max},\\
0 &\le StockO2_{k+1} \le StockO2_{max},\\
StockO2_{k+1} &+ StockO2_{max} sO2_k \ge SoC_{O2,seg} StockO2_{max},\\
StockO2_{k+1} &+ StockO2_{max} hO2_k \ge StockO2_{max}.
\end{aligned}
\tag{EMS-4}
$$

Non-simultaneity between the PEMFC and electrolyzer is enforced as a hard constraint, except for an O_2 emergency exception enabled only when H_2 SoC is >= 90%:

$$
\begin{aligned}
u_{fc,k} + u_{elz,k} - yO2_{emg,k} &\le 1,\\
N_{H2,k} &\ge 0.90 N_{H2,max} yO2_{emg,k},\\
N_{H2,k+1} &\ge 0.90 N_{H2,max} yO2_{emg,k}.
\end{aligned}
\tag{EMS-5}
$$

The optimization is lexicographic: each level minimizes one criterion and then freezes it as a constraint for the subsequent levels,

$$
\Omega_r = \{X \in \Omega_{r-1} : f_r^T X \le J_r^*\}. \tag{EMS-6}
$$

The five active levels are:

1) O_2 safety ($\min \sum_k sO2_k$)
2) Critical load ($\min \sum_k sCrit_k$)
3) Flexible/elastic load ($\min \sum_k sFlex_k$)
4) O_2 tank driven toward full inventory ($\min \sum_k hO2_k$)
5) Economic operation. The last level groups time-of-use (ToU) cost, peak-period purchasing, soft battery reserve, valley-period charging, and grid peak:

$$J_5 = \sum_k Cow_k Pgrid_k \Delta t + \lambda_{punta} \sum_{k \in punta} Pgrid_k \Delta t + W_{B,res} \sum_k sB_k + W_{B,valle} \sum_{k \in valle} hB_{valle,k} + W_{peak} Pgrid_{peak}. \quad \text{(EMS-7)}$$

Table I summarizes the hard and soft constraints, initial conditions, and operating parameters used by the EMS.

Table I
EMS CONSTRAINTS, STATES, AND OPERATING SIZING

Element	Value or function
Hard constraints	Electrical/H_2/O_2/battery balances; SoC and tank limits; battery and PEMFC–electrolyzer non-simultaneity.
Soft constraints	O_2 safety/filling, load deficits, battery reserve, and valley-period charging.
Initial conditions	$SoC_{O2} = 0.60$, $SoC_{H2} = 0.50$, $SoC_b = 0.50$.
Battery	$C_n = 107.52$ kWh; SoC 20–80%; preferred reserve 60%.
Variable electrolyzer	0–46 kW; $O_{2,max} = 5.202$ m^3/h; $H_{2,max} = 10.404$ Nm^3/h.
Average O_2 demand	4.00 m^3/h.
PEMFC	50 kW; maximum H_2 consumption = 31.379 Nm^3/h.
O_2 tank	10 m^3 geometric, 100 bar; 1000 m^3 equivalent.
H_2 tank	20 m^3 geometric, 100 bar; $N_{H2,max} = 80{,}679.7$ mol.
Average loads	Total 34.94 kW; critical 24.95 kW; elastic 9.98 kW.
EMS thresholds	O_2 safety 80%; high H_2 90% for exception; grid 0–120 kW.

V. RESULTS

Table II compares the main operating results of the on-grid and off-grid scenarios. In the grid-connected case, the lexicographic priority hierarchy operates as designed: O_2 safety is maintained throughout the evaluated horizon, the critical load is fully supplied with zero deficit, and the flexible load is entirely served (1,676.93 kWh). The electrolyzer consumes 7,728.00 kWh to produce 873.97 m^3 of medical O_2, exceeding the weekly demand of 672.00 m^3 by 30.1% and ending the horizon with an O_2 SoC of 0.802, slightly above the 80% safety threshold enforced by level 1 of the lexicographic hierarchy. Grid energy imports (8,745.76 kWh) are concentrated during off-peak and valley periods, consistent with the 85.52% economic efficiency reported in Table III and the time-of-use cost structure defined in (EMS-7). The PEMFC contributes 1,812.70 kWh, complementing renewable generation (3,006.53 kWh) and reducing grid dependence during peak tariff periods, as shown in Fig. 8.

In the off-grid contingency scenario, the system operates under the most demanding resilience conditions: no grid support, no flexible load, and a fixed critical demand of 24.95 kW. Under these conditions, the H_2/O_2 subsystem becomes the primary energy source, with the PEMFC delivering 3,292.51 kWh — nearly double its on-grid contribution — while simultaneously enabling the production of 571.80 m^3 of medical O_2, equivalent to 85.1% of the weekly demand. Critical-load operation is sustained for 51 h (30.36% of the 168 h horizon), after which the H_2 inventory is exhausted (final $SoC_{H_2} = 0.0021$). This result confirms that system resilience is primarily limited by the H_2 tank capacity and PEMFC rated power rather than by the optimizer or the battery. The battery ends the off-grid week at SoC = 0.800, indicating that its usable energy window (64.51 kWh between 20% and 80% SoC) was not the binding constraint. For an average critical load of 24.95 kW, the battery alone would sustain operation for approximately 2.6 h, compared to the 51 h achieved by the H_2/O_2 subsystem.

Fig. 8 reveals the anticipatory behavior of the EMS during on-grid operation. The electrolyzer operates preferentially during valley and mid-tariff periods, as observed in the ToU panel, while the battery cycles around the 60% preferred reserve level, with dynamic charge and discharge limits that tighten as the SoC approaches its operational bounds (EMS-3). The O_2 tank exhibits a sawtooth pattern that consistently remains above the 80% safety threshold, confirming that level 1 of the lexicographic hierarchy is never violated.

Fig. 9 illustrates the progressive depletion of the H_2 inventory during off-grid operation. The PEMFC is dispatched at near-maximum output until the H_2 inventory reaches its minimum threshold, after which critical-load service is interrupted. The O_2 tank follows a shallower sawtooth pattern than in the on-grid scenario, reflecting reduced electrolyzer activity constrained by the available renewable generation and the limited H_2 reserve available during islanded operation.

Table II
OPERATIONAL COMPARISON OF ON-GRID AND OFF-GRID SCENARIOS

Variable	On-grid	Off-grid
Critical load supplied	4,192.32 kWh	1,246.79 kWh
Critical deficit	0.00 kWh	2,945.53 kWh
Flexible load supplied	1,676.93 kWh	0.00 kWh
Grid energy imported	8,745.76 kWh	0.00 kWh
Grid peak	90.90 kW	0.00 kW
Non-dispatchable renewables	3,006.53 kWh	–
PEMFC energy	1,812.70 kWh	3,292.51 kWh
Electrolyzer energy	7,728.00 kWh	–
O_2 produced	873.97 m^3	571.80 m^3
O_2 demand	672.00 m^3	672.00 m^3
SoC final O_2	0.802	0.500
SoC final H_2	0.900	0.0021
SoC final battery	0.200	0.800
Critical autonomy	Not applicable	51 h
Critical service	100%	30.36%

VI. KEY PERFORMANCE INDICATORS (KPIS)

The KPIs verify operational performance, degradation, and resilience. Table III presents the comparative results for the on-grid and off-grid scenarios.

Table III
COMPARISON OF INDICATORS IN ON-GRID AND OFF-GRID SCENARIOS

Indicator	On-grid	Off-grid
Equivalent cycles	6.7757	2.1846
Cycles per day	0.9680	0.3121
Linear cycle degradation	0.1129%	0.0364%
Cycle-degradation cost	11.29 USD	–
Estimated cycle life	16.98 years	52.67 years
PV+wind+HKT+PEMFC share	35.53%	100%
Export/import index	0	–
Islanded critical service	Not applicable	30.36%
EMS economic efficiency	85.52%	Not applicable

Table IV summarizes the equations used to calculate the indicators and their operational meaning.

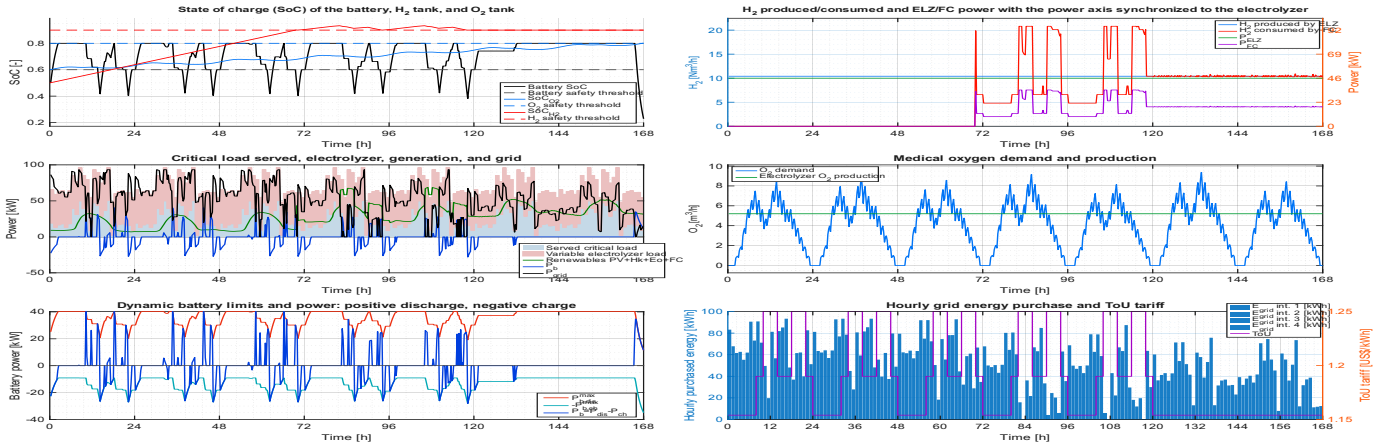


Figure 8. EMS results: on-grid base case.

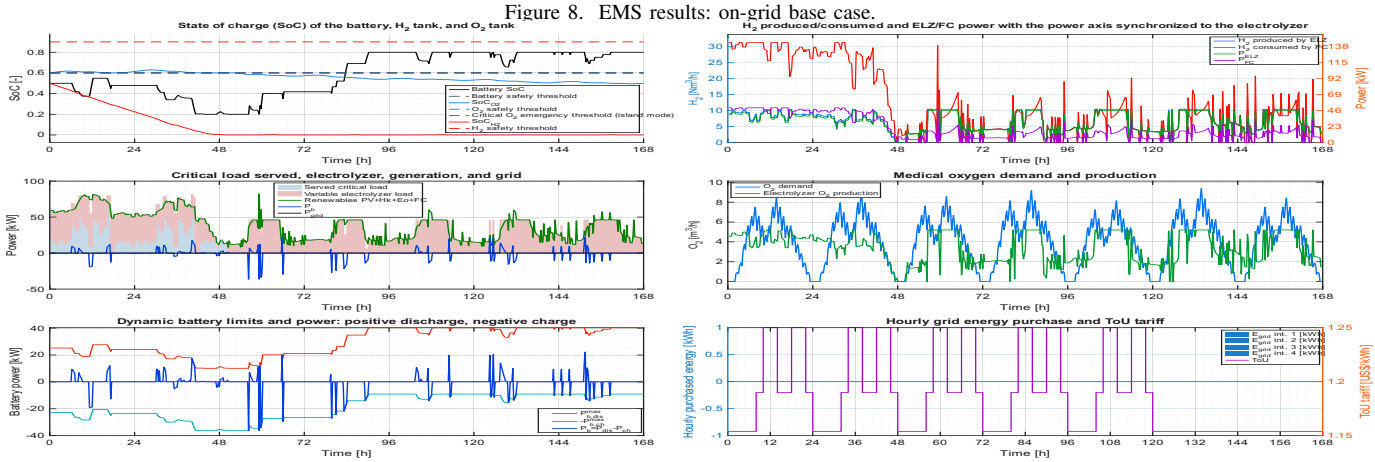


Figure 9. EMS results: off-grid case.

Table IV

INDICATOR EQUATIONS AND INTERPRETATION

Indicator	Equation and interpretation
Equivalent cycles	$EFC = \sum_k P_{b,dis}(k)\Delta t / C_n$. Measures discharged energy expressed as equivalent full cycles.
Cycles per day	$C_d = EFC/N_d$. Normalizes equivalent cycling over the simulated days.
Cycle degradation	$D_c = 100\,EFC/N_{cyc}$. Estimates the fraction of cycle life consumed.
Degradation cost	$C_{deg} = EFC\,C_{bat}/N_{cyc}$. Converts cycling into a linear cost.
Cycle life	$V_c = (N_{cyc}/C_d)/365$. Estimates lifetime in years if the daily pattern is repeated.
Renewable share	$R = 100\,E_{ren}/(E_{ren}+E_{grid})$, with $E_{ren} = E_{PV}+E_{wind}+E_{HK}+E_{FC}$. Measures internal contribution relative to the grid.
EMS economic efficiency	$\eta_{eco} = 100\,\frac{\sum_{k\in\mathcal{T}_{min}\cup\mathcal{T}_{med}} P_{grid,k}\Delta t}{\sum_k P_{grid,k}\Delta t}$. Measures the proportion of imported energy purchased during non-peak tariff periods.
Islanded critical service	$A_{crit} = 100\,N_{crit,at}/N_{tot}$. Measures the critical-load intervals covered in off-grid mode.

The renewable indicator includes photovoltaic, wind, hydrokinetic, and PEMFC generation, but it does not count the battery as a primary source. This convention avoids double counting stored energy. The export/import indicator remains zero or not applicable because the MILP does not model energy sales; P_{grid} is nonnegative import. Finally, islanded critical-load service is the most relevant resilience indicator: it measures the covered critical intervals and enables comparison of system sizes without depending on time-of-use cost, which disappears when the microgrid is disconnected.

Taken together, the KPIs confirm that the on-grid and off-grid scenarios stress different performance dimensions. On-grid operation is primarily limited by economic efficiency and battery cycling, whereas off-grid operation is constrained by H_2 inventory and critical-load autonomy. This distinction is operationally relevant for system sizing: increasing the H_2 tank capacity or PEMFC rated power would directly extend critical-load autonomy, whereas increasing battery capacity beyond the current 107.52 kWh would provide limited resilience improvement, given the 2.6 h of standalone coverage already demonstrated.

VII. Conclusions

The EMS coordinated renewable DERs, the battery, the PEM electrolyzer, the PEMFC, and the H_2/O_2 storage system under a hospital-oriented operational priority that prioritizes critical-load continuity and oxygen availability before economic optimization. The electrolyzer–PEMFC–gaseous-storage subsystem demonstrated the capability to shift energy toward periods without grid availability. During the off-grid contingency scenario, the subsystem produced 571.80 m³ of O_2 and delivered 3,292.51 kWh through the PEMFC, substantially exceeding the backup role provided by the battery. Although the 107.52 kWh battery contributes operational flexibility, its usable energy window between 20% and 80% SoC corresponds to 64.51 kWh, which would sustain an average critical load of 24.95 kW for only approximately 2.6 h if operating alone. During the one-week grid-loss event, the proposed system guaranteed continuous medical oxygen supply and sustained critical-load operation for 51 h. The results indicate that system resilience is primarily constrained by H_2 inventory and PEMFC operation rather than by the optimization framework itself. Finally, the proposed KPIs distinguish energy, economic, and resilience performance, while the off-grid scenario reveals the actual critical-autonomy limit of the sized architecture.

Table V
TECHNICAL SELECTION MATRIX FOR THE ELECTROLYZER

Document reference (author, year)	Modeled technology	Electrical modeling	Chemical modeling	Thermal modeling	Complete mathematical model for MATLAB or Python coding
M. Talaie *et al.*, 2024 [26]	PEM / SOEC	Yes	Yes	Partial	Yes
K. C. Sandeep *et al.*, 2017 [27]	AWE	Yes	Partial	Yes	Yes
P. Haug *et al.*, 2017 [28]	AWE	No	Yes	Partial	No
S. K. Kirati *et al.*, 2018 [29]	AWE	Yes	Yes	No	Yes
M. Sánchez *et al.*, 2018 [30]	AWE	Yes	Yes	Yes	Yes
D. Guilbert and G. Vitale, 2019 [31]	PEM	Yes	No	No	No
M. David *et al.*, 2020 [32]	AWE	Yes	Yes	Yes	Yes
J. C. González Madrid, 2022 [1]	PEM	Yes	Yes	Yes (ODE)	Yes
S. Ding *et al.*, 2022 [33]	AWE	Yes	Yes	Yes	Yes
Maggio et al., 2022 [2]	PEM	Partial	Yes	No	No
Assunção et al., 2025 [3]	PEM	Partial	Yes	No	No
Patiño et al., 2023 [34]	PEM / AWE	Partial	Partial	No	No
M. Chatenet *et al.*, 2022 [35]	PEM / AWE / SOEC	Partial	Yes	Partial	No
F. Gambou *et al.*, 2022 [36]	AWE	Yes	No	No	Yes
L. Valverde Isorna, 2013 [13]	PEM	Yes	Yes	Yes (ODE)	Yes

Table VI
TECHNICAL SELECTION MATRIX FOR THE PEMFC FUEL CELL

Document reference (author, year)	Modeled tech-nology	Electrical model-ing	Chemical model-ing	Thermal model-ing	Complete mathematical model for MATLAB or Python coding
J. C. González Madrid, 2022 [1]	PEMFC	Yes	Yes	Yes (ODE)	Yes
Y. Wang et al., 2023 [37]	PEMFC	Partial	Partial	No	No
S. Njoya Motapon et al., 2014 [38]	PEMFC	Yes	Yes	No	No
F. Z. Belhaj et al., 2021 [39]	PEMFC	Yes	No	No	No
A. Omran et al., 2021 [40]	PEMFC	Yes	Partial	Yes	Partial
L. Valverde Isorna, 2013 [13]	PEMFC	Yes	Yes	Yes (ODE)	Yes
H. Dagdougui *et al.*, 2010 [41]	PEMFC	Partial	Yes	No	Yes
Y. Kim, J. Han, and S. Yu, 2023 [15]	PEMFC	Yes	Yes	Yes	Yes

Table VII
CONDITIONS USED FOR ELECTROLYZER VALIDATION

Condition	**Value used in validation**
Excitation variable	Stack current
Excitation waveform	Increasing stepped current profile
Applied current range	8.00 A to 55.00 A
Total duration of the thermal validation test	771.73 s
Simulation time step	2.103 s
Ambient temperature	290.94 K (17.79 °C), constante
Initial stack temperature	290.94 K (17.79 °C)
Initial thermal condition	The stack starts in equilibrium with the ambient environment
Cooling activation temperature	338.15 K (65.00 °C)
Cooling criterion	Inactive below 65 °C; above that value, excess heat removal is activated
References used for thermal comparison	González (2022) curves [1], experimental Valverde (2013), and modeled Valverde (2013) [13]

Table VIII
CONDITIONS USED FOR FUEL-CELL VALIDATION

Parameter	**Symbol**	**Value**	**Unit**	**Source / criterion**
Reference rated power	$P_{fc,nom}$	50	kW	[15]
Active area per cell	A	280	cm^2	[15]
Number of cells	n_{cell}	277	—	[15]
Anode stoichiometry	s_{H_2}	1.5	—	[15]
Cathode stoichiometry	s_{O_2}	2.5	—	[15]
Total anode/cathode pressure	P_A^-, P_C	1.0	atm	[15]
Sweep variable	J	0 to 1.0	A/cm^2	EMS validation range in [15]
Stack temperature	T_{fc}	Calculated	K	Reduced thermal balance
Ambient temperature	T_{amb}	Simulation scenario	K	Boundary condition
Equivalent thermal capacitance	$C_{th,fc}$	Equivalent parameter	J/K	Stack thermal abstraction
Equivalent thermal resistance	$R_{th,fc}$	Equivalent parameter	K/W	Stack thermal abstraction
Equivalent cooling	$\dot{Q}_{cool,nom}$	Equivalent parameter	W	Replaces detailed thermal balance of plant
Turn-on threshold	T_{on}	Control parameter	K	Reduced implementation
Turn-off threshold	T_{off}	Control parameter	K	Reduced implementation
Cooling state	u_{cool}	0/1	—	Conditional logic with hysteresis
Equivalent water activity	a_{eq}	Operating parameter or scenario condition		Reduction based on [15], [17]
Equivalent dynamic water content	$\lambda_{eq}[k]$	Reduced dynamic state		Thesis reduction based on [15], [17]
Membrane conductivity	σ_{mem}	Calculated		[15]
Equilibrium water content	λ_{ss}	Calculated from a_{eq}	—	[15], [17]
Hydration time constant	τ_λ	Equivalent parameter	s	Dynamic membrane reduction
Membrane thickness	t_{mem}	15μm		[15]
Specific resistance	r_{mem}	Calculated		Reduced model
Membrane resistance	R_{mem}	Calculated		[15], [17]
Water-vapor saturation pressure	$p_{sat}(T_{fc})$	Calculated from T_{fc}	atm	[15]
Auxiliary concentration variable	Π	$\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat}$	atm	[15]
Concentration coefficient	c	Piecewise calculated	—	[15]
Concentration loss	V_{conc}	Calculated	V	[15]
Ohmic loss	V_{elect}	Calculated		[15]

Table IX
COMPARISON OF MATHEMATICAL MODELS FOR HYDROGEN STORAGE

Document reference	**Model complexity**	**Complete mathematical model for MATLAB or Python coding**
H. Dagdougui *et al.*, 2010 [41]	Simple	Yes
L. Valverde Isorna, 2013 [13]/ J. C. González Madrid, 2022 [1], [13]	Medium	Yes
Edouma Fils et al., 2023. [9]	Medium	Yes
M. Talaie *et al.*, 2024 [26]	Medium	No

Table X
COMPARISON OF MATHEMATICAL MODELS FOR OXYGEN STORAGE

Document reference	**Model complexity**	**Complete mathematical model for MATLAB or Python coding**
P. Edouma Fils et al., 2023 [9]	Medium	Yes
M. Talaie *et al.*, 2024 [26]	Medium	No
L. Valverde Isorna, 2013 / J. C. González Madrid, 2022 [1], [13]	Medium	No
J. C. González-Madrid *et al.*, 2026 [4]	Medium	No
G. Maggio *et al.*, 2022 [2]	Simple	No

Table XI
COMPARISON OF MATHEMATICAL MODELS FOR PHOTOVOLTAIC SOLAR PANELS

Document reference	**Model complexity**	**Complete mathematical model for MATLAB or Python coding**
M. Talaie, F. Jabari, and A. Akbari Foroud, 2024 [26]	Simple	Yes
D. P. Hohm and M. E. Ropp, 2003 [18]	Simple	No, not as a standalone model
L. G. Marín Collazos, 2017 [19]	Medium	Yes
J. C. González Madrid, 2022 [1]	Medium	Yes
P. Edouma Fils, S. Koumi Ngoh, I. M. Mfetoum and J. L. Nsouandele, 2023 [9]	Complex	Yes

Table XII
COMPARISON OF MATHEMATICAL MODELS FOR WIND TURBINES

Document reference	Model complexity	Complete mathematical model for MATLAB or Python coding
H. Dagdougui *et al.*, 2010 [41]	Medium	No
F. J. Lanas Montecinos, 2011 [42]	Medium	No
E. F. Tapias Forero, 2019 [43]	Medium	No
M. Ibrahim *et al.*, 2023 [44]	Complex	No
M. Talaie, F. Jabari, and A. Akbari Foroud, 2024 [26]	Medium	No
J. Zhou, Y. Wu, Z. Zhong, C. Xu, Y. Ke and J. Gao, 2021 [20]	Medium	Yes

Table XIII
COMPARISON OF HYDROKINETIC TURBINE MODELS.

Document reference (author, year)	Model complexity	Complete mathematical model for MATLAB or Python coding
Riglin, Schleicher, and Oztekin, 2015 [45]	Complex	Yes
Stadler, Wack, Fraas, and Riedelbauch, 2019 [22]	Complex	No
Arévalo Cordero, Lata García, and Jurado, 2020 [21]	Medium	Yes
Pineda, Rubio-Clemente, and Chica, 2024 [46]	Complex	Yes
Khojasteh, Bahreinian and Riasi, 2025 [47]	Complex	No

Table XIV
TECHNICAL ASSESSMENT MATRIX FOR THE BATTERY MATHEMATICAL MODEL

Document reference (author, year)	**Modeled technology**	**Model complexity**	**SoC as a state variable**	**Dynamic volt-age/current model**	**Complete mathematical model for MATLAB or Python coding**
Arévalo Cordero, Lata García, and Jurado, 2020 [21]	Li-ion bank in an off-grid hybrid system	Medium	Partial	Partial	Yes
Plett, 2004 [23]	Li-ion cell/bank	Medium	Yes	Yes	Yes
Burgos-Mellado et al., 2016 [25]	Li-ion bank	Complex	Yes	Yes	Yes
Xiong et al., 2013 [24]	Li-ion battery for SoC and peak-power estimation	Complex	Yes	Yes	Yes
Marín Collazos, 2017 [19]	Li-ion bank in a microgrid	Complex	Yes	Yes	Yes

References

[1] J. C. G. Madrid, "Sistema de gestión de energía de una microrred con fuentes renovables e inclusión de hidrógeno como sistema de almacenamiento en el sector eléctrico colombiano," Ph.D. dissertation, Pontificia Universidad Javeriana, 2022, compilation and indexing terms, 2022 Elsevier Inc. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/10554/63377https://doi.org/10.11144/Javeriana.10554.63377

[2] G. Maggio, G. Squadrito, and A. Nicita, "Hydrogen and medical oxygen by renewable energy based electrolysis: A green and economically viable route," *Applied Energy*, vol. 306, 1 2022.

[3] R. Assunção, W. Ajeeb, F. Eckl, D. M. Gomes, and R. C. Neto, "Decentralized hydrogen-oxygen co-production via electrolysis for large hospitals with integrated hydrogen refueling station," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 103, pp. 87–98, 2 2025.

[4] J. C. González-Madrid, L. G. Marín, K. Chamorro-Cáceres, A. Navas, and J. Vuelvas, "Energy management system for microgrid operation with green hydrogen storage in the colombian electricity sector," *Journal of Energy Storage*, vol. 152, p. 120224, 3 2026. [Online]. Available: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352152X25049382

[5] World Health Organization, "Oxygen," 2026, accessed: 2026-05-10. [Online]. Available: https://www.who.int/health-topics/oxygen

[6] E. Metreau, K. E. Young, and S. G. Eapen, "World bank country classifications by income level for 2024–2025," 2024, world Bank Blogs, Accessed: 2026-05-10. [Online]. Available: https://blogs.worldbank.org/en/opendata/world-bank-country-classifications-by-income-level-for-2024-2025

[7] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, "Viii encuentro de zonas no interconectadas – zni: hacia la transición energética justa," 2022, accessed: 2026-05-10. [Online]. Available: https://www.superservicios.gov.co/Sala-de-prensa/noticias/viii-encuentro-de-zonas-no-interconectadas-zni-hacia-la-transicion-energetica-justa

[8] Organisation for Economic Co-operation and Development, "Estudios económicos de la ocde: Colombia 2024," 2024, accessed: 2026-05-10. [Online]. Available: https://www.oecd.org/es/publications/estudios-economicos-de-la-ocde-colombia-2024_e61e16ad-es.html

[9] P. E. Fils, S. K. Ngoh, I. M. Mfetoum, and J. L. Nsouandele, "Design and economic analysis of an on-site electrolytic medical oxygen and solar electricity production system in a sunny country," *Energy for Sustainable Development*, vol. 72, pp. 314–325, 2 2023.

[10] D. R. V. EGAS, "Diseño de la automatización de un dispensador de oxígeno verde para uso doméstico mediante la electrólisis del agua." Ph.D. dissertation, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, 2022.

[11] Hernández González, H. D. and Calderón Rincón, J. F., "Estudio sobre factibilidad de la producción y utilización del hidrógeno verde en colombia," 2024, accessed: [2025-07-29]. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/11349/42044

[12] G. Squadrito, A. Nicita, and G. Maggio, "A size-dependent financial evaluation of green hydrogen-oxygen co-production," *Renewable Energy*, vol. 163, pp. 2165–2177, 1 2021.

[13] V. I. Luis, "Gestión de energía en sistemas con fuentes renovables y almacenamiento de energía basado en hidrógeno mediante control predictivo," Ph.D. dissertation, Universidad De Sevilla, 11 2013. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/11441/52296

[14] M. Espinosa-López, C. Darras, P. Poggi, R. Glises, P. Baucour, A. Rakotondrainibe, S. Besse, and P. Serre-Combe, "Modelling and experimental validation of a 46 kw pem high pressure water electrolyzer," *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 160–173, 4 2018.

[15] Y. Kim, J. Han, and S. Yu, "Establishment of energy management strategy of 50 kw pemfc hybrid system," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 2745–2756, 12 2023.

[16] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, and T. J. Harris, "Performance modeling of the ballard mark iv solid polymer electrolyte fuel cell ii. empirical model development," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 142, no. 1, pp. 9–15, 1995.

[17] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld, "Technical in-formation bulletins 465-223,465-225, 465-246. 6. p. wagner," *J. Electrochem. Soc*, vol. 138, p. 208, 1991.

[18] D. P. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 11, pp. 47–62, 1 2003.

[19] L. G. M. Collazos, "Design of real-time control strategies for microgrids," Ph.D. dissertation, Universidad de Chile, 6 2017.

[20] J. Zhou, Y. Wu, Z. Zhong, C. Xu, Y. Ke, and J. Gao, "Modeling and configuration optimization of the natural gas-wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system: A novel deviation satisfaction strategy," *Energy Conversion and Management*, vol. 243, 9 2021.

[21] P. A. Cordero, J. L. García, and F. Jurado, "Optimization of an off-grid hybrid system using lithium ion batteries," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 17, pp. 185–206, 1 2020.

[22] C. Stadler, J. Wack, S. Fraas, and S. Riedelbauch, "Development of an adapted turbine model for hydrokinetic turbines in 2d shallow water solvers," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 405. Institute of Physics Publishing, 12 2019.

[23] G. L. Plett, "High-performance battery-pack power estimation using a dynamic cell model," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, pp. 1586–1593, 9 2004.

[24] R. Xiong, H. He, F. Sun, X. Liu, and Z. Liu, "Model-based state of charge and peak power capability joint estimation of lithium-ion battery in plug-in hybrid electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 229, pp. 159–169, 2013.

[25] C. Burgos-Mellado, M. E. Orchard, M. Kazerani, R. Cárdenas, and D. Sáez, "Particle-filtering-based estimation of maximum available power state in lithium-ion batteries," *Applied Energy*, vol. 161, pp. 349–363, 1 2016.

[26] M. Talaie, F. Jabari, and A. A. Foroud, "Modeling and economic dispatch of a novel fresh water, methane and electricity generation system considering green hydrogenation and carbon capture," *Energy Conversion and Management*, vol. 302, 2 2024.

[27] K. C. Sandeep, S. Kamath, K. Mistry, A. K. M, S. K. Bhattacharya, K. Bhanja, and S. Mohan, "Experimental studies and modeling of advanced alkaline water electrolyser with porous nickel electrodes for hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, pp. 12 094–12 103, 4 2017.

[28] P. Haug, M. Koj, and T. Turek, "Influence of process conditions on gas purity in alkaline water electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, pp. 9406–9418, 4 2017.

[29] S. K. Kirati, M. Hammoudi, and I. M. Mousli, "Hybrid energy system for hydrogen production in the adrar region (algeria): Production rate and purity level," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, pp. 3378–3393, 2 2018.

[30] M. Sánchez, E. Amores, L. Rodríguez, and C. Clemente-Jul, "Semi-empirical model and experimental validation for the performance evaluation of a 15 kw alkaline water electrolyzer," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, pp. 20 332–20 345, 11 2018.

[31] D. Guilbert and G. Vitale, "Dynamic emulation of a pem electrolyzer by time constant based exponential model," *Energies*, vol. 12, 2 2019.

[32] M. David, H. Alvarez, C. Ocampo-Martinez, and R. Sánchez-Peña, "Dynamic modelling of alkaline self-pressurized electrolyzers: a phenomenological-based semiphysical approach," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, pp. 22 394–22 407, 9 2020.

[33] S. Ding, B. Guo, S. Hu, J. Gu, F. Yang, Y. Li, J. Dang, B. Liu, and J. Ma, "Analysis of the effect of characteristic parameters and operating conditions on exergy efficiency of alkaline water electrolyzer," *Journal of Power Sources*, vol. 537, 7 2022.

[34] J. J. Patiño, C. Velásquez, E. Ramirez, R. Betancur, J. F. Montoya, E. Chica, P. Romero-Gómez, A. M. Kannan, D. Ramírez, P. Eusse, and F. Jaramillo, "Renewable energy sources for green hydrogen generation in colombia and applicable case of studies," *Energies*, vol. 16, 12 2023.

[35] M. Chatenet, D. Cornu, S. Kulesa, V. Artero, T. Jaramillo, and P. Strasser, "Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments," *Chemical Society Reviews*, vol. 51, pp. 9747–9791, 2022.

[36] F. Gambou, D. Guilbert, M. Zasadzinski, and H. Rafaralahy, "A comprehensive survey of alkaline electrolyzer modeling: Electrical domain and specific electrolyte conductivity," 5 2022.

[37] Y. Wang, Y. Zhang, C. Zhang, J. Zhou, D. Hu, F. Yi, Z. Fan, and T. Zeng, "Genetic algorithm-based fuzzy optimization of energy management strategy for fuel cell vehicles considering driving cycles recognition," *Energy*, vol. 263, 1 2023.

[38] S. N. Motapon, L. A. Dessaint, and K. Al-Haddad, "A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 1320–1334, 2014.

[39] F. Z. Belhaj, H. E. Fadil, Z. E. Idrissi, A. Intidam, M. Koundi, and F. Giri, "New equivalent electrical model of a fuel cell and comparative study of several existing models with experimental data from the pemfc nexa 1200 w," *Micromachines*, vol. 12, 9 2021.

[40] A. Omran, A. Lucchesi, D. Smith, A. Alaswad, A. Amiri, T. Wilberforce, J. R. Sodré, and A. G. Olabi, "Mathematical model of a proton-exchange membrane (pem) fuel cell," *International Journal of Thermofluids*, vol. 11, 8 2021.

[41] H. Dagdougui, R. Minciardi, A. Ouammi, M. Robba, and R. Sacile, "A dynamic decision model for the real-time control of hybrid renewable energy production systems," *IEEE Systems Journal*, vol. 4, pp. 323–333, 9 2010.

[42] F. J. L. Montecinos, "Desarrollo y validacion de un modelo de optimizacion energetica para una microrred memoria para optar al título de ingeniero civil electricista," Universidad de Chile, Tech. Rep., 2011.

[43] E. F. T. Forero, "Método para el despacho de recursos energéticos en plantas de generación eólica y fotovoltaica," Ph.D. dissertation, Universidad Distrital Francisco José De Caldas, 2019. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/11349/23559

[44] M. Ibrahim, A. Rassõlkin, T. Vaimann, A. Kallaste, J. Zakis, V. K. Hyunh, and R. Pomarnacki, "Digital twin as a virtual sensor for wind turbine applications," *Energies*, vol. 16, 9 2023.

[45] J. Riglin, W. C. Schleicher, and A. Oztekin, "Numerical analysis of a shrouded micro-hydrokinetic turbine unit," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 53, pp. 525–531, 7 2015.

[46] J. C. Pineda, A. Rubio-Clemente, and E. Chica, "Optimization of a gorlov helical turbine for hydrokinetic application using the response surface methodology and experimental tests," *Energies*, vol. 17, 11 2024.

[47] M. M. Khojasteh, S. Bahreinian, and A. Riasi, "Predictive modeling for savonius hydrokinetic turbine performance: a machine learning investigation," *Energy*, vol. 340, 12 2025.

Análisis CFD de turbinas eólicas Savonius empleando superficies texturizadas bio-inspiradas en dunas de arena tipo Barchanoid

1st Jairo Andres Ibañez Grajales
Estudiante de Ingeniería Mecánica
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medllin, Colombia
jairo.ibanez914@pascualbravo.edu.co

2nd Jhon Fredy Hincapie
Docente del departamento de Ingeniería Mecánica
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellin, Colombia
jhon.hincapie@pascualbravo.edu.co

3rd Ivan David Patiño
Docente del departamento de Ingeniería Mecánica
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellion, Colombia
i.patinoar@pascualbravo.edu.co

***Abstract*— En este trabajo se propone mejorar la eficiencia aerodinámica, coeficiente de potencia (Cp), de las turbinas eólicas tipo Savonius convecionales utilizando superficies texturizadas bio-inspiradas sobre el lado cóncavo de las palas. Las superficies texturizadas son inspiradas en las dunas de arenas, las cuales son generadas naturalmente por la interacción con el viento. Cada pala tiene un lado cóncavo encargado de generar el par positivo y un lado convexo encargado de generar el par negativo, permitiendo el movimiento de la turbina. El uso de superficies texturizadas bio-inspiradas sobre las palas cóncavas, pueden alterar la capa límite del flujo de viento, incrementando la turbulencia, mejorando la transferencia de energía entre el flujo de viento y la turbina. Las turbinas Savonius se caracterizan por su robustez y su capacidad de operar en diferentes condiciones de viento; sin embargo, presentan limitaciones en su eficiencia aerodinámica debido a la fuerza de sustentación y arrastre presentes sobre sus palas. En el lado cóncavo de las palas se replicp patrones geométricos de las dunas de arena tipo "Barchanoid", mejorando la eficiencia aerodinámica de la turbina Savonius.**

El objetivo de este trabajo es evaluar la eficiencia de las turbinas Savonius incorporando superficies texturizadas bio-inspiradas tipo "Barchanoid" en el lado cóncavo de la pala utilizando mecánica de fluidos computacional (CFD). Las simulaciones fueron realizadas en el software libre OpenFoam. Los resultados de este trabajo podrían resultar muy atractivos para las empresas que diseñan y fabrican aerogeneradores, ya que podrían mejorar notablemente la captación de energía eólica y la eficiencia general del sistema.

Keywords—Turbina Savonius, Eficiencia aerodinámica, Superficies texturizadas Bio-inspiradas, Dunas de arena, Coeficiente de potencia (Cp).

I. INTRODUCCION

El desarrollo económico, el rápido aumento de la población mundial y el desarrollo industrial a nivel mundial han generado un aumento en la demanda de energía a nivel mundial, lo que exige una transición hacia las fuentes de energía renovable. Las fuentes de energía convencionales, en especial los combustibles fósiles, presentan una disponibilidad limitada y son las responsables principales del incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, lo cual contribuye al calentamiento global. En este sentido, la energía eólica ha sido clave, destacándose como una de las fuentes de energía más prometedoras de energía limpia y sostenible [1]. Ante esta realidad, las turbinas eólicas se han convertido en una tecnología clave para la generación de energía limpia y sostenible.Las turbinas eólicas, en función del eje de rotación, se dividen en turbinas de eje horizontal (HAWTs) y turbinas de eje vertical (VAWTs) [2]. Mientras que las HAWTs se utilizan principalmente en la generación de energía eléctrica a gran escala debido a su mayor eficiencia aerodinámica. Las VAWTs ofrecen ventajas debido a su simplicidad mecánica y de funcionamiento, así como una adaptabilidad ideal para entornos urbanos con velocidades de viento inestables [3].

Las VAWTs tipo Savonius han sido objeto de estudio por su simplicidad mecánica y su capacidad de auto arranque a bajas velocidades del viento, lo que las convierte en una opción viable para entornos urbanos y micro generación, en lugares donde se puedan encontrar condiciones óptimas para la generación energética limpia y sostenible [4]. Sin embargo, su eficiencia aerodinámica global sigue siendo limitada, con coeficiente de potencia (Cp) entre 0.20 y 0.30 debido a la separación del flujo en el lado cóncava de las palas y la formación de vórtices de estela, lo que reducen el par útil del rotor y aumentan las pérdidas debido a la turbulencia generada en la turbina. Como reportan Al-Ghriybah et al. [5].

Para superar esta limitación, las investigaciones se han centrado en optimizar los parámetros geométricos fundamentales del rotor como la relación de solapamiento (OR), la relación de aspecto (AR) y el número de las palas. También, se han implementado dispositivos externos que redirigen el flujo del viento hacia el lado cóncavo de las palas, buscando minimizar el efecto del par negativo en la turbina, este se debe a la resistencia generada por la interacción entre el lado convexo y el viento. Una de las soluciones externas más eficaces es el uso de venas guía y/o deflectores ha demostrado ser efectivo, como lo explican Dewan et al. [6]. Quienes indican que estos dispositivos externos están diseñados para redirigir el flujo de

viento hacia el lado cóncavo de las palas, reduciendo el flujo de viento que entra en contacto con el lado convexo. También se ha probado el uso de palas multietapa, buscando aumentar el par positivo generando un aumento del CP del sistema. Recientemente se ha desarrollado una nueva área de investigación que explora la modificación de las superficies cóncavas de las palas, mediante la implementación de texturas que modifican el comportamiento del viento buscando aumentar la eficiencia del sistema. Esta área tiene como objetivo aumentar la fuerza de arrastre en el lado cóncavo de las palas. En este sentido Sumiati et al. [7] En sus estudios han demostrado el potencial de utilizar texturas en el lado cóncavo; la incorporación de patrones en zigzag en la superficie cóncava ha permitido aumentar el Cp hasta en un 16% o un 26.5% en comparación con las palas semicirculares convencionales, ya que aumentan la superficie de contacto.

Kar [8] describe que las formaciones dunares presentan una amplia diversidad morfológica que responde a la interacción entre el régimen de vientos, la disponibilidad de sedimentos y la estabilidad del suelo. Entre las tipologías más comunes documentadas se encuentran las dunas longitudinales (o lineales), las de barchan y las barchanoid. Según Khosronejad et al. [9] las dunas de barchan se definen por su forma de medialuna, Se caracterizan por tener un lado convexo orientado hacia el viento y "cuernos" que se extienden hacia adelante. Generalmente, se presentan como unidades aisladas e individuales en áreas con suministro limitado de arena. Baughman et al. [10] indica que las formaciones dunares longitudinales se manifiestan como crestas alargadas y asimétricas que se orientan de manera paralela a la dirección prevaleciente del viento y estas pueden extenderse por kilómetros. Por su parte Billières et al [11]. Habla acerca de las dunas barchanoid como una fase donde las dunas muestran una geometría creciente definida pero interconectada, formando cadenas o crestas transversales de dunas de barchan esta característica hace que su formación sea ondulada lo largo de grandes distancias, debido a estas características geométricas seleccionamos ese tipo de dunas para esta investigación.

En este artículo, se evalúa la eficiencia aerodinámica de las turbinas eólicas tipo Savonius agregando superficies texturizadas bio-inspiradas en dunas de arena tipo barchanoid en el lado cóncavo de las palas, utilizando herramientas de mecánica de fluidos computacional (CFD). Esta investigación busca aumentar el coeficiente de potencia (Cp) en comparación con configuraciones convencionales, contribuyendo al desarrollo de soluciones más eficientes para la generación de energía limpia y sostenible en entornos con bajas velocidades de viento.

II. Metodologia

A. *Diseño de la turbina texturizada bio-inspirada*

Para el desarrollo del presente estudio se estableció la parametrización geométrica de turbinas Savonius texturizada bio-inspiradas en dunas de arena tipo barchanoid apoyados en la revisión de la literatura, modelado CAD y su posterior evaluación aerodinámica. La turbina Savonius consta de dos palas con perfil semicircular convencional, con un radio $r_p = 0.0575\ [m]$, un diámetro de la turbina de $D = 0.20\ [m]$, una altura de la turbina de $H = 0.20\ [m]$, un diámetro de un diámetro de placa terminales de $D_0 = 1.1\ D$, y una relación de solapamiento, $\frac{e}{D} = 0.15$, que corresponde a una relación de solapamiento [12-16]. Esta selección se fundamentó en estudios previos que identifican este rango de solapamiento como óptimo para canalizar el flujo hacia la pala de retorno y maximizar el coeficiente de potencia (Cp) [6,12-18]. El espesor de las palas, para todos los casos, fue de 4 [mm].

Para las palas, se realizó una texturización en la superficie cóncava. Estas texturas representan una estructura bio-inspiradas en las dunas de arena tipo barchanoid. La textura de las superficies de las palas se fundamentó en la estructura de las dunas, ya que estas formaciones representan una fase avanzada de madurez y autoorganización en los sistemas eólicos naturales [11]. A diferencia de las dunas individuales, las barchanoid tienen una geometría creciente interconectada que ha sido optimizada por la naturaleza para manipular el flujo de viento, guiando las líneas de corriente y manteniendo el flujo adherido a través de ella. La configuración geométrica de las dunas tipo barchanoid se definió a partir de una longitud de onda de $\lambda = 0.015\ [m]$ y una amplitud de $s = 0.002\ [m]$. La extrusión se aplicó sobre las superficies circulares de las palas, en el lado cóncavo, con un ángulo $\theta = 10°$ y $\alpha = 33°$ respecto a la curva tangente de las palas. A lo largo de la curvatura tangente de cada pala, se crearon 11 repeticiones de estas formaciones dunares, distribuidas de manera uniforme. Al replicar este patrón en la superficie cóncava de la turbina, se busca aprovechar su capacidad para minimizar el desprendimiento de la capa límite y maximizar la captura de energía, permitiendo que la forma de "media luna" actúe como un concentrador de flujo en su parte cóncava ayudando a aumentar el par positivo. Estos parámetros fueron integrados en un entorno de diseño asistido por computadora mediante FreeCAD, donde se generó el modelo tridimensional de la turbina siguiendo esta parametrización geométrica, ver fig. 1.

B. *valuación Del Desempeño De La Turbina*

El rendimiento de una turbina Savonius convencional se basa en la diferencia de las fuerzas aerodinámicas entre el lado cóncavo y el convexo. El torque positivo es asociado con la potencia positiva, P^+, generado por la superficie cóncava de las palas. Mientras que, el torque negativo es asociado con a la potencia negativa. P^-, generado por la superficie convexa de las palas [19]. Ecuación (3)y (4), respectivamente.

$$P^+ = \frac{1}{2}\rho A[c_1(V-\vartheta)^2]\vartheta, \quad (1)$$

$$P^- = \frac{1}{2}\rho A[c_2(V-\vartheta)^2]\vartheta, \quad (2)$$

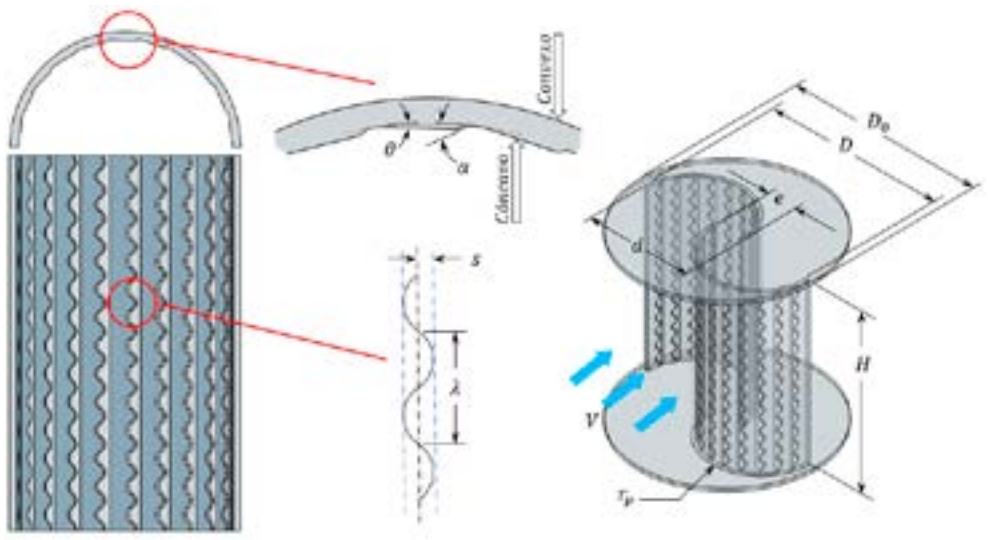


Fig. 1. Parametrización geométrica de la turbina Savonius texturizada bio-inspiradas en dunas de arena tipo barchanoid.

donde, ρ es la densidad del aire [Kg / m^3], Aes el área proyectada de la turbina $[m^2]$*, calculada según* $A = D * H = (2d - e) * H$*, V es la velocidad del viento incidente en [m/s]. ϑ es la velocidad tangencial de las palas y R es el radio de la turbina [m],* c_1 *y* c_2 *son coeficientes de arrastre para el lado cóncavo y convexo, con valores* 0.92 *y* 0.41 *respectivamente, sin ningún tipo de texturas sobre las palas [4].*

El torque positivo y negativo puede obtenerse dividiendo cada potencia entre la velocidad angular de la turbina, de la siguiente forma:

$$T = \frac{P}{\omega}, \tag{3}$$

Donde, ω es la velocidad angular [rad/s]. después de obtener estos resultados podemos calcular el torque neto con la siguiente forma:

$$T_{neto} = T^{+} - T^{-} \tag{4}$$

El coeficiente de potencia se define como la relación entre la potencia mecánica extraída por la turbina y la potencia disponible en el flujo del viento. Esta se calcula de la siguiente forma:

$$C_p = \frac{T_{neto} * \omega}{0.5 * \rho * A * V^3}. \tag{5}$$

III. Modelamiento Matematico

En esta sección se describe el dominio computacional, generación de malla y las condiciones de frontera utilizadas en la simulación computacional tridimensional realizadas en OpenFoam.

A. Dominio Computacional

El dominio computacional fue parametrizado en el software FreeCAD. Compuesto por dos regiones separadas por una interfaz deslizante. Una región cilíndrica giratoria, donde se encuentra inmersa la turbina Savonius. Esta tiene un diámetro de 0.231 [m] y una altura de 0.248 [m], centrada respecto al eje de rotación de la turbina. Una región rectangular fija, donde se representa el entorno circundante. El dominio se extiende $8D$ aguas arriba, $16D$ aguas debajo de la turbina, y se estableció una sección transversal cuadrada de $12D$, distancia suficiente para evitar perturbaciones en el campo de flujo. Este se muestra en la Fig. 2.

B. Generacion De Malla

La malla fue generada con las herramientas de OpenFOAM, blockMesh que crea una malla base y snappyHexMesh que ajusta la malla base a superficies más complejas. Se creó una zona de refinamiento local alrededor de la turbina Savonius, mejorando la precisión de los flujos separados o de estela encontrado en cada simulación. Adicionalmente, se refino los vértices de las texturas bio-inspiradas para reproducir con mayor precisión las formas complejas de las dunas barchanoid. Sobre las superficies de las palas se establecieron capas prismáticas de inflado, con una relación de crecimiento de 1.15 y una altura inicial de 0.20 [mm]. Permitiendo controlar el valor del $y^+ < 30$, adecuado para simulaciones de turbomáquinas. El tamaño de las capas de inflación y las celdas cercana a las palas de la turbina Savonius desempeña un papel fundamental en la precisión de las simulaciones, especialmente en la predicción de la separa de flujo y del torque aerodinámico. Ver fig.3.

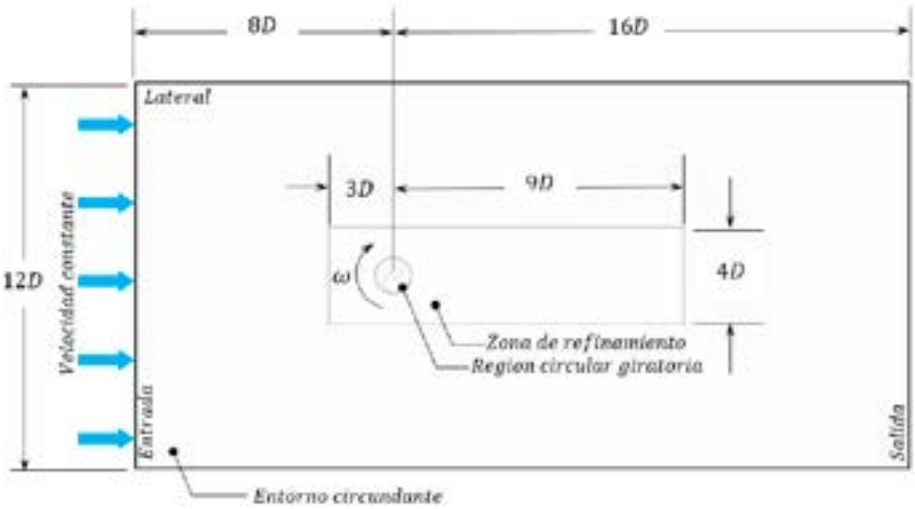


Fig.2. Dominio computacional

C. Modelo Computacional

Las ecuaciones que describen el flujo turbulento incompresible, adiabático y transitorio fueron modeladas mediante las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS), utilizando el método de volúmenes finitos en el software OpenFOAM. Se asignaron las condiciones de frontera al dominio computacional. Para la región rectangular fija se tiene que la superficie de entrada tiene una velocidad constante de 6 $\frac{m}{s}$, y una intensidad turbulenta de 0.05%. La superficie de salida tiene una presión fija de cero, las superficies laterales se aplicó una condición de deslizamiento (slip). La turbina Savonius tiene una condición de no deslizamiento (noSlip). La región cilíndrica giratoria se aceleró mediante una rampa lineal de velocidad angular, ω. La rotación se inició mediante una rampa de aceleración entre 0 [s] a 4 [s], donde la velocidad angular aumenta linealmente hasta alcanzar el valor definido por el TSR. A partir de los 4 [s], la velocidad angular se mantiene constante. La velocidad angular para la región cilíndrica giratoria en cada simulación se definió en función del TSR. La interfaz deslizante se definió mediante una condición de tipo cyclicAMI, el cual permite la transferencia de información entre mallas que no comparten nodos ni caras coincidentes. Para todas las simulaciones realizadas, el fluido de trabajo fue aire a 20 °C, con sus propiedades constantes; densidad de 1,225 [kg/m³] y una viscosidad cinemática de 1.7894 10^{-5} [kg/m·s].

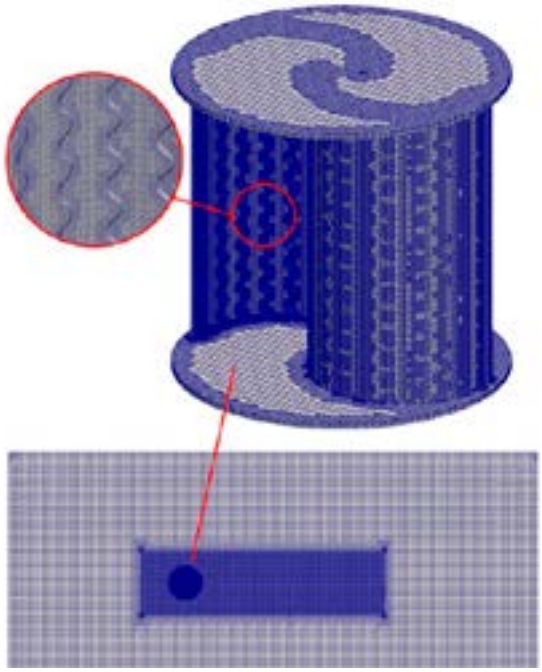


Fig.3. Configuración de la malla

IV. Resultados

A. Sensibilidad de Malla

Con el fin de garantizar la precisión de los resultados obtenidos se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de malla variando el número de celdas en una simulación de una turbina Savonius convencional. En la Fig.4 se muestran los valores obtenidos, del torque en el lado cóncavo y convexo de las palas de la turbina Savonius. Adicionalmente, se calculó el torque total. Se puede apreciar que el T_total tiende a estabilizarse a partir de $2{,}20 \times 10^6$ celdas, con una variación menor al 2%, respecto a mallas más refinadas. La misma tendencia se puede apreciar para $T\_Concavo$ y $T\_Convexo$, indicando una baja dependencia de los resultados obtenidos frente a la malla utilizada. Ofreciendo un equilibrio entre precisión numérica y costo computacional.

B. Validacion Modelo Computacional

El modelo computacional realizado en OpenFOAM se validó comparando el coeficiente de potencia, C_p, obtenido numéricamente con los resultados analíticos publicado por

Sugiharto et al. [20], para diferentes TSR. Para esto, se utilizó una turbina Savonius convencional, con las mismas características geométricas, permitiendo reproducir el comportamiento aerodinámico de la turbina antes de incorporar el efecto de las texturas bio-inspiradas en las dunas de arena. Los resultados presentados en la Fig.5, muestran una tendencia entre los valores obtenidos del $C_p\ OpenFOAM$ y el $C_p\ Analitico$. El modelo computacional realizado en OpenFOAM reproduce con precisión el C_p a bajos índices de TSR, cercana al rendimiento máximo de la turbina. Mientras que, a valores de TSR más altos, se presenta una desviación entre los resultados numéricos con los analíticos. Esto puede atribuirse al comportamiento turbulento del fluido, efectos transitorios o la interacción dinámica entre la turbina y el entorno circundante.

Por último, el uso de interfaz deslizante en las simulaciones permitió representar con precisión el movimiento giratorio entre la región cilíndrica giratoria y la región rectangular fija, proporcionando una estrategia numérica adecuada para capturar los efectos asociados a cuerpo giratorios en este tipo de simulaciones transitorias. Esta estrategia resulta especialmente relevante en las turbinas eólicas, donde el torque y el C_p dependen en gran medida de la posición angular de la turbina, la separación de flujo, la formación de vórtices y la variación de las fuerzas aerodinámicas.

C. Analisis del Coeficiente de Potencia C_p

Los valores del coeficiente de potencia, C_p, obtenidos para diferentes TSR de una turbina Savonius texturizada bio-inspiradas en dunas de arena tipo barchanoid se muestran en la Fig.6. La línea punteada representa los valores del C_p para una turbina Savonius convencional, con los mismos parámetros geométricos. Por su parte, los triángulos corresponden a los valores obtenidos numéricamente para una configuración con texturas bio-inspiradas en dunas de arena tipo barchanoid a una velocidad del flujo de viento de $V = 6\ \left[\frac{m}{s}\right]$.

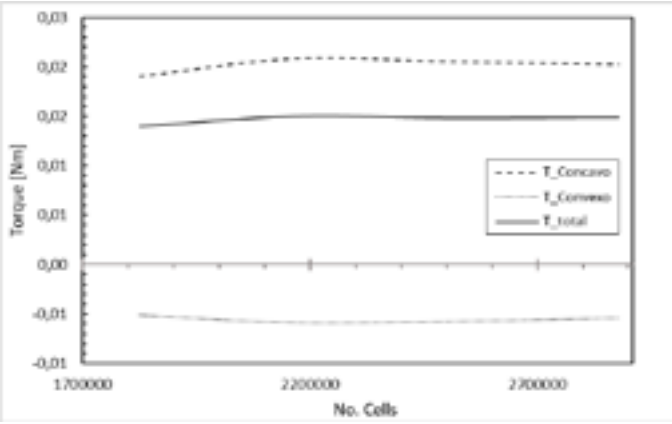


Fig.4 Valores de sensibilidad de malla para la turbina Savonius.

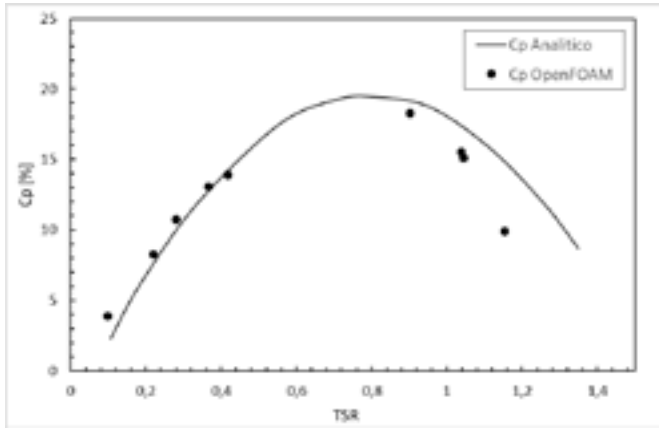


Fig.5. Comparación del Cp para una turbina Savonius convencional

Se observa que la turbina Savonius texturizada presenta valores más altos del coeficiente de potencia, con valores de TSR entre 0.6 a 0.8, en comparación con una turbina Savonius convencional.

Este incremento puede atribuirse al aumento de la superficie del lado cóncavo de la pala en contacto con el flujo de viento debido a la forma de las texturas bio-inspiradas en las dunas de arena tipo barchanoid. El aumento de la superficie incrementa la cantidad de energía capturada, mejorando el rendimiento de la turbina.

D. Campo de Presion y Velocidad

En la fig.7 se muestran los contornos de presión, en un plano medio a) y b) y sobre las superficies cóncavo de la pala c) y d). Todos los contornos se llevaron a cabo con un $TSR = 0.8$ y una velocidad del viento de entrada de $V = 6\ m/s$. Para las dos configuraciones, sin y con texturas, en el lado convexo se tiene presiones de alta presión. Mientras que, para la superficie en el lado cóncavo, la que tiene las texturas bio-inspirada en dunas de arena tipo barchanoid presenta una presión más elevada y uniforma sobre toda la superficie concava. Debido a esta diferencia de presión la turbina es impulsada por un torque más fuerte del lado convexo.

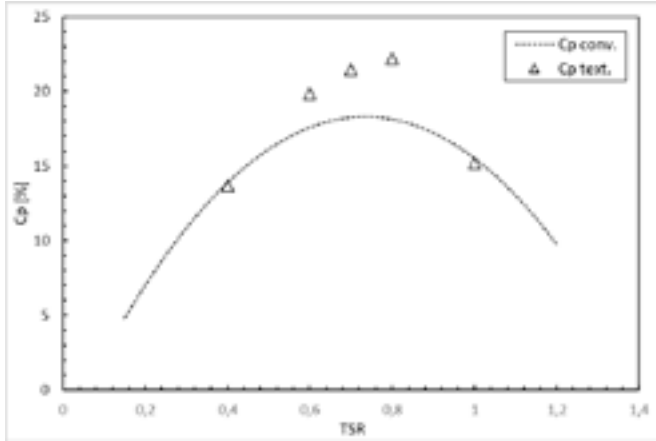


Fig.6. Coeficiente de potencia de turbinas Savonius

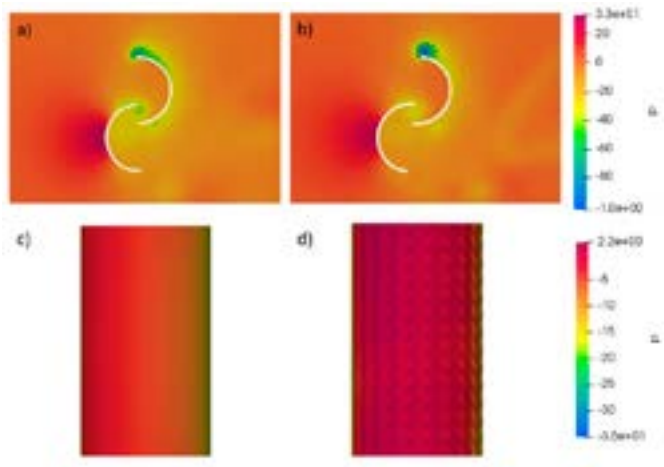


Fig.7. Contornos de presión sobre las superficies de las palas de la turbina Savonius

El análisis de la velocidad es esencial para comprender mejor el desarrollo de los flujos de viento entre las palas de la turbina Savonius. En la fig.8 se muestran las líneas de corriente y el campo de velocidad para la turbina Savonius, del lado izquierdo se muestra la turbina convencional y del lado derecho se muestra la turbina con superficies bio-inspirada en las dunas de arena tipo barchanoid. Como consecuencia del movimiento giratorio de la turbina, la superficie cóncava texturizada genera una mayor vorticidad, con velocidades mas altas entre las palas de la turbina. La presencia de estos vórtices entre las palas de la turbina demuestra que existe una mayor diferencia de presión que en una turbina Savonius convencional.

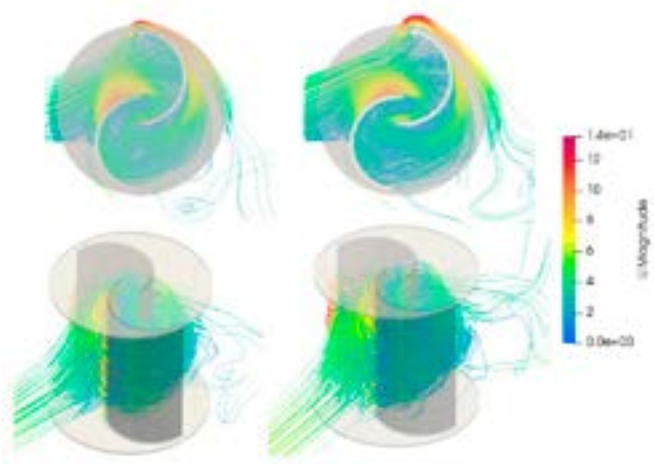


Fig.8. Lineas de corriente de las turbinas Savonius convencionales y texturizadas Bio-inspiradas en las dunas de arena tipo Barchanoid

V. Conclusiones

En este trabajo se analizó numéricamente el impacto de modificar las superficies cóncavo de las palas de unas turbinas Savonius convencional, mediante la texturización bio-inspirada en las dunas de arena tipo barchanoid. La superficie texturizada en las palas de la turbina mostro mejores características del coeficiente de potencia para un rango de valores de TSR. El análisis de los campos de presión, velocidad y las líneas de corrientes sobre y entre las palas de la turbina modifica la estructura aerodinámica del flujo de viento, generando mayor vorticidad y diferencias de presión entre las palas de la turbina.

Referencias

[1]Gorgulu, Y. F., & Ozgur, M. A. (2025). Aerodynamic enhancement of wind turbine blades through Peregrine falcon-inspired surface designs. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *e70060*. https://doi.org/10.1002/ep.70060

[2] Deka, P. (2022). *Influence of design parameters on the performance of Savonius wind turbine*. https://doi.org/10.5281/ZENODO.6471838

[3] Torres, S., Marulanda, A., Montoya, M. F., & Hernandez, C. (2022). Geometric design optimization of a Savonius wind turbine. *Energy Conversion and Management*, *262*(115679), 115679. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115679

[4] Shishkin, N. D., & Ilyin, R. A. (2018). Savonius rotors research for the self-generated power supply by land and by sea. *Journal of physics. Conference series*, *1111*, 012056. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1111/1/012056

[5] Al-Ghriybah, M., & Didane, D. H. (2023). Performance improvement of a Savonius wind turbine using wavy concave blades. *CFD Letters*, *15*(9), 32–44. https://doi.org/10.37934/cfdl.15.9.3244

[6] Dewan, A., Gautam, A., & Goyal, R. (2021). Savonius wind turbines: A review of recent advances in design and performance enhancements. *Materials Today: Proceedings*, *47*, 2976–2983. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.205

[7]Sumiati, R., Dinata, U., Gatot, & Saputra, D., Adi. (2024). Enhancing the performance of Savonius rotor using tiered-height zigzag patterns in concave surface. *Istrazivanja i Projektovanja Za Privredu*, *22*(2), 113–122. https://doi.org/10.5937/jaes0-46250

[8] Kar, A. (1990). Megabarchanoids of the Thar: Their environment, morphology and relationship with longitudinal dunes. *The Geographical Journal*, *156*(1), 51. https://doi.org/10.2307/635436

[9] Khosronejad, A., Kang, S., Farhadzadeh, A., & Sotiropoulos, F. (2020). On the genesis and evolution of barchan dunes: Hydrodynamics. *Physics of Fluids (Woodbury, N.Y.: 1994)*, *32*(8). https://doi.org/10.1063/5.0015515

[10] Baughman, C. A., Jones, B. M., Bodony, K. L., Mann, D. H., Larsen, C. F., Himelstoss, E., & Smith, J. (2018). Remotely sensing the morphometrics and dynamics of a cold region dune field using historical aerial photography and airborne LiDAR data. *Remote Sensing*, *10*(5), 792. https://doi.org/10.3390/rs10050792

[11] Billières, C., Billy, J., Bourillot, R., & Féniès, H. (2025). Characterization of barchanoid dune systems on the Cap Ferret spit (Aquitaine). In *ASF Publications* (pp. 1–4). Association des Sédimentologistes Français.
[12]Chitura, A. G., Mukumba, P., & Lethole, N. (2024). Enhancing the performance of Savonius wind turbines: A review of advances using multiple parameters. Energies, 17(15), 3708. https://doi.org/10.3390/en17153708
[13] Wu, K.-T., Lo, K.-H., Kao, R.-C., & Hwang, S.-J. (2022). Numerical and experimental investigation of the effect of design parameters on Savonius-type hydrokinetic turbine performance. Energies, 15(5), 1856. https://doi.org/10.3390/en15051856
[14] Paudel, A., & Shrestha, R. (2025). Design simulation and experimental verification of optimized savonious wind turbine profile. Journal of Advanced College of Engineering and Management, 10, 47–58. https://doi.org/10.3126/jacem.v10i1.76318
[15] Farajyar, S., Ghafoorian, F., Mehrpooya, M., & Asadbeigi, M. (2023). CFD investigation and optimization on the aerodynamic performance of a Savonius vertical axis wind turbine and its installation in a hybrid power supply system: A case study in Iran. Sustainability, 15(6), 5318. https://doi.org/10.3390/su15065318
[16] Wong, K. H., Foo, J. S. Y., Chong, W. T., Mat, S., & Ng, J. H. (2024). Experimental investigation into the effects of endplate designs for a Savonius turbine. IOP conference series. Earth and environmental science, 1372(1), 012010. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1372/1/012010
[17] Aboujaoude, H., Polidori, G., Beaumont, F., Murer, S., Toumi, Y., & Bogard, F. (2024). Comparative Study of Deflector Configurations under Variable Vertical Angle of Incidence and Wind Speed through Transient 3D CFD Modeling of Savonius Turbine. Computation.
[18] Prabowoputra, D. M., & Prabowo, A. R. (2022). Effect of geometry modification on turbine performance: Mini-review of savonius rotor. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 777–783. https://doi.org/10.18178/ijmerr.11.10.777-783
[19] Deda Altan, B., & Gultekin, G. S. (2023). Investigation of performance enhancements of Savonius wind turbines through additional designs. Processes (Basel, Switzerland), 11(5), 1473. https://doi.org/10.3390/pr11051473

[20] Sugiharto, B., Soeparman, S., Widhiyanuriyawan, D., & Wahyudi, S. (2020). Characteristics of the savonius wind turbine using multiple guide vanes. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 13(3), 606–614. https://doi.org/10.5293/ijfms.2020.13.3.606

Modelamiento de sistemas de energía renovable usando algoritmos de identificación fuera de línea

Diego Fernando Ramírez-Jiménez
Programa de Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
dframirez@uniquindio.edu.co
Estudiante de Doctorado en Ingeniería
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
diego.ramirez4@utp.edu.co

Eduardo Giraldo Suárez
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
egiraldos@utp.edu.co

Claudia Milena González-Arbeláez
Programa de Tecnología en Instrumentación Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
cmgonzalez@uniquindio.edu.co

***Abstract*—Electrical microgrids based on renewable energy sources exhibit complex dynamics that hinder the derivation of accurate mathematical models through conventional modeling techniques. System identification provides a data-driven alternative for obtaining such models through the systematic analysis of various identification methods applied to the same renewable energy system. This work aims to perform a comparative analysis of different system identification techniques applied to a DC microgrid with multiple interconnection nodes integrated by renewable energy sources. The proposed identification methods include least squares, parametric identification (ARX, ARMAX), and subspace identification (MOESP, N4SID), encompassing both deterministic and stochastic approaches. The proposed methodology focuses on the simulation of a DC microgrid with multiple interconnected nodes, implemented in MATLAB/Simulink from a Simscape model. Model order selection is carried out using information criteria (AIC, BIC, FPE) for parametric methods and singular value analysis for subspace methods. Preliminary results show that the identification methods employed achieve fit percentages above 85% in predicting the output variables of the microgrid. Subspace methods (MOESP and N4SID) exhibit advantages in the direct identification of multivariable models without requiring prior parameterization, while parametric methods offer greater flexibility in modeling the noise process. The comparative analysis reveals significant differences in the performance of each method depending on the dynamic characteristics of the identified subsystem, providing practical criteria for selecting the most suitable method according to the established requirements.**

Keywords*— *electric microgrids, renewable energy, system identification

***Resumen*—Las microrredes eléctricas basadas en fuentes de energía renovable presentan dinámicas complejas que dificultan la obtención de modelos matemáticos precisos mediante técnicas convencionales de modelamiento. La identificación de sistemas ofrece una alternativa basada en datos para la obtención de estos modelos a partir del análisis sistemático de diferentes métodos de identificación sobre un mismo sistema de energía renovable. El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de diferentes técnicas de identificación de sistemas aplicadas a una microrred DC con múltiples nodos de interconexión e integrada por fuentes de energía renovable. Los métodos de identificación propuestos incluyen técnicas como mínimos cuadrados, identificación paramétrica (ARX, ARMAX) e identificación por subespacio (MOESP, N4SID), abarcando enfoques tanto deterministas como estocásticos. La metodología propuesta se centra en la simulación de una microrred DC con múltiples nodos interconectados, implementada en MATLAB/Simulink desde un modelo en Simscape. La selección del orden de los modelos se realiza mediante criterios de información AIC, BIC, FPE para los métodos paramétricos y análisis de valores singulares para los métodos de subespacio. Los resultados preliminares muestran que los métodos de identificación usados alcanzan porcentajes de ajuste superiores al 85% en la predicción de las variables de salida de la microrred. Los métodos de subespacio (MOESP y N4SID) presentan ventajas en la identificación directa de modelos multivariables sin requerir parametrización previa, mientras que los métodos paramétricos ofrecen mayor flexibilidad en el modelado del proceso con ruido. El análisis comparativo muestra diferencias significativas en el desempeño de cada método según las características dinámicas del subsistema identificado, lo cual proporciona criterios prácticos para la selección del método más adecuado en función de los requerimientos establecidos.**

Palabras clave*— *energía renovable, microrredes eléctricas, identificación de sistemas.

I. Introducción

En las últimas dos décadas, las microrredes eléctricas se han consolidado como una estructura clave en la transición energética, al permitir la integración coordinada de recursos energéticos distribuidos (DER), almacenamiento local y cargas controlables bajo un esquema de operación en red o aislada [1], [2]. En este contexto, las microrredes en corriente continua (DC) han recibido especial atención, ya que reducen las etapas de conversión, los problemas de sincronización característicos de los sistemas AC, y resultan naturalmente compatibles con fuentes fotovoltaicas, sistemas de almacenamiento y cargas electrónicas modernas [1], [3]. No obstante, la generación simultánea (solar y eólica) introduce desafíos para el modelado dinámico; relacionados principalmente a ruido, no linealidades y factores exógenos del sistema [4], [5].

El modelado físico convencional de microrredes eléctricas, basado en ecuaciones y la interconexión de bloques

electromecánicos, se torna impracticable cuando aumenta la complejidad topológica, cuando los parámetros de los convertidores o generadores son desconocidos o variantes, o cuando existen dinámicas no modeladas asociadas a filtros, controladores embebidos y comportamientos no lineales del sistema [6]. En estas circunstancias, la identificación de sistemas ofrece una alternativa robusta y basada en datos que permite alcanzar representaciones matemáticas del comportamiento entrada–salida de la microrred a partir de mediciones experimentales [7], [8]. La literatura distingue tradicionalmente entre métodos clásicos paramétricos basados en la minimización del error de predicción sobre estructuras ARX, ARMAX u OE y métodos modernos de subespacio, que estiman directamente un modelo en espacio de estados mediante proyecciones geométricas y descomposiciones numéricas robustas [8], [9].

Las dinámicas de una microrred con fuentes de energía renovables combinan no linealidades, perturbaciones meteorológicas de carácter estocástico y múltiples modos de operación, que exigen técnicas de identificación capaces de manejar ruido, excitación persistente limitada y cambios estructurales [10], [11]. En los últimos años, diferentes trabajos han explorado estas técnicas en contextos relacionados. En [10] propusieron un esquema basado en modelos ARX coordinados por redes de Petri para una microrred híbrida AC/DC validada en MATLAB/Simulink. En [11] aplicaron mínimos cuadrados no lineales para la identificación paramétrica no invasiva de convertidores buck, boost y buck–boost y en [12] utilizaron identificación data-driven Hardware-in-the-Loop para extraer la dinámica de inversores formadores de red. Específicamente para realiza un análisis comparativo de diferentes métodos de identificación fuera de línea, entre los que se encuentran los algoritmos de mínimos cuadrados (LS), identificación para estructuras ARX y ARMAX y subespacio (MOESP y N4SID) aplicados a una microrred DC, compuesta por fuentes de energía no convencional (eólica y solar), simulada en MATLAB/Simulink a través de Simscape. Para cada método se describe la estructura matemática subyacente, se detalla el criterio de selección de orden empleado (AIC, BIC, FPE o análisis de valores singulares de Hankel), y se evalúa su desempeño mediante índices normalizados de ajuste (FIT, RMSE). El documento se encuentra estructurado de la siguiente forma: la Sección II describe la metodología del trabajo, la Sección III presenta los resultados experimentales y el análisis comparativo y la Sección IV resume las conclusiones y plantea trabajo futuro.

II. Metodología

A. *Estructura general del trabajo realizado*

La metodología propuesta se estructuró como un flujo secuencial de cinco etapas que inicia con el modelado físico de la microrred y termina con la comparación cuantitativa de las técnicas de identificación evaluadas. Esta estructura garantiza la trazabilidad de los datos y los modelos generados en la investigación, garantizando que los resultados obtenidos sean reproducibles y comparables bajo las mismas condiciones de operación. En la Figura 1 presenta el diagrama de flujo que sintetiza las etapas desarrolladas.



Figura 1. Diagrama de bloques para la metodología propuesta.

En la Figura 1 se aprecia que la primera etapa corresponde al modelado de la microrred DC, la cual está conformada por generadores fotovoltaicos y eólicos interconectados a través de convertidores de potencia. La implementación se realizó en MATLAB/Simulink usando Simscape. Una vez configurado el modelo, se procedió con la segunda etapa, en la cual se ejecutaron las simulaciones para obtener los datos de entrada/salida del sistema, a partir de los cuales se realizaron los procesos de identificación. En la tercera etapa se aplicaron las técnicas de identificación fuera de línea sobre los datos generados, abarcando los métodos de mínimos cuadrados, identificación paramétrica (ARX, ARMAX) e identificación por subespacio (MOESP, N4SID). Para cada técnica se determinó el orden adecuado del modelo mediante criterios de información AIC, BIC y FPE en los métodos paramétricos, y mediante el análisis de los valores singulares de las matrices de Hankel en los métodos de subespacio. La cuarta etapa consiste en la validación de los modelos identificados, para lo cual se reservaron conjuntos de datos independientes que no fueron utilizados durante la estimación, evaluando así la capacidad de generalización de cada modelo. Finalmente, en la quinta etapa se realizó la comparación cuantitativa entre los modelos obtenidos a través del porcentaje de ajuste (FIT%), el error cuadrático medio (RMSE) y el desempeño en validación cruzada, lo cual permitió establecer criterios objetivos sobre la pertinencia de cada técnica según las características dinámicas del sistema identificado.

B. *Descripción de la microrred propuesta*

La microrred utilizada en este trabajo corresponde a un sistema DC compuesto por múltiples nodos interconectados, cada uno asociado a un recurso energético distribuido (DER) basado en fuentes de energía no convencional, los cuales se conectan al bus común de la microrred a través de convertidores de fuente de voltaje (Voltage Source Converter, VSC) que adaptan los niveles de tensión y proporcionan el aislamiento necesario entre la fuente y la red. Cada nodo de la microrred dispone de elementos de almacenamiento capacitivo,

inductancias de línea para el acople entre nodos, y cargas resistivo-inductivas que representan el consumo local. La estructura propuesta permite la operación coordinada de las fuentes renovables, manteniendo la flexibilidad necesaria para escalarse a un mayor número de nodos según los requerimientos específicos del estudio. Adicionalmente, cada no puede suichearse a través de un interruptor que le permite al sistema operar de forma interconectada o aislada de la red.

La configuración seleccionada se diferencia de trabajos previos por la adopción de una topología con 10 nodos interconectados, lo cual permite evaluar el desempeño de las técnicas de identificación bajo condiciones de mayor complejidad dinámica derivadas del acoplamiento entre subsistemas. La Figura 2 muestra la estructura de la microrred generalizada.

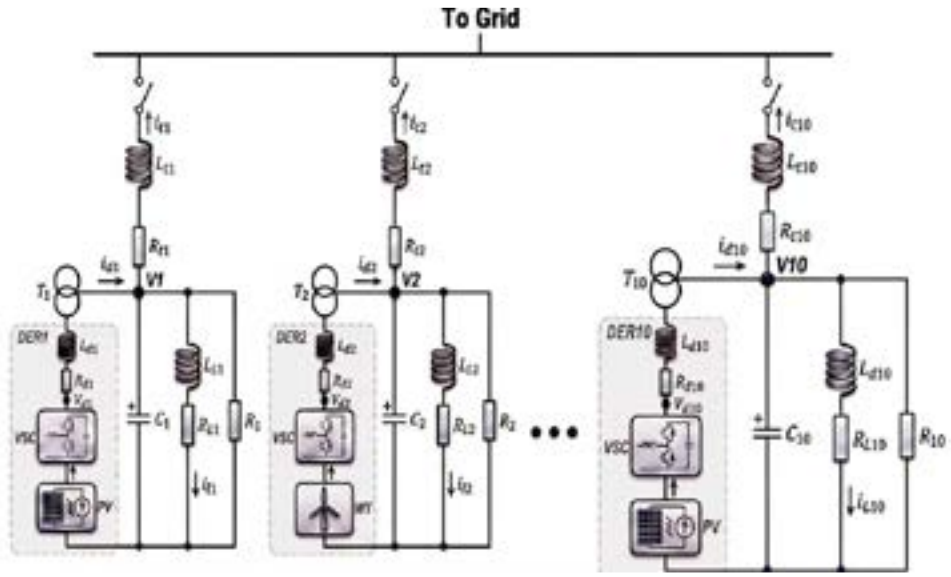


Figura 2. Estructura general de la microrred DC-DC usada.

C. Modelo matemático en espacio de estados

El comportamiento dinámico de la microrred puede describirse mediante un modelo en espacio de estados de tiempo continuo, obtenido a partir de las leyes de Kirchhoff de en cada nodo del sistema. La forma general del modelo se expresa así:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \gamma(t)$$
$$y(t) = Cx(t) \quad (1)$$

En (1), x representa el vector de estados, u el vector de entrada y γ el ruido asociado al sistema. Las matrices A, B y C representan la matriz de realimentación o dinámica interna del sistema, la matriz de entrada y la matriz de salida respectivamente. El vector de estados de la microrred se construye agrupando las variables dinámicas de cada nodo, específicamente las corrientes en los inductores (iL_k, id_k, it_k) y los voltajes en los capacitores (V_k), el valor de k toma un valor entre 1 y n, para este caso el valor máximo de n es 10. Las entradas del sistema corresponden a los voltajes generados por los DERs (Vd_k), mientras que las salidas medidas son los voltajes de salida en cada nodo (V_k).

Los valores numéricos asignados a cada uno de los componentes de la microrred fueron seleccionados para representar condiciones operativas en sistemas de pequeña escala. La Tabla 1 resume los valores de los elementos usados en cada uno de los nodos de la microrred.

Tabla 1. Parámetros eléctricos de la microrred propuesta.

Parámetro	Valor	Unidad
R_d	1.0	Ω
R_L	1.0	Ω
R_t	1.0	Ω
R	1.0	Ω
L_d	0.01	H
L_L	0.01	H
L_t	0.01	H
C	0.000001	F

El modelo matemático para la microrred de la Figura 2 pudo encontrarse a partir del análisis en cada nodo con las Leyes de Kirchhoff para el análisis de circuitos eléctricos, logrando una representación completa del sistema en espacio de estados tal y como se describió en (1). Como ejemplo de lo anterior, se muestra el proceso realizado en el nodo 1 de la microrred para el análisis entre DER_1 y la red principal.

$$V_1 = VL_{t1} + VR_{t1} \quad (2)$$
$$V_1 = Vd_1 - VRd_1 - VLd_1 \quad (3)$$

$$VL_{t1} = V_1 - VR_{t1} \tag{4}$$

Al analizar los circuitos de carga, se obtuvieron las siguientes expresiones:

$$iL_1' = iC_1 + iL_1 + iR_1 \tag{5}$$

$$it_1 = id_1 + iL_1' \tag{6}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones generado entre (2) y (6) y definiendo los estados $x_1 = iL_1,\ x_2 = id_1, x_3 = it_1, x_4 = V_1$, se obtuvieron las siguientes expresiones:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L_{L1}}x_1 - \frac{R_{L1}}{L_{L1}}x_4 \tag{7}$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{Rd_1}{Ld_1}x_2 - \frac{1}{Ld_1}x_4 + \frac{Vd_1}{Ld_1} \tag{8}$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{R_{t1}}{L_{t1}}x_3 + \frac{1}{L_{t1}}x_4 \tag{9}$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{C_1}x_1 - \frac{1}{C_1}x_2 + \frac{1}{C_1}x_3 - \frac{1}{R_1C_1}x_4 \tag{10}$$

Con las ecuaciones de estado obtenidas, fue posible obtener la matriz de realimentación de la siguiente forma:

$$A_{11} = \begin{bmatrix} {}^{1}/_{L_{L1}} & 0 & 0 & -{}^{R_{L1}}/_{L_{L1}} \\ 0 & -{}^{Rd_1}/_{Ld_1} & 0 & -{}^{1}/_{Ld_1} \\ 0 & 0 & -{}^{R_{t1}}/_{L_{t1}} & {}^{1}/_{L_{t1}} \\ -{}^{1}/_{C_1} & -{}^{1}/_{C_1} & {}^{1}/_{C_1} & -{}^{1}/_{R_1C_1} \end{bmatrix} \tag{11}$$

El vector de entrada B y la entrada de control u se definieron de la siguiente manera:

$$B_{11} = \begin{bmatrix} {}^{1}/_{Ld_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ u = \begin{bmatrix} Vd_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

Posteriormente, la ecuación de salida se definió como:

$$y(t) = Cx(t) \tag{13}$$

Donde:

$$C = [0 \quad 0 \quad 0 \quad V_1] \tag{14}$$

Al replicar en los demás nodos de la microrred el análisis efectuado en el nodo 1, es posible establecer el modelo que describe la dinámica de la microrred propuesta. A continuación, se describe el modelo generalizado para la microrred mostrada en la Figura 3.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{19} & A_{110} \\ A_{21} & A_{22} & \ddots & A_{29} & A_{210} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ A_{91} & A_{92} & \ddots & A_{99} & A_{910} \\ A_{101} & A_{102} & \cdots & A_{109} & A_{1010} \end{bmatrix}_{40\times40} \tag{15}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{19} & B_{110} \\ B_{21} & B_{22} & \ddots & B_{29} & B_{210} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ B_{91} & B_{92} & \ddots & B_{99} & B_{910} \\ B_{101} & B_{102} & \cdots & B_{109} & B_{1010} \end{bmatrix}_{40\times10} \tag{16}$$

Luego, las entradas de control para la microrred se definieron como:

$$u = \begin{bmatrix} Vd_1 \\ Vd_2 \\ \vdots \\ Vd_9 \\ Vd_{10} \end{bmatrix} \tag{17}$$

La señal de salida se midió en los voltajes V_i, por lo que la ecuación de medida se puede expresar como:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & C_{99} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & C_{1010} \end{bmatrix}_{10\times40} \tag{18}$$

Donde:

$$C_{11} = C_{22} = \cdots = C_{99} = C_{1010} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$$

D. Procedimiento para la adquisición de datos

Los datos utilizados en los procesos de identificación se obtuvieron mediante la aplicación de señales de excitación de tipo escalón en las entradas correspondientes a cada uno de los DERs de la microrred. Las señales de tipo escalón contienen energía distribuida en un rango amplio de frecuencias, permitiendo la excitación simultánea de la red. Segundo, Adicionalmente, la aplicación de este tipo de señales en cada DER de manera independiente facilita el análisis y la relación entrada/salidas en cada nodo del sistema. Las señales de entrada se aplicaron en instantes diferentes del intervalo de simulación para evitar la superposición de transitorios entre las diferentes entradas. El trabajo realizado se hizo sore el modelo discreto de la microrred usando un tiempo de muestreo $\boldsymbol{Ts = 0.0005}$ segundos, determinado considerando las constantes de tiempo más rápidas del sistema y cumpliendo el criterio de Nyquist con margen suficiente. La duración total del experimento fue de 15 segundos, generando aproximadamente 2764 muestras por cada señal de entrada/salida.

III. RESULTADOS

A. Simulación de la microrred

El proceso de implementación de la microrred propuesta inició con la simulación del sistema en Simscape de MATLAB. Esta herramienta es un Toolbox integrado a Simulink donde se puede realizar simulación y modelamiento de sistemas eléctricos. La implementación de la microrred propuesta en la Figura 2, es presentada en la Figura 3.



Figura 3. Estructura de la microrred simulada en Simscape con diez nodos interconectados.

La respuesta del sistema mostrado en la Figura 3, es presentada en la Figura 4. En la respuesta se evidencian las tensiones de salida en los nodos V_1 a V_{10} para cada una de las fuentes de energía no convencional implementadas.

B. Técnicas de identificación

Las técnicas de identificación usadas en este trabajo se centran en mecanismos diferentes para la estimación de parámetros y elementos asociados a la dinámica del sistema empleado. La estimación por mínimos cuadrados emplea regresores lineales en los parámetros, constituyendo una base algorítmica común para los demás métodos. En algunos casos, los modelos paramétricos con estructura predefinida se agrupan con la dinámica del sistema y, en algunos casos; con el ruido para ser representados a través de polinomios con el operador de retardo, ajustados por minimización del error de predicción [7], [8].

La identificación por subespacio, estima directamente el modelo del sistema en espacio de estados a partir de proyecciones geométricas de las matrices de Hankel construidas con los datos de entrada/salida. Los algoritmos MOESP y N4SID son dos representaciones canónicas diferenciadas por el tipo de proyección empleada y su tratamiento del ruido [9], [13],[14], [15].

C. Identificación por mínimos cuadrados (LS)

El estimador por mínimos cuadrados constituye es una de las herramientas de optimización más simples dentro de la identificación de sistemas y se usa como base de otros métodos. Su estructura está organizada como un conjunto de N observaciones organizadas en el vector de salida $Y \in \mathbb{R}^{N}$ y una matriz de regresores $\phi \in \mathbb{R}^{Nxk}$ que contiene las muestras de entradas/salidas. El propósito de este algoritmo consiste en encontrar el vector de parámetros $\theta \in \mathbb{R}^{k}$ que minimice el error de predicción:

$$\hat{\theta} = argmin_{\theta}\|Y - \phi \cdot \theta\|^2 \tag{19}$$

La solución del sistema se da por la expresión:

$$\hat{\theta} = (\phi^{T} \cdot \phi)^{-1} \cdot \phi^{T} \cdot Y \tag{20}$$

La solución de este método se obtiene mediante la descomposición en valores singulares en ϕ buscando garantizar estabilidad de regresores mal condicionados [7]. Como el proceso de identificación se realiza a partir de los datos disponibles del sistema, se obtuvo una representación discreta del mismo a partir de las mediciones con un tiempo de muestreo $Ts = 0.0005$ segundos. Un sistema en espacio de estados discreto se puede representar de la siguiente forma:

$$x[k+1] = Ax(k) + Bu(k) + \gamma(k)$$
$$y[k] = Cx(k) \tag{21}$$

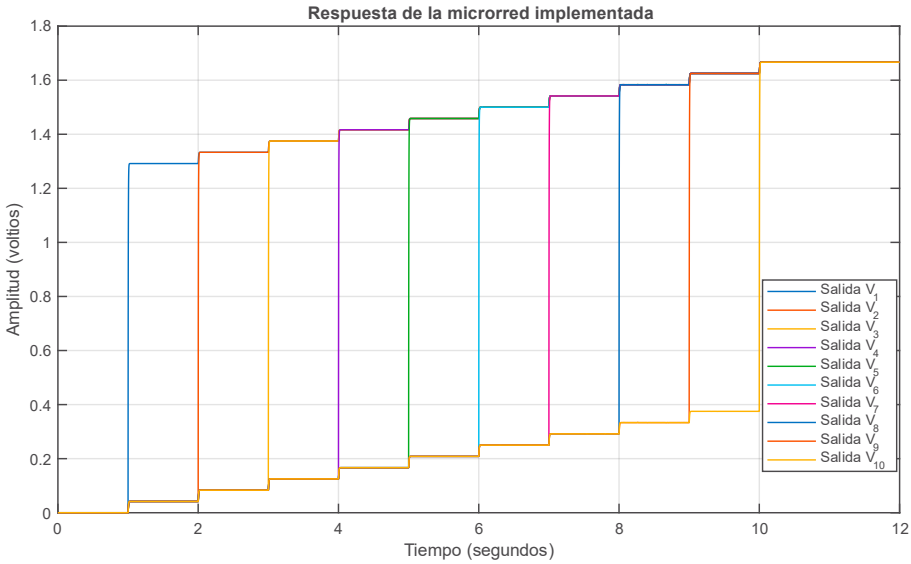


Figura 4. Señales de salida en las tensiones V_1 a V_{10} de la microrred implementada.

Luego, (21) se puede representar en forma polinomial como se muestra a continuación:

$$y[k] = -A_1 y[k-1] - A_2 y[k-2] \cdots - A_n y[k-n] + B_0 u[k-1] + B_1 u[k-2] \cdots - B_m u[k-m] \quad (22)$$

Finalmente, la estructura para la identificación fuera de línea por mínimos cuadrados es:

$$y[k] = [y[k-1] \quad \cdots \quad y[k-n] \quad u[k-1] \quad \cdots \quad u[k-m]] \begin{bmatrix} -A_1 \\ -A_2 \\ \vdots \\ -A_n \\ B_0 \\ B_1 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} \quad (23)$$

O escrito de otra forma:

$$y[k] = \phi^T \cdot \theta \quad (24)$$

En la Figura 5 se observa la comparación entre las señales de salida identificadas y las señales de salida medidas. Debido a que los errores en las mediciones fueron cercanos a cero, la identificación se realizó tomando la microrred como un sistema determinista, sin embargo; con el método de identificación aplicado, el ruido que se haya podido capturar en las mediciones se asocia a los coeficientes estimados, generando pequeñas variaciones en las señales de salido conforme a lo mostrado en la Figura 6.

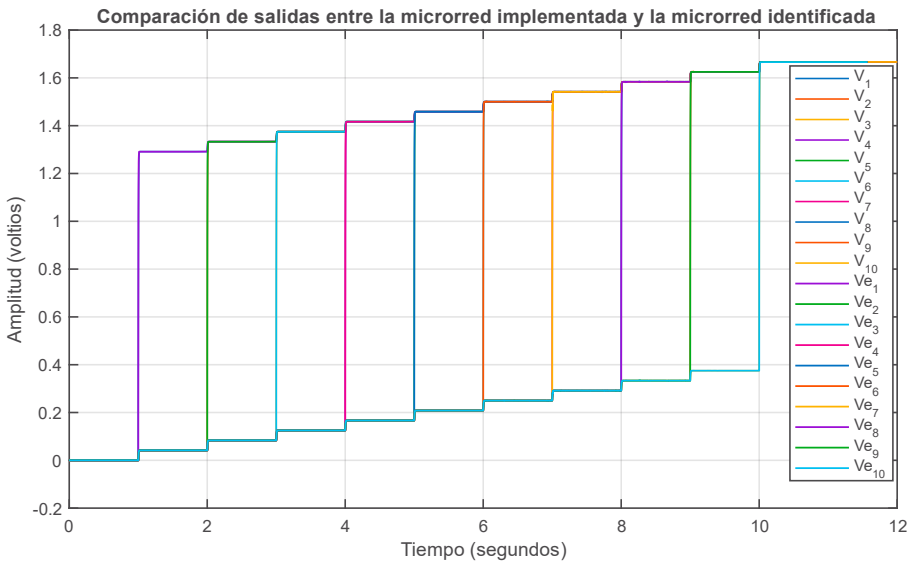


Figura 5. Respuesta del sistema identificado (Ve_k) por LS comparado con las salidas medidas (V_k).



Figura 6. Variaciones en las señales de salida estimadas debido al ruido capturado en las mediciones.

D. Identificación usando estructura ARX

La estructura ARX representa la respuesta del sistema como una combinación lineal de entradas/salidas pasadas y un término adicional que representa ruido aditivo. El modelo matemático incluye un operador de retardo q^{-1} se expresa como:

$$A(q) \cdot y(k) = B(q) \cdot u(k) + e(k) \tag{25}$$

donde los polinomios A(q) y B(q) están definidos por:

$$A(q) = 1 + a^1 \cdot q^{-1} + a^2 \cdot q^{-2} + \cdots + a_{n_a} \cdot q^{-\mathrm{na}} \tag{26}$$

$$B(q) = b^1 \cdot q^{-1} + b^2 \cdot q^{-2} + \cdots + b_{n_\beta} \cdot q^{-\mathrm{nb}} \tag{27}$$

En (26) y (27), na y nb corresponden al orden de los polinomios $A(q)$ y $B(q)$ y al número de coeficientes presentes en la entrada exógena, respectivamente. El término $e(k)$ representa el ruido del sistema. La selección del orden del modelo (n_a, n_b, n_k), donde n_k corresponde al retardo entre la entrada y la salida del sistema. Para el presente trabajo la identificación se realizó a través de la función $arx()$ del System Identification Toolbox de MATLAB. Al implementar la estructura ARX en conjunto con el modelo de la microrred descrito en (22) se obtienen las señales de salida mostradas en la Figura 7.

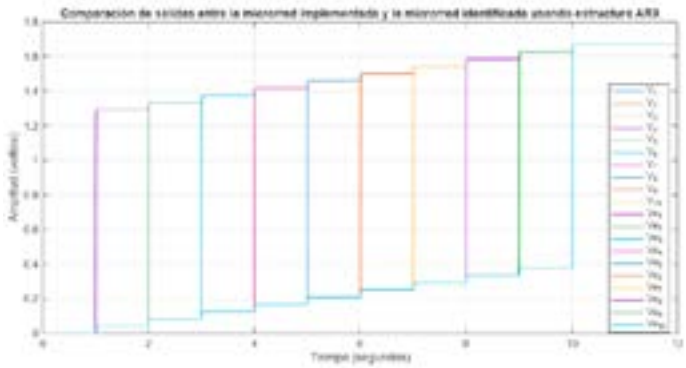


Figura 7. Respuesta del sistema identificado (Ve_k) con ARX comparado con las salidas medidas (V_k).

Adicionalmente, la identificación de la microrred con la estructura ARX no presentó variaciones en las señales de salida como ocurrió en la identificación por LS. Esto debido a que la estructura ARX permite modelar el ruido presente en el sistema y usa criterios de regularización que restringen la búsqueda a modelos con polos dentro del círculo unitario. En la Figura 8 se presenta información detallada de algunas de las salidas del sistema identificado donde es posible apreciar que no hay variaciones.

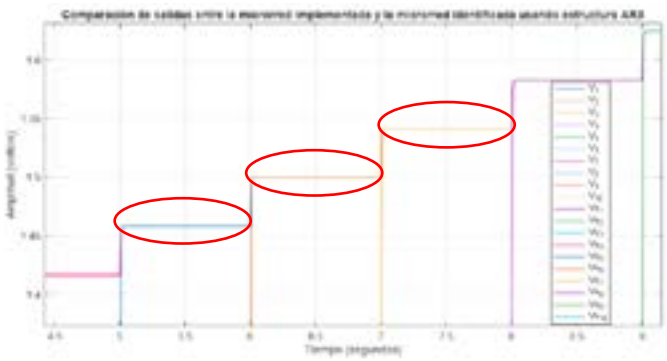


Figura 8. Ausencia de variaciones en las señales de salida estimadas con la estructura ARX.

E. Identificación por subespacio

A diferencia de técnicas de identificación como mínimos cuadrados o algoritmos de proyección donde se obtienen los parámetros de los diferentes elementos asociados a la dinámica del sistema, la identificación por subespacio estima directamente un modelo en espacio de estados discreto del sistema. En este proceso de identificación se usan algoritmos como el MOESP (Multivariable Output-Error State-Space) propuesto en [13] y el N4SID (Numerical algorithm for Subspace State-Space System Identification) propuesto en [14].

La identificación por subespacio emplea matrices de gran tamaño a las que se les realiza un proceso de descomposición LQ con el fin de obtener matrices triangulares inferiores con bloques de ceros en la esquina superior derecha. La descomposición LQ es presentada en (28).

$$\begin{bmatrix} U_{0|k-1} \\ Y_{0|k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1^{\mathrm{T}} \\ Q_2^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \tag{28}$$

Donde $L_{11} \in \mathbb{R}^{km \times km}$, $L_{21} \in \mathbb{R}^{kp \times km}$, $L_{22} \in \mathbb{R}^{kp \times kp}$ y L_{11}, L_{21}, L_{22} como la matriz triangular inferior y $Q_1 \in \mathbb{R}^{N \times km}$, $Q_2 \in \mathbb{R}^{N \times kp}$ son ortogonales [16], [17], [18]. La descomposición LQ puede tomarse como la transpuesta de la descomposición QR:

$$\left[U_{0|k-1}^{\mathrm{T}}\ Y_{0|k-1}^{\mathrm{T}}\right] \in \mathbb{R}^{N \times k(m+p)} \tag{29}$$

La identificación usando el método MOESP se puede definir de acuerdo con (28) como:

$$U_{0|k-1} = L_{11} Q_1^{\mathrm{T}} \tag{30}$$

$$Y_{0|k-1} = L_{21} Q_1^{\mathrm{T}} + L_{22} Q_2^{\mathrm{T}} \tag{31}$$

Donde L_{11} es una matriz no singular. La expresión (31) puede reescribirse como:

$$Y_{0|k-1} = L_{21}L_{11}^{-1}U_{0|k-1} + L_{22}Q_2^{\mathrm{T}} \quad (32)$$

Luego la proyección ortogonal está definida por:

$$\hat{E}\{Y_{0|k-1} \mid U_{0|k-1}\} = L_{21}Q_1^{\mathrm{T}} = L_{21}L_{11}^{-1}U_{0|k-1} \quad (33)$$

La descomposición en valores singulares de L_{22} para MOESP está dada por:

$$L_{22} = [U_1 \quad U_2]\begin{bmatrix}\Sigma_1 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_1^{\mathrm{T}}\\ V_2^{\mathrm{T}}\end{bmatrix} = U_1\Sigma_1V_1^{\mathrm{T}} \quad (34)$$

Donde $U_1 \in \mathbb{R}^{kp\times n}$ and $U_2 \in \mathbb{R}^{kp\times(kp-n)}$. Σ_1 y V_1^{T} son matrices ortogonales. De la expresión anterior se obtiene:

$$\mathcal{O}_k X_0 Q_2 = U_1\Sigma_1V_1^{\mathrm{T}} \quad (35)$$

La matriz de salida C está definida por:

$$C = \mathcal{O}_k(1{:}p, 1{:}n) \quad (36)$$

La matriz A es obtenida a partir de:

$$\mathcal{O}_k(1{:}p(k-1), 1{:}n)A = \mathcal{O}_k(p+1{:}kp, 1{:}n) \quad (37)$$

Finalmente, las matrices B y D se obtienen a partir de:

$$U_2^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix} D & 0 & \cdots & 0\\ CB & D & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ CA^{k-2}B & CA^{k-3}B & \cdots & D\end{bmatrix} = U_2^{\mathrm{T}}L_{21}L_{11}^{-1} \quad (38)$$

Esta es la ecuación lineal de B y D, que pueden encontrarse a partir de modelos como los de mínimos cuadrados. El proceso de identificación realizado usando subespacio tuvo una respuesta como se muestra en la Figura 9.

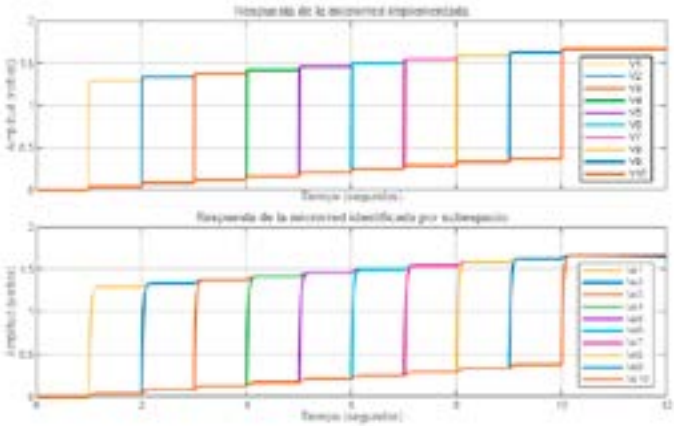


Figura 9. Respuesta de la microrred implementada (arriba) y la identificación por subespacio (abajo).

Finalmente, la Tabla 2 presenta una comparación cuantitativa de métricas de desempeño de cada una de las técnicas de identificación aplicadas a la microrred.

Tabla 2. Métricas comparativas para las técnicas de identificación empleadas.

Método	Orden	AIC	BIC	FPE	FIT%
LS	10	-4.43×10^{5}	-4.40×10^{5}	9.45×10^{-9}	85%
ARX	10	-5.98×10^{6}	-5.97×10^{6}	2.83×10^{-82}	91%
MOESP	10	-4.39×10^{6}	-4.38×10^{6}	1.40×10^{-88}	89%

Los resultados mostrados en la Tabla 2 sugieren que el método ARX se posiciona como la alternativa más adecuada para la identificación de la microrred propuesta, al obtener simultáneamente el mayor porcentaje de ajuste y el menor valor de los criterios de información AIC, BIC y FPE.

IV. Conclusiones

El análisis comparativo realizado entre las diferentes técnicas de identificación aplicadas a la microrred DC interconectada, evidencia que los tres métodos logran reproducir adecuadamente la dinámica del sistema con porcentajes de ajuste superiores al 85%, lo cual valida la pertinencia de los modelos basados en datos. No obstante, el método ARX alcanzó el mejor desempeño global (FIT del 91%, AIC de -5.98×10^{6}), que los métodos de identificación por subespacio (FIT del 89%, AIC de -4.39×10^{6}) y LS (FIT del 85%, AIC de -4.43×10^{5}), comportamiento atribuible al proceso que ARX realiza sobre el ruido presente en el sistema a través del filtrado 1/A(q), reduciendo el sesgo en la estimación cuando las perturbaciones presentan autocorrelación.

En segundo lugar, los resultados muestran que el porcentaje de ajuste en la identificación en microrredes con dinámica rígida depende críticamente de dos condiciones experimentales independientes del algoritmo seleccionado: la garantía de muestreo uniforme en los datos de entrada y salida, y que las señales de entrada activen apropiadamente la dinámica del sistema.

Por último, La identificación de sistemas constituye una herramienta esencial para el modelado de sistemas dinámicos a partir de datos experimentales o de simulación, particularmente cuando los enfoques de modelado físico convencional resultan complejos debido a la topología, al desconocimiento de los parámetros o a la presencia de dinámicas no modeladas. Su aplicación en microrredes con fuentes de energía renovable permite capturar de manera sistemática el comportamiento entrada/salida del sistema, condensando en estructuras compactas la interacción entre convertidores de potencia, elementos pasivos y perturbaciones estocásticas asociadas a las fuentes de energía no convencionales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Quindío y a la Universidad Tecnológica de Pereira por el apoyo en el desarrollo de la investigación realizada. Los autores también agradecen a

los programas de Tecnología en Instrumentación Electrónica, Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica por el apoyo logístico y de laboratorios.

Referencias

[1] F. S. Al-Ismail, «DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 36154-36172, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3062840.

[2] T. Castillo-Calzadilla, M. A. Cuesta, C. Olivares-Rodriguez, A. M. Macarulla, J. Legarda, y C. E. Borges, «Is it feasible a massive deployment of low voltage direct current microgrids renewable-based? A technical and social sight», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, p. 112198, jun. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112198.

[3] T. Thomas, M. K. Mishra, C. Kumar, y M. Liserre, «Control of a PV-Wind Based DC Microgrid With Hybrid Energy Storage System Using Lyapunov Approach and Sliding Mode Control», *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 60, n.º 2, pp. 3746-3758, mar. 2024, doi: 10.1109/TIA.2023.3349359.

[4] M. Naderi, Y. Khayat, Q. Shafiee, F. Blaabjerg, y H. Bevrani, «Dynamic modeling, stability analysis and control of interconnected microgrids: A review», *Applied Energy*, vol. 334, p. 120647, mar. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120647.

[5] D. Espín-Sarzosa *et al.*, «Microgrid Modeling for Stability Analysis», *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 15, n.º 3, pp. 2459-2479, may 2024, doi: 10.1109/TSG.2023.3326063.

[6] S. S. Khan y H. Wen, «A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Tolerant Control in DC-DC Converters for DC Microgrids», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 80100-80127, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083721.

[7] L. Ljung, *System identification: theory for the user*, 2nd ed. en Prentice Hall information and system sciences series. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1999.

[8] T. Söderström y P. Stoica, *System identification*. en Prentice Hall International series in systems and control engineering. New York: Prentice Hall, 1989.

[9] T. Katayama, *Subspace Methods for System Identification*. en Communications and Control Engineering. London: Springer London, 2005. doi: 10.1007/1-84628-158-X.

[10] L. Ortiz, L. B. Gutiérrez, J. W. González, y A. Águila, «A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets», *Heliyon*, vol. 6, n.º 3, p. e03559, mar. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03559.

[11] G. Rojas-Duenas, J.-R. Riba, y M. Moreno-Eguilaz, «Nonlinear Least Squares Optimization for Parametric Identification of DC–DC Converters», *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, n.º 1, pp. 654-661, ene. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3003075.

[12] N. Guruwacharya, S. Chakraborty, G. Saraswat, R. Bryce, T. M. Hansen, y R. Tonkoski, «Data-Driven Modeling of Grid-Forming Inverter Dynamics Using Power Hardware-in-the-Loop Experimentation», *IEEE Access*, vol. 12, pp. 52267-52281, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3383323.

[13] M. Verhaegen y P. Dewilde, «Subspace model identification Part 1. The output-error state-space model identification class of algorithms», *International Journal of Control*, vol. 56, n.º 5, pp. 1187-1210, nov. 1992, doi: 10.1080/00207179208934363.

[14] P. Van Overschee y B. De Moor, «N4SID: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems», *Automatica*, vol. 30, n.º 1, pp. 75-93, ene. 1994, doi: 10.1016/0005-1098(94)90230-5.

[15] P. Van Overschee y B. De Moor, *Subspace Identification for Linear Systems*. Boston, MA: Springer US, 1996. doi: 10.1007/978-1-4613-0465-4.

[16] P. Van Overschee y B. De Moor, *Subspace Identification for Linear Systems*. Boston, MA: Springer US, 1996. doi: 10.1007/978-1-4613-0465-4.

[17] T. Katayama, *Subspace Methods for System Identification*. en Communications and Control Engineering. London: Springer, 2005. doi: 10.1007/1-84628-158-X.

[18] O. Babayomi, Y. Li, y Z. Zhang, «Distributed consensus-based reactive power sharing in microgrids: A predictive virtual capacitance control technique», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 141, p. 108139, oct. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108139.

Optimality, Equity, and Regulatory Feasibility in Peer-to-Peer Energy Markets: A Game-Theoretic Framework for Colombian Energy Communities

Brayan Stiven López Méndez
Department of Electronics
Universidad de Nariño
Pasto, Colombia
bsmendez24B@udenar.edu.co

Andrés Darío Pantoja Bucheli
Department of Electronics
Universidad de Nariño
Pasto, Colombia
ad_pantoja@udenar.edu.co

Germán Darío Obando Bravo
Department of Electronics
Universidad de Nariño
Pasto, Colombia
gobando@udenar.edu.co

***Abstract*—Colombia regulates individual and collective self-generation through CREG 174/2021 and CREG 101 072/2025, which rely on the monthly administrative settlement of surplus. Whether dynamic hourly market mechanisms such as peer-to-peer (P2P) trading offer a measurable advantage over these schemes is an open empirical question for the Colombian context. This paper compares a Stackelberg–Replicator-Dynamics P2P market against the two Colombian regulatory schemes. At the proposed case studies, P2P attains the highest aggregate net benefit (5.5 % and 3.3 % above the current Colombian regulatory benchmarks). A PV-factor sweep at increments of 0.1 in the PV scaling factor is performed to analyze the influence of the prosumer's demand coverage on the overall benefit in each market strategy. The results show that P2P market is a profitable strategy over both surplus-distribution methods admissible by CREG 101 072/2025. The evidence suggests that, as Colombia scales solar generation, the regulatory framework may benefit from dynamic clearing mechanisms.**

***Keywords*—Peer-to-peer energy markets, replicator dynamics, energy community, CREG regulation 101 072/2025.**

I. Introduction

The Colombian electricity sector is undergoing a structural transition toward decentralized operation driven by distributed energy resources [1]. Within this transition, energy communities — in which prosumers and consumers coordinate local generation and consumption — have emerged as a central organizational form [1], [2]. Peer-to-peer (P2P) trading is one of the market-based mechanisms proposed to apply in such communities, enabling direct exchange of surplus energy between members [2], [9].

The Colombian regulatory framework has evolved in two stages. Resolution CREG 174/2021 [3] regulates small-scale self-generators (AGPE) under a Type 1 / Type 2 settlement that credits intra-month physical exchanges and settles the residual surplus at the spot price. Resolution CREG 101 072/2025 [4] subsequently introduced collective self-generation (AGRC) for energy communities, defining a Surplus Distribution Percentage (PDE) that allocates community injections among members through weights agreed by the community (art. 19) or, by default, proportional to the number of commercial frontiers (art. 9). Both regimes share the AGPE settlement engine, and both rely on administrative rules that are static across the operational horizon.

Whether dynamic clearing of peer transactions — through Stackelberg games [5], [9], [10] coupled with population dynamics [8], [11], [12] — can improve upon these administrative schemes is an active question in the literature [2], [6], [7]. The reported advantage of P2P emerges where heterogeneity, local supply–demand balance, and reduced transaction costs coincide [6], [7]. However, empirical evidence specific to the Colombian regulatory context is scarce.

This paper contributes empirical evidence based on the algorithm proposed in [5], which combines a Stackelberg game and replicator dynamics. The algorithm is applied to metered demand from five institutions in Pasto, Nariño, recorded during August 2025, with photovoltaic generation scaled by $\varphi = 1.5$ (144 % coverage), a level consistent with the distributed-PV growth trajectory documented in the 2025–2039 plan of the Colombian Mining and Energy Planning Unit (UPME) [15], which schedules an annual incorporation of 301–571 MW of distributed solar generation between 2025 and 2030. The testing scenario was selected to capture a combination of high PV irradiance and peak prosumer demand. The main result of our study is twofold: first, at 144% community coverage, P2P attains the highest aggregate net benefit (5.5% and 3.3% above the current Colombian regulatory benchmarks), with four of the five institutions preferring the P2P market; second, a PV-factor sweep locates the crossover near $\varphi \approx 1.03$, where the P2P market surpasses CREG 174/2021 as the most suitable mechanism (99% coverage).

The analysis is conducted at hourly resolution to capture the intra-day heterogeneity that makes P2P trading economically distinct from monthly net-metering settlement. The sensitivity analysis is conducted over the PV-coverage parameter φ rather than wholesale buying prices due to the inherent stochasticity

The authors acknowledge the support of Universidad de Nariño and its programme Maestría en Ingeniería Electrónica (MaIE). This work was also supported by the project BPIN 2021000100499, the Multi-Agent Non-Conventional Energy Transaction Model (MTE), funded by CTeI - SGR and Minciencias, Colombia.

of the prices. We frame the regulatory feasibility question around the admissibility of the dynamic clearing mechanism under the "agreed-among-members" clause of CREG 101 072/2025. As a result, our structural findings relate to the clearing methodology rather than agent-level participation thresholds.

The remainder of the paper is organized as follows: Section II describes the market strategies and Section III presents the data. Section IV reports the empirical results, Section V discusses regulatory implications and limitations, and Section VI concludes.

II. Methods

A. The MTE Energy Community

The MTE (Energy Transaction Model) project at Universidad de Nariño includes five institutions in Pasto, Colombia: Universidad de Nariño (Udenar), Universidad Mariana (Mariana), Universidad Cooperativa de Colombia (UCC), Hospital Universitario Departamental de Nariño (HUDN), and Universidad Cesmag (Cesmag). Each site operates a rooftop PV system. In this work, we use the average hourly generation aggregated at August 2025, with a midday community generation peak of approximately 64 kW. Clearly, every institution (or agent in the market) has different generation and demand profiles.

B. Stackelberg–Replicator Dynamics P2P market

The P2P market obeys the leader–follower formulation of Chacon *et al.* [5]. Sellers (prosumers with surplus) lead the game by announcing the power quantities they offer to buyers, while buyers (prosumers or consumers with deficit) respond by proposing a price to each seller through a Replicator Dynamics (RD) strategy [8], [11], [12]. The seller-side problem is a quadratic profit maximization. The profit of the jth seller is, in summary, utility minus cost given by

$$U_j = \sum_i \pi_i P_{ij} - H_j(P_j),$$

where $\pi_i \in [\pi_{gb}, \pi_{gs}]$ is the price offered by the ith buyer, bounded by the grid's buying and selling prices π_{gb} and π_{gs}, respectively; P_{ij} is the power delivered by seller j to buyer i; and $P_j = \sum_i P_{ij}$ is the total power delivered by the seller. The cost of generation is a typical quadratic function

$$H_j(P_j) = a_j P_j^2 + b_j P_j + c_j, \tag{1}$$

where a_j, b_j, and c_j are positive parameters depending on each generator.

The buyer-side problem complements the seller's. Each buyer i updates the price π_i offered to seller j through replicator dynamics, increasing the probability mass of prices that yielded above-average utility in previous iterations. The buyer's utility weighs the energy savings $(\pi_{gs} - \pi_i)P_{ij}$ against the risk of the seller refusing the offer (when π_i is too low) or paying more than necessary (when π_i is too high). The admissible range $\pi_i \in [\pi_{gb}, \pi_{gs}]$ ensures bilateral rationality: no buyer pays above the retail tariff, and no seller accepts below the spot floor. The implementation proposed in [5] uses a sequential Stackelberg alternation with RD to obtain optimal prices and power sharing among sellers and buyers.

The seller cost function (1) is calibrated for each photovoltaic generator in the MTE community of the case-study. We set $a_j = 0$ for all five sellers because grid-tied PV generators incur neither fuel nor thermal ramp-up costs [17], [18]. The linear coefficient b_j is anchored to the IRENA 2024 global solar Levelized Cost of Energy (LCOE) (USD 0.043/kWh, equivalent to approximately 174 COP/kWh at the August 2025 monthly-average exchange rate of 4,047 COP/USD [19]) and adjusted upward to a 220–250 COP/kWh band that reflects the higher financing and balance-of-system costs of small distributed PV in Colombia, consistent with the cost-of-capital structure documented in the UPME 2025–2039 plan [15]. We adopt $b_j = 241$ COP/kWh for the four sites (Udenar, Mariana, UCC, HUDN) and $b_j = 225$ COP/kWh for Cesmag, whose inverter is from a different vendor with a slightly lower documented operating cost. The resulting cross-site heterogeneity is 6.7 %. Finally, $c_j = 0$ for all sellers, in line with the canonical convention for renewables in [17], [18] and with [5].

C. Regulatory scenarios

The three market scenarios differ in the temporal resolution of surplus settlement: CREG 174/2021 and CREG 101 072/2025 aggregate surplus monthly, whereas P2P clears hourly.

C1 (CREG 174/2021, individual AGPE). Under this framework, surplus energy is settled monthly. Each prosumer n splits their surplus into Type 1 (intra-month permutations) and Type 2 (the monthly residual). The aggregate economic benefit is calculated as

$$\mathrm{NB}_n^{C1} = E_n^{auto}\pi_{gs,n} + E_n^{T1}(\pi_{gs,n} - \pi_n^C) + E_n^{T2}\bar{\pi}_{bolsa} \tag{2}$$

where E_n^{auto}, E_n^{T1}, and E_n^{T2} are the volumes of self-consumed, Type 1, and Type 2 energy, respectively. The parameter $\bar{\pi}_{bolsa}$ is the monthly average spot price used to value Type 2 energy, while $\pi_{gs,n}$ is the standard retail tariff. The price π_n^C represents the commercialization margin ($C_{vm,i,j}$) of the regulated unit cost (CU) defined in Resolución CREG 119/2007 art. 4 [13]. Under Resolución CREG 174/2021 art. 25 [3], the local operator continues to charge this commercialization margin on Type 1 permutations. Because commercialization activities like billing and balance reconciliation are not suspended by physical energy permutations, only the generation, transmission, distribution, and loss components of the CU are netted. Therefore, the Type 1 settlement credits each permuted kWh at the retail tariff minus the commercialization margin ($\pi_{gs,n} - \pi_n^C$), rather than the full retail rate. For the case-study horizon, π_n^C is set to 174.45 COP/kWh, based on the official Cedenar monthly tariff bulletin for August 2025 (tension level NT2, commercial regulated segment). Combined with the homogenized commercial retail tariff $\pi_{gs} \approx 980$ COP/kWh documented in Sec. III.C, the Type 1 valuation is $\pi_{gs} - \pi^C \approx 806$ COP/kWh. This is equivalent to compensating the prosumer at approximately 82% of the retail rate.

C2 (CREG 101 072/2025, collective AGRC): Surplus is also settled monthly, but each community member is liquidated under the AGPE regime. The regulation allocates the aggregated community injection through a Surplus Distribution Percentage (PDE), declared by the community representative under the "agreed-among-members" clause of art. 19, with a default fallback proportional to the number of commercial frontiers (art. 9 num. 5 lit. b). In this work we adopt a capacity-proportional weighting as a representative case among the admissible agreed-among-members options, such that $\text{PDE}_n = \text{cap}_n / \sum_m \text{cap}_m$, where cap_n denotes the installed PV capacity (kWp) of member n. Per-agent settlement follows the C1 structure, but Type 1 credits are inherited through the PDE rather than computed individually.

P2P (Stackelberg–Replicator Dynamics): Surplus is cleared hourly. Optimal prices π_k^* are obtained at each hour k through strategic seller–buyer interaction. These dynamics model behaviors that monthly aggregation cannot resolve.

The decomposition of profits in next section makes visible why the three scenarios produce different results despite sharing the same physical autoconsumption baseline (see Table I).

D. Net-benefit decomposition

The net benefit of each mechanism decomposes into two terms: a self-consumption term (i.e., the value of energy displaced behind the meter) and a surplus-revenue term (the value of energy injected into the grid or traded with peers). The self-consumption term is a physical offset, identical across the three regulatory mechanisms, while the surplus-revenue term is where the mechanisms differ.

The decomposition is consistent with the value definitions of the Colombian retail tariff [13] and extends to the P2P case as

$$\begin{aligned} \text{NB}_n^{P2P} = & \underbrace{\sum_k \min(G_{n,k}, D_{n,k})\, \pi_{gs,n,k}}_{\text{self-consumption}} \\ & + \underbrace{\sum_k \pi_k^*\, P_{n,k}^{sold} + \sum_k r_{n,k}\, \pi_{bolsa,k}}_{\text{surplus revenue}}, \end{aligned} \tag{3}$$

where, for prosumer n at hour k, $G_{n,k}$ and $D_{n,k}$ are the generation and demand, respectively, π_k^* is the cleared P2P price, $P_{n,k}^{sold}$ is the energy sold to peers, and $r_{n,k} = \max(G_{n,k} - D_{n,k} - P_{n,k}^{sold}, 0)$ is the residual surplus exported to the spot market at the hourly spot price $\pi_{bolsa,k}$. Conversely, the financial benefit for the buyer side follows a complementary logic: the P2P savings of an agent in deficit are computed as the energy purchased from peers valued at the difference between π_{gs} and π_k^*, summed over the horizon.

The formulation generalizes across all mechanisms in the limit: under zero peer activity, the surplus-revenue term reduces to the regulatory settlements (C1, C2). The self-consumption term has the same numerical value across all three scenarios (3.60 M COP at the empirical baseline ($\varphi = 1.0$) and 4.12 M COP at the 144 % coverage ($\varphi = 1.5$)).

III. Data

A. Generation and demand profiles

The horizon analyzed is August 2025 (744 hours, local time, America/Bogotá). This month was selected because it combines high PV irradiance with full demand, providing a load profile representative of normal operation rather than seasonal or vacation extremes. The demand-to-generation ratio in each institution for the baseline is into the range $D/G \in [0.4, 1.5]$. With these profiles, three conditions are met: (i) each institution alternates between net seller and net buyer across the horizon rather than being systematically one-sided; (ii) the community has sellers and buyers active simultaneously during solar hours, so the Stackelberg game is non-degenerate; and (iii) per-agent participation remains within the bounds set by CREG 101 072/2025 [4]. For the case study described in the next section, the generation series is scaled by $\varphi = 1.5$, raising community coverage to 144 %. Such coverage is consistent with the distributed-PV growth trajectory documented in the UPME 2025–2039 plan [15]. The demand series is unchanged.

Representative profiles for two contrasting institutions are shown in Fig. 1 for the first complete Mon–Sun calendar week of the horizon (August 4–10, 2025). Udenar shows strong solar generation (morning and afternoon peaks, with near zero overnight) paired with a highly variable academic load (lectures, laboratories, cafeteria). HUDN shows also strong solar generation, while its demand is nearly constant, typical of a 24/7 hospital operation (emergency services, ICU, climate control). Day-to-day PV variability across the week (e.g., the lower peak at Saturday August 9, a cloudier day) is preserved in the figure. Hence, the contrast between the two profiles arises from the demand side rather than from synthetic averaging. The combination of one institution with steep demand variability and one with a flat baseline drives the peer-trading arbitrage that distinguishes P2P from administrative settlement.

B. Tariff homogenization

The Colombian retail tariff distinguishes commercial and official (public-institution) categories. We homogenize all institutions to the commercial profile, with an average of 980 COP/kWh across the August 2025 horizon and monthly variation given by the official prices published by the local distribution operator [3], [13]. Homogenization produces a uniform admissibility window $[\pi_{gb}, \pi_{gs}]$ for the RD strategy, eliminating multi-equilibria that would otherwise arise from tariff heterogeneity. Heterogeneous-tariff analysis is left for future work.

C. Spot price source

Hourly spot prices (π_{bolsa}) are obtained from the Colombian wholesale-market operator through the *pydataxm* API client and reconciled against the official monthly PB_PROM bulletin [14]. The August 2025 mean is 234.5 COP/kWh.

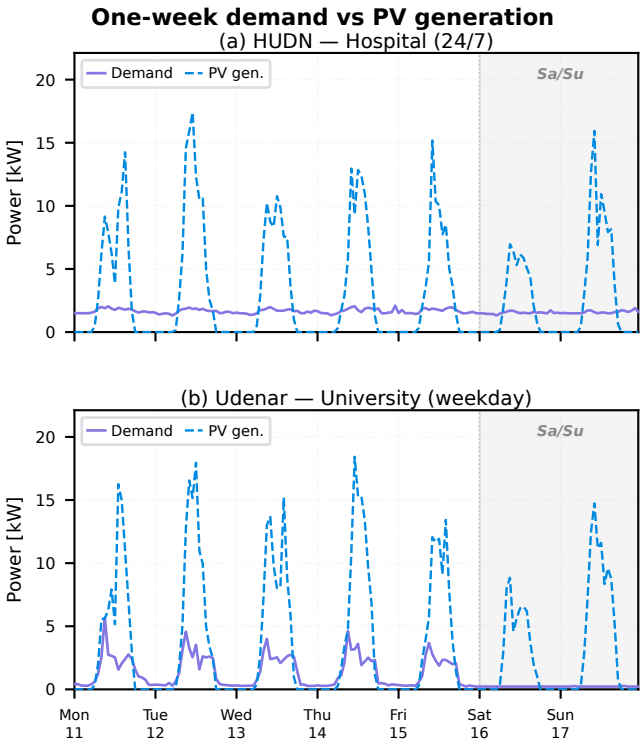


Fig. 1. One-week demand and PV-generation profiles for the case-study week (Mon, Aug 4 – Sun, Aug 10, 2025), drawn from the same 744 hours and $\varphi = 1.5$ scaling. (Top) Hospital HUDN: nearly constant industrial load contrasted with diurnal solar generation. (Bottom) Udenar: variable academic load with weekend dips, paired with the same solar profile. The day-to-day PV variability (cloudier Saturday, clearer weekdays) is the actual signal, not a synthetic average.

TABLE I
AGGREGATE NET BENEFIT, AUGUST 2025, $\varphi = 1.5$ (COMMUNITY COVERAGE 144 %). ALL VALUES IN MILLION COP (M COP).

Scenario	Self-consumption	Surplus revenue	Total
P2P	4.12	1.81	**5.94**
C1 (CREG 174)	4.12	1.50	5.63
C2 (CREG 101 072)	4.12	1.62	5.75

IV. RESULTS

A. Case study (144 % community coverage)

Applying the three market scenarios to data described in the previous section (generation, demand, and prices), Table I reports the aggregate net benefit and its decomposition for August 2025 with $\varphi = 1.5$. The self-consumption term is identical (4.12 M COP) across the three scenarios. All differences arise in the surplus-revenue term.

It is worth noting that P2P attains the highest aggregate net benefit, 5.5 % above C1 and 3.3 % above C2.

B. Per-agent heterogeneity

Table II reports the per-agent net benefit at the case-study coverage. Four of the five institutions prefer P2P strategy (Udenar, Mariana, HUDN, Cesmag), and UCC is the only outlier, with a slight preference for C2 over P2P.

TABLE II
PER-AGENT NET BENEFIT, AUGUST 2025, $\varphi = 1.5$. VALUES IN THOUSAND COP (KCOP). THE "BEST" COLUMN IDENTIFIES THE DOMINANT SCENARIO PER AGENT.

Agent	P2P [k]	C1 [k]	C2 [k]	Best
Udenar	982	961	889	P2P (+21 vs C1)
Mariana	1,073	1,060	1,037	P2P (+13 vs C1)
UCC	1,700	1,657	1,746	C2 (+46 vs P2P)
HUDN	987	968	914	P2P (+19 vs C1)
Cesmag	1,196	981	1,164	P2P (+31 vs C2)

TABLE III
PV-FACTOR SWEEP FOR DATA FROM AUGUST 2025. FOR EACH MARKET STRATEGY, NET BENEFIT IN MILLION COP (M COP) AND RANK IS SHOWN. THE CASE-STUDY ROW IS IN BOLD.

Factor φ	Coverage	P2P [M]	C1 [M]	C2 [M]
1.0	96 %	4.81 (rank 2)	4.92 (rank 1)	4.57 (rank 3)
1.1	106 %	5.05 (rank 1)	4.74 (rank 3)	4.83 (rank 2)
1.2	115 %	5.29 (rank 1)	4.99 (rank 3)	5.07 (rank 2)
1.3	125 %	5.52 (rank 1)	5.22 (rank 3)	5.31 (rank 2)
1.4	134 %	5.74 (rank 1)	5.42 (rank 3)	5.53 (rank 2)
1.5	**144 %**	**5.94 (rank 1)**	**5.63 (rank 3)**	**5.75 (rank 2)**
2.0	192 %	6.87 (rank 1)	6.64 (rank 3)	6.75 (rank 2)
2.5	240 %	7.74 (rank 1)	7.56 (rank 3)	7.65 (rank 2)
3.0	288 %	8.59 (rank 1)	8.44 (rank 3)	8.51 (rank 2)

This heterogeneity is driven by two main patterns. First, UCC favors C2 because PDE community pooling redistributes surplus based on installed capacity; with the community's largest demand, UCC absorbs a disproportionate share of this benefit. Under C1, UCC performs poorly because Type 1 permutations are capped by its own consumption, pushing excess energy into the lower-valued Type 2 residual.

At the opposite extreme, Cesmag's minimal demand heavily penalizes it under C1, as most of its surplus is forced into spot-price liquidation. However, Cesmag recovers strongly under both C2 and P2P frameworks. By contrast, the P2P market dynamically advantages surplus-providing institutions over deficit ones through endogenous hourly pricing, which compresses the per-agent dispersion seen under the regulated mechanisms.

C. PV-factor sweep: crossover and robustness

To localize the coverage factor where P2P becomes more profitable and to verify that $\varphi = 1.5$ is not a "conveniently selected" operating point, generation profiles were scaled by $\varphi \in [1.0, 3.0]$ holding demand and prices fixed, with $\Delta\varphi = 0.1$ in the transition window. Table III and Fig. 2 report the results.

The crossover is well-defined since the P2P–C1 difference moves from -110 kCOP at $\varphi = 1.0$ (where C1 leads) to $+312$ kCOP at $\varphi = 1.1$ (where P2P leads). A linear interpolation places the sign change at $\varphi \approx 1.03$. In consequence, the data prove that there is only a small gap between the current regulated market and the rise of P2P dominance.

Three patterns emerge from the PV-factor sweep. First, the P2P advantage over C1 stays in the narrow band $[+305, +313]$ kCOP across $\varphi \in [1.1, 1.5]$, with intra-plateau variation below 3 %. Moreover, the case study at $\varphi = 1.5$ lies inside this plateau, and any factor in $[1.1, 1.5]$ would yield

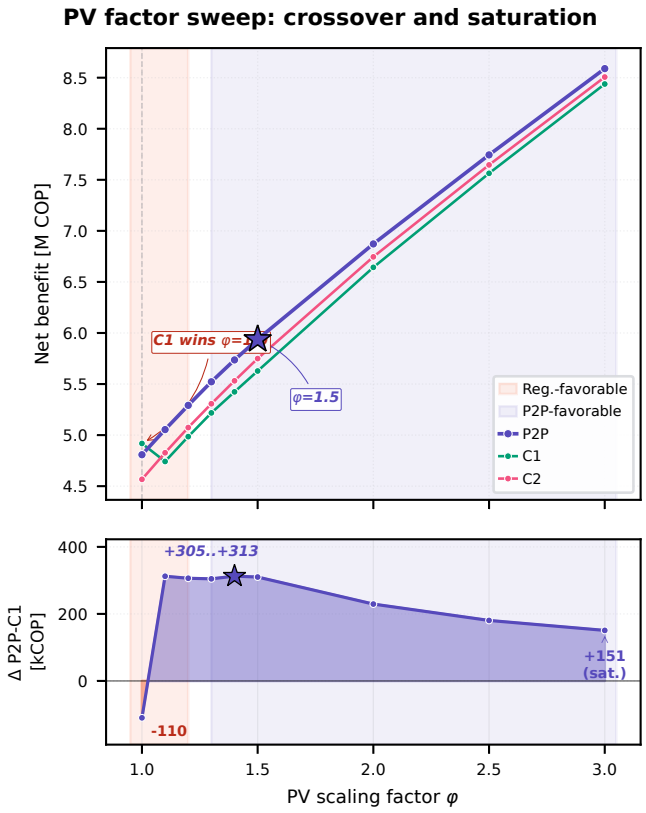


Fig. 2. Two-panel PV-factor sweep over $\varphi \in [1.0, 3.0]$ on the August 2025 horizon. **Top:** net benefit (million COP) per scenario. The regulated-favorable zone ($\varphi < 1.2$, light red) and P2P-favorable zone ($\varphi \geq 1.3$, light blue) bracket the crossover. **Bottom:** P2P–C1 advantage in kCOP, revealing a well-defined crossover at $\varphi \approx 1.03$, a plateau region $\varphi \in [1.1, 1.5]$ where the advantage is essentially constant (+305 to +313 kCOP), and a decay tail beyond $\varphi = 1.5$ that drops 51 % to +151 kCOP at $\varphi = 3.0$. The $\star$ marker on the $\varphi = 1.5$ point identifies the case study, which lies in the plateau (not at a peak), demonstrating that the choice of $\varphi = 1.5$ is not load-bearing for the qualitative ranking.

the same qualitative conclusion. Second, beyond $\varphi = 1.5$ the advantage decays monotonically (to +229, +181 and +151 kCOP at $\varphi = 2.0$, 2.5 and 3.0 respectively), a 51 % reduction relative to the plateau. The decay reflects a competitive ceiling: as community PV becomes increasingly abundant, both administrative schemes capture a growing share of the same surplus, narrowing the differentiator that hourly clearing introduces. Third, the C2 ranking flips at the lower end of the grid, such that the empirical baseline C2 is rank 3 (−351 kCOP relative to C1) because PDE pooling has little aggregate excess to redistribute when generation barely covers community demand. From $\varphi = 1.1$ onward C2 stabilizes at rank 2 across the rest of the sweep. Importantly, P2P retains rank 1 across all factors at and above the plateau, and across both admissible PDE methods of CREG 101 072/2025.

D. Hourly heterogeneity capture

For each hour-of-day $k \in \{0, \ldots, 23\}$, let B_k^{P2P} denote the aggregate community welfare obtained under the P2P mechanism, summed across the five institutions and accumulated over the 31 days of August 2025 within hour-of-day k; analogously B_k^{C2} for the C2 (CREG 101 072) settlement. Both quantities share an identical self-consumption term valued at the regulated retail tariff π_{gs}, namely $\sum_n \min(G_n, D_n)$ summed across the 31 days; this common physical baseline cancels in the dominance metric $\Delta_k = B_k^{P2P} - B_k^{C2}$, which therefore isolates the regulatory differentiator (how each mechanism monetises the community surplus S_k^{com}) from the auto-consumption baseline shared by both schemes. When the P2P market is inactive at hour-of-day k (no clearing pair forms), B_k^{P2P} collapses to the self-consumption-plus-spot-export form, equal to B_k^{C2} minus the PDE credit, so $\Delta_k \leq 0$ in those hours by construction.

Figure 3 reports Δ_k for the case-study horizon at $\varphi = 1.5$. The P2P market is active in 12 of the 24 hours-of-day, all confined to the solar window 06:00–17:00, and the cumulative monthly margin $\sum_k \max(\Delta_k, 0)$ amounts to 390 kCOP. The figure reveals a bimodal pattern with two welfare peaks and a midday valley. The morning peak at 08:00 (+57.9 kCOP) is the largest and coincides with the highest market penetration of the horizon, since the right-axis line indicates that the P2P market clears on roughly 65 % of the 31 August days at this hour. A second peak at 16:00 (+47.4 kCOP) appears as solar generation declines while institutional demand remains high; the afternoon market activates on approximately 68 % of days. Between the two peaks, the welfare advantage drops to +19.6 kCOP at 13:00, with market activation around 35 % of days. The pattern admits a direct economic interpretation: the welfare advantage is largest when the seller-buyer balance is sharpest, which occurs when surplus is becoming available but community demand has not yet been saturated (morning) or when surplus is contracting while demand persists (afternoon). At midday, abundant generation across the community shifts most institutions to the seller side simultaneously, so the pool of bilateral trading opportunities thins and the dynamic margin contracts. This intra-day structure is invisible to monthly settlement schemes, which aggregate all hours into a single per-month quantity and therefore cannot price the heterogeneity that the early-solar and late-solar regimes carry.

E. Robustness across PDE methods

Within the admissibility space of CREG 101 072/2025 [4] (PDE "agreed among members" under art. 19, with a default fallback proportional to the number of commercial frontiers under art. 9 num. 5 lit. b), we test two representative weighting forms: capacity-proportional and cumulative-surplus-proportional. Re-running the PV-factor sweep under both methods keeps the ranking unchanged: P2P retains rank 1 at every $\varphi \geq 1.1$, and C2 retains rank 2 across the same range. The crossover is therefore a property of the dynamic clearing mechanism rather than of the specific PDE rule chosen.

F. P2P market activity

At the case-study coverage, the P2P market is active in 190 of 744 hours (25.5 % of the horizon), trading 452.5 kWh internally. The residual surplus is exported to the spot market.

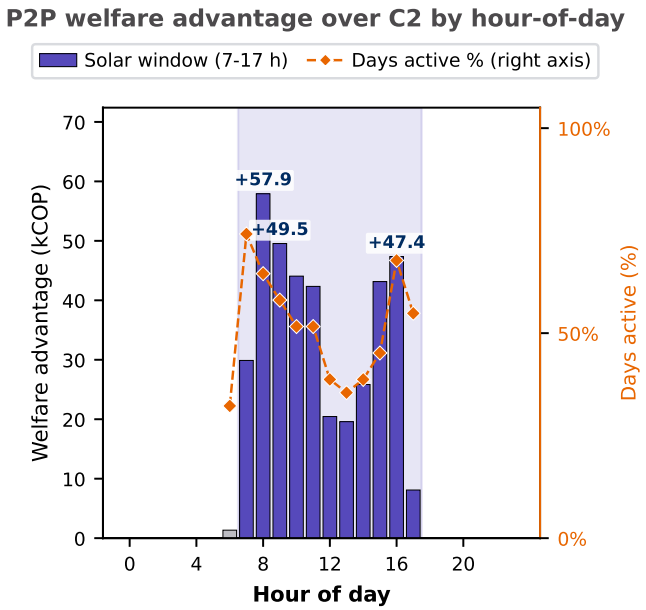


Fig. 3. Hourly P2P–C2 dominance at $\varphi = 1.5$ over the 744-hour August 2025 horizon. Bars: cumulative welfare advantage $\sum_k \max(\Delta_k, 0)$ in kCOP, summed across the five MTE institutions and accumulated by hour-of-day across 31 days. Right-axis line: percentage of days on which the P2P market clears at each hour-of-day. The shaded band marks the solar window 07:00–17:00. Annotated peaks indicate the three largest welfare contributions (+57.9, +49.5, +47.4 kCOP).

The active-hour count is lower than at the empirical baseline (221 hours at $\varphi = 1.0$) because the higher PV regime saturates community demand more often, leaving stretches in which all agents are net sellers and no peer market can form. The hours that remain active are those where heterogeneous demand profiles align peers across the seller–buyer divide. Therefore, these are the hours where P2P captures value that monthly settlement cannot.

Figure 4 summarizes when the P2P market clears and which role each agent plays. Panel (a) shows the day × hour heatmap of internal trade volume, with concentration in the solar window 07:00–17:00 and a clear weekday-vs-weekend contrast (workdays trade 6.2× more than weekends, with a peak of 10.5 kWh/h on August 22 at 08:00). Panel (b) shows the per-agent role classification (seller in orange, buyer in blue) over the 31-day horizon. The diurnal cycle is sharp: every institution acts as a seller during the PV midday window and as a buyer the rest of the day, confirming that no agent is systematically one-sided across the horizon.

Figure 5 complements the previous view by tracing the per-buyer cleared price π_n^* along the day, separated into a representative spectrum (Cesmag, Mariana, HUDN — the three highest-activity buyers) and a mixed/sparse group (UCC, Udenar). Cesmag, the most frequent buyer, clears at the spot floor $\pi_{gb} = 235$ COP/kWh during 83 % of its active hours, evidencing that high-frequency buyers face a buyer-favorable equilibrium driven by surplus PV supply. By contrast, Mariana and Udenar reach the upper rail $\pi_{gs} = 980$ COP/kWh in a smaller subset of hours, where supply scarcity transfers bargaining power to sellers.

Figure 6 reports the weekly accumulation of net benefit by mechanism over the same horizon. The figure uses a hybrid attribution: the P2P series is the actual hourly-clearing revenue summed per 168-hour window (no attribution required, since P2P clears at hourly granularity), while the C1 and C2 series — which by regulation settle monthly — are PV-weighted attributions of the monthly totals across the four weeks. P2P leads in every week, with an average advantage of approximately 78 kCOP per week (5.5 % over C1), consistent with the aggregate of Table I. The dips in weeks W1 and W3 reflect a smaller number of working days in those weeks (national holidays Aug. 7 and Aug. 18 plus weekends, four working days versus five in W2 and W4); the holiday-marked weeks are flagged with the gray "H" markers in the figure.

V. Discussion

A. P2P leading scenario

At 144% community coverage, the regulatory limitations of monthly settlements lose traction. Under C1, the Type 1 cap restricts permutations to an agent's own consumption, forcing excess high-PV surplus into the lower-valued Type 2 residual. Under C2, PDE pooling redistributes the aggregate surplus but remains capped by the community's total monthly deficit. P2P avoids both caps, allowing seller–buyer pairs to clear surplus hourly at endogenous prices and monetize energy that would otherwise hit administrative ceilings.

Figure 7 compares the per-agent net benefits of C1 and C2. C1 favors the three smaller-load prosumers (Udenar, Mariana, HUDN) because individual Type 1 valuation exceeds their potential redistribution share. Conversely, C2 favors UCC (whose large demand absorbs the PDE share) and Cesmag (whose massive surplus is favorably redistributed). While C2 marginally outperforms C1 in aggregate by 0.12 M COP, P2P strongly dominates both administrative schemes (Table I).

Figure 8 presents the Price of Fairness (PoF) analysis [16], highlighting the equity–efficiency trade-off. Inequality is evaluated using the Gini coefficient on per-agent net benefits, standard in P2P literature [2], [6]. At $\varphi = 1.5$, P2P maximizes total welfare ($W^{P2P} = 5.94$ M COP), whereas C1 minimizes inequality ($G = 0.106$ against P2P's 0.111). The aggregate PoF is:

$$\mathrm{PoF} = \frac{W_{\mathrm{eff}} - W_{\mathrm{fair}}}{|W_{\mathrm{eff}}|} = 5.2\%, \tag{4}$$

equivalent to a 310 kCOP reduction in community welfare if the equitable allocation (C1) were enforced.

The per-agent breakdown of the PoF reveals that this cost of fairness falls almost entirely on a single institution. Cesmag absorbs 70% of the community welfare reduction (214 kCOP, an individual drop of 17.9%), while the remaining agents absorb just 1% to 2.5% each. Because Cesmag is the pivot of this welfare–equity trade-off, a targeted policy compensating Cesmag directly for its surplus role could close the 5.2% efficiency gap without altering the buyer-favoring prices that benefit the rest of the community.

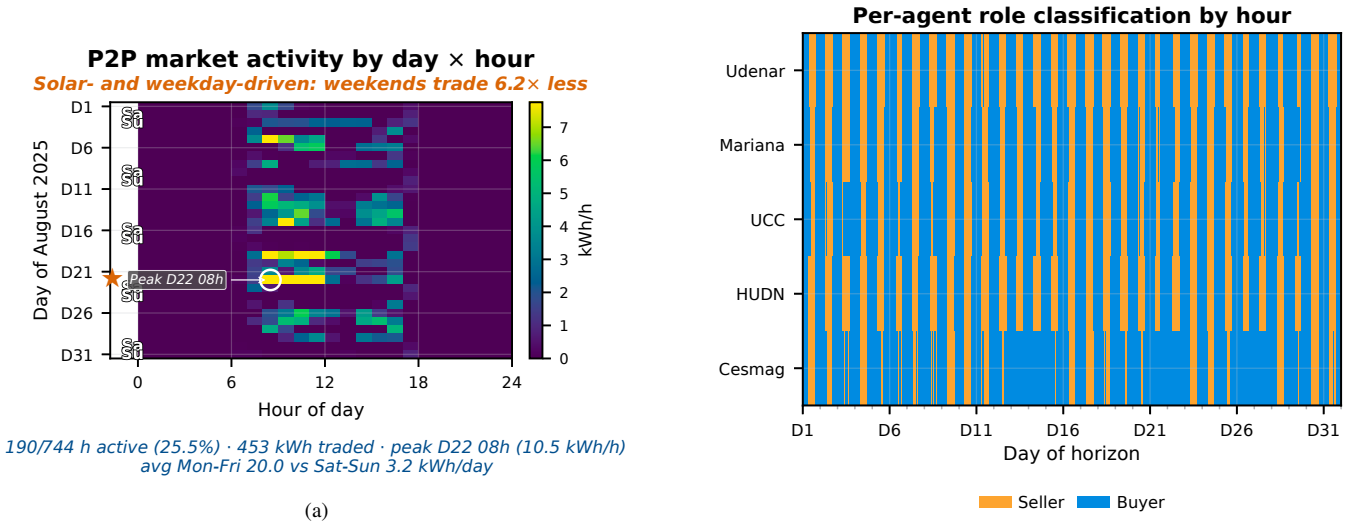


Fig. 4. Structure of P2P market activity over the August 2025 horizon at $\varphi = 1.5$. **(a)** Day × hour heatmap of internal trade volume in kWh/h; market active in 190 of 744 hours (25.5 %), with peak at D22 08:00 (10.5 kWh/h). **(b)** Per-agent role classification (seller in orange, buyer in blue) across the 31-day horizon.

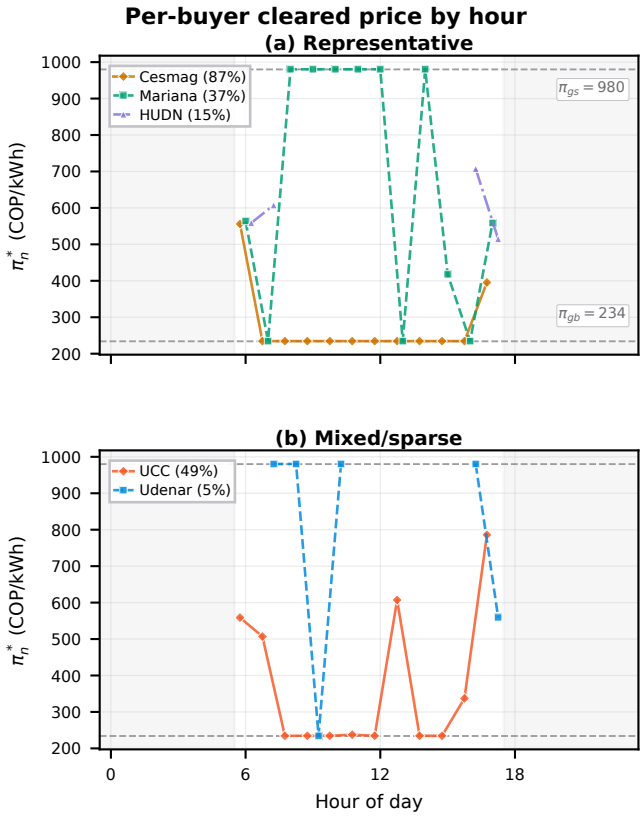


Fig. 5. Per-buyer cleared price π_n^* by hour of day at $\varphi = 1.5$. *Top*: representative spectrum with the three highest-activity buyers (Cesmag 87 %, Mariana 37 %, HUDN 15 %). *Bottom*: mixed/sparse buyers (UCC 49 %, Udenar 5 %). Dashed lines mark the admissibility window $[\pi_{gb}, \pi_{gs}] = [234, 980]$ COP/kWh; percentages indicate the share of P2P-active hours each buyer participates in.

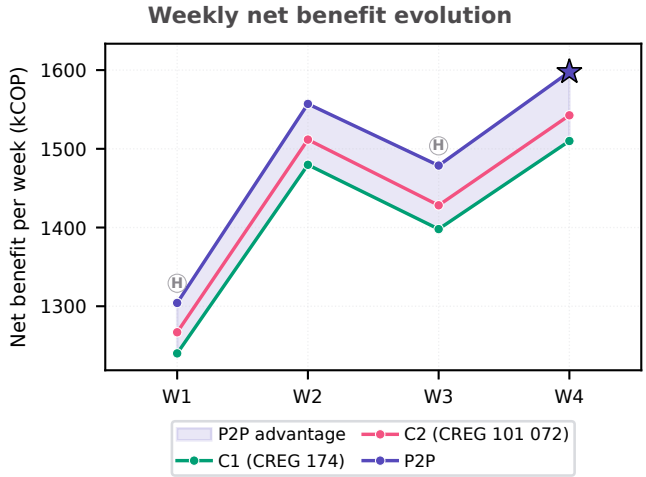


Fig. 6. Weekly accumulation of net benefit by mechanism over the August 2025 horizon at $\varphi = 1.5$. P2P (blue) leads C1 (green) and C2 (pink) in every week; the shaded band indicates the P2P-vs-C1 advantage. Holiday-marked weeks (W1 and W3, with national holidays Aug. 7 and Aug. 18) are flagged with gray "H" markers and exhibit smaller absolute totals due to fewer working days. The peak week is W4 (1,598 kCOP). The ranking P2P > C2 > C1 is preserved across all four weeks.

Given the minimal Gini gap ($\Delta G \approx 0.005$), P2P achieves its welfare advantage at a near-negligible distributional cost. However, the buyer-favoring price formation observed here stems from the specific MTE community structure, not the P2P algorithm itself. A more balanced community would likely yield clearing prices (π^*) closer to the mid-market rate, as demonstrated in [5].

B. Robustness above the case-study coverage

The ranking established at the case-study coverage (P2P > C2 > C1) remains robust across all higher PV factors, revealing

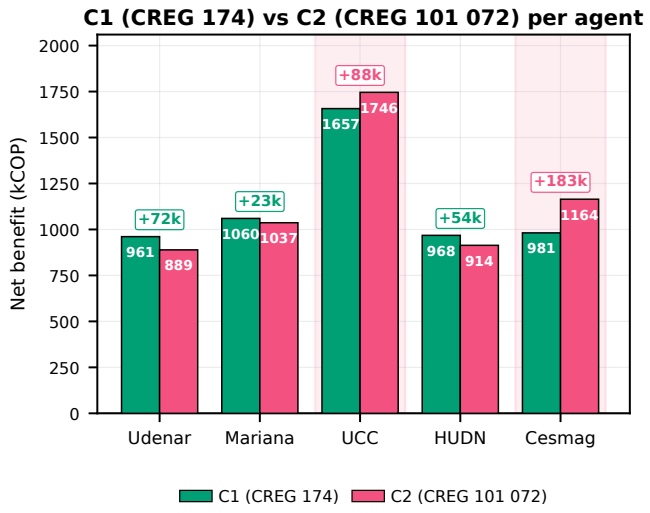


Fig. 7. Per-agent net benefit at the case-study coverage, C1 (CREG 174) versus C2 (CREG 101 072). C1 outperforms C2 for the three smaller-load prosumers (Udenar, Mariana, HUDN) because individual Type 1 valuation extracts more value. C2 outperforms C1 for UCC (large demand absorbing the PDE share) and Cesmag (largest surplus profile redistributed via PDE). The aggregate marginally favors C2 because the two C2-winning margins exceed the three C1-winning margins.

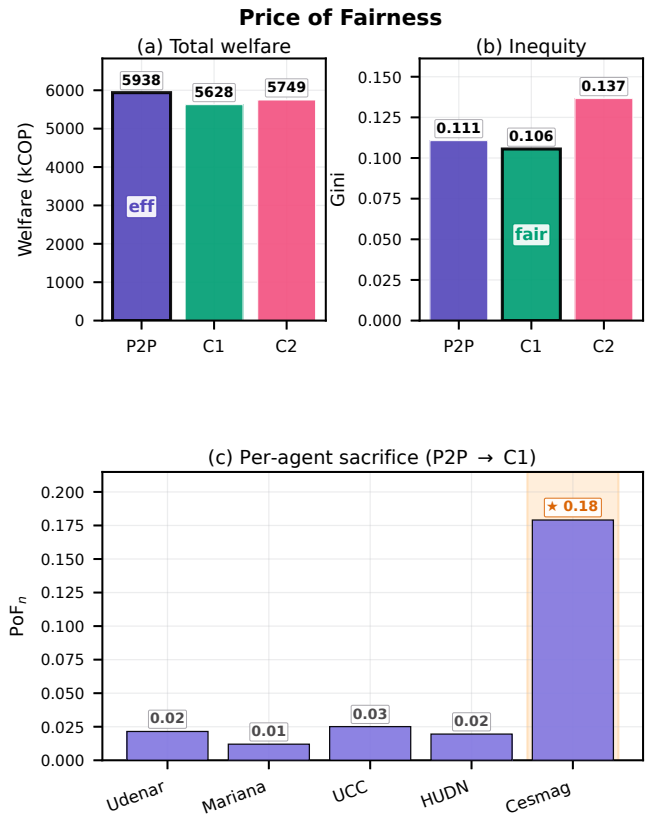


Fig. 8. Price of Fairness analysis [16]. (a) Total welfare per scenario; efficient (max welfare) and equitable (min Gini) scenarios are annotated. (b) Gini coefficient per scenario (lower is fairer). (c) Per-agent contribution to the welfare reduction $\mathrm{PoF}_n = \max\{0,\ (B_n^{\mathrm{eff}} - B_n^{\mathrm{fair}})/|B_n^{\mathrm{eff}}|\}$. Net sellers under the efficient allocation account for most of the reduction.

two regimes (Table III). Across the plateau $\varphi \in [1.1,\ 1.5]$, the P2P advantage over C1 holds steady between +305 and +313 kCOP, confirming the 144% coverage is a valid sample of a continuous range rather than a narrow optimum. Beyond $\varphi = 1.5$, this advantage decays monotonically, falling to +151 kCOP at $\varphi = 3.0$. This decay reflects a competitive ceiling: as PV becomes increasingly abundant, administrative schemes capture a larger share of the surplus, narrowing the performance gap introduced by hourly clearing. Nevertheless, P2P consistently retains rank 1. Internal peer trades absorb a growing fraction of community surplus at prices exceeding the spot floor (234 COP/kWh), capturing value that monthly settlements miss.

C. The role of prosumer heterogeneity in market adoption

Aggregate rankings often obscure critical individual preferences. At the empirical baseline (96% coverage), C1 leads the aggregate, yet three of the five institutions already prefer P2P (Udenar, HUDN, Cesmag). At 144% coverage, Mariana joins this group, leaving UCC as the sole outlier. Because community energy schemes rely heavily on surplus-providing (Udenar, HUDN, Cesmag) and mixed-role (Mariana) agents, analyzing only aggregate data underestimates the breadth of individual support. Consequently, voluntary participation in a P2P market is far more robust than aggregate metrics suggest.

D. Policy implication

CREG 174/2021 (C1) and CREG 101 072/2025 (C2) yield different outcomes in this case study. At $\varphi = 1.5$ and beyond, C1 is the worst-performing mechanism, and P2P dominates both administrative frameworks. As Colombia scales its solar capacity, the regulatory framework must adapt to accommodate dynamic clearing mechanisms.

A potential regulatory pathway involves expanding the "agreed-among-members" clause of CREG 101 072/2025 to permit market-derived dynamic weights for PDE, alongside the fixed administrative options currently listed. While the admissibility of continuously clearing market weights remains legally untested, the empirical evidence presented here supports initiating the regulatory analysis necessary to implement such dynamic settlement and dispute-resolution frameworks.

E. Limitations

This study acknowledges several limitations. First, the one-month horizon (744 hours) excludes seasonal variations and El Niño/La Niña cycles. Second, the community is localized (five institutions in a single city); broader generalization requires further empirical validation. Third, while the demand series is empirical, the PV generation is a scaled forecast ($\varphi = 1.5$); therefore, the 144% coverage serves as a grounded scenario rather than a direct measurement. Fourth, demand response, curtailment, and storage are excluded; flexible loads could shift peer demand into surplus hours, altering crossover thresholds. Finally, since Colombia does not currently regulate P2P markets, implementing these mechanisms requires either reinterpreting CREG 101 072/2025 or expanding the bilateral PPA framework—both of which demand dedicated legal analysis.

VI. Conclusions

This paper compared a Stackelberg–Replicator Dynamics P2P market against CREG 174/2021 individual self-generation (C1) and CREG 101 072/2025 collective community settlement (C2). The comparison used 744 hours of metered demand from five academic institutions in Pasto, Nariño (August 2025, MTE pilot), with photovoltaic generation scaled by $\varphi = 1.5$ above the empirical capacity to match the UPME 2025–2039 projection for 2030.

At 144 % community coverage, P2P attains the highest aggregate net benefit, 5.5 % above C1 and 3.3 % above C2, and four of the five institutions individually prefer P2P. Decomposing net benefit isolates a self-consumption term that is identical across mechanisms (4.12 M COP). The scenario differences arise entirely in the surplus-revenue term, where hourly P2P clearing values surplus that exceeds the monthly Type 1 and PDE caps imposed by the administrative rules. A Price-of-Fairness analysis places the equity–efficiency trade-off at 5.2 %, of which 70 % (214 of 308 kCOP) concentrates in a single institution (Cesmag). A redistribution scheme that compensated this institution explicitly for its surplus role could close the efficiency gap without altering the buyer-favoring price formation that benefits the rest of the community.

A nine-point PV-factor sweep, with resolution $\Delta\varphi = 0.1$ in the transition window, locates a well-defined crossover at $\varphi \approx 1.03$ — only 3 percentage points above the empirical baseline coverage of 96 %. At the empirical baseline (96 % coverage), C1 leads by 2.3 %, a gap that lies within the 6 % decentralization tolerance documented by [5], and three of the five institutions already prefer P2P. Across $\varphi \in [1.1, 1.5]$ the P2P–C1 gap forms a plateau of $+305$ to $+313$ kCOP (intra-plateau variation below 3 %), so the choice of $\varphi = 1.5$ for the case study represents one sample of a continuous robustness range rather than a fragile operating point. Beyond $\varphi = 1.5$ the advantage decays monotonically to $+151$ kCOP at $\varphi = 3.0$ (a 51 % reduction relative to the plateau), while P2P retains rank 1 across all factors tested and across both admissible PDE methods.

As Colombia scales distributed solar generation, neither the individual settlement of CREG 174/2021 nor the collective administrative settlement of CREG 101 072/2025 captures the full economic value of community surplus in the over-generation regime projected for 2030. A dynamic hourly clearing mechanism, potentially admissible under an extended reading of CREG 101 072/2025, would recover value that monthly aggregation does not. The buyer-favoring price formation observed in this case study is itself a structural feature of the MTE composition rather than a generic property of the algorithm. In a more balanced community, the equilibrium price would sit closer to the mid-window of the admissible interval, as the synthetic benchmark of [5] confirms. Future work will extend the horizon to a full year, calibrate per-agent levelized costs, model demand response and storage, and conduct a global sensitivity analysis around the crossover threshold.

References

[1] E. Barabino *et al.*, “Energy communities: A review on trends, energy system modelling, business models, and optimisation objectives,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 36, p. 101187, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.segan.2023.101187.

[2] W. Tushar, T. K. Saha, C. Yuen, D. Smith, and H. V. Poor, “Peer-to-peer trading in electricity networks: An overview,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 3185–3200, Jul. 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.2969657.

[3] CREG, "Resolución 174 de 2021: Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala," Diario Oficial, Bogotá, D.C., 2021.

[4] CREG, "Resolución 101 072 de 2025: Por la cual se definen las condiciones regulatorias para las Comunidades Energéticas y se modifica la Resolución CREG 174 de 2021," Diario Oficial, Bogotá, D.C., 2025.

[5] S. Chacón, K. Guerrero, G. Obando, and A. Pantoja, "An optimal peer-to-peer market in energy communities: A game-theoretic approach with replicator dynamics," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 45, p. 102114, 2026, doi: 10.1016/j.segan.2025.102114.

[6] E. Sorin, L. Bobo, and P. Pinson, “Consensus-based approach to peer-to-peer electricity markets with product differentiation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 2, pp. 994–1004, Mar. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2872880.

[7] N. Liu, J. Wang, and L. Wang, “Hybrid energy sharing for multiple microgrids in an integrated heat–electricity energy system,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 1139–1151, Jul. 2019, doi: 10.1109/TSTE.2018.2861986.

[8] A. Pantoja, G. Obando, and N. Quijano, “Distributed optimization with information-constrained population dynamics,” *J. Franklin Inst.*, vol. 356, no. 1, pp. 209–236, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jfranklin.2018.10.016.

[9] A. Paudel, K. Chaudhari, C. Long, and H. B. Gooi, “Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: A game-theoretic model,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 8, pp. 6087–6097, Aug. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2874578.

[10] B. Mao, D. Han, Y. Wang, X. Dong, and Z. Yan, “Pricing mechanism for community prosumers in decentralized electricity market,” *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 9, no. 5, pp. 1905–1917, Sep. 2023.

[11] A. Pantoja and N. Quijano, “A population dynamics approach for the dispatch of distributed generators,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 10, pp. 4559–4567, Oct. 2011, doi: 10.1109/TIE.2011.2107714.

[12] E. Baron-Prada and E. Mojica-Nava, “A population games transactive control for distributed energy resources,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 130, p. 106874, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106874.

[13] CREG, "Resolución 119 de 2007: Por la cual se aprueba la fórmula tarifaria general que permite calcular el costo unitario de prestación del servicio público domiciliario de electricidad," Diario Oficial, Bogotá, D.C., 2007.

[14] XM S.A. E.S.P., "*pydataxm* API client for the Colombian wholesale electricity market," 2025. [Online]. Available: https://www.xm.com.co/

[15] UPME, "Plan Indicativo de Expansión de la Generación 2025–2039," Bogotá, D.C., 2025.

[16] D. Bertsimas, V. F. Farias, and N. Trichakis, “The price of fairness,” *Oper. Res.*, vol. 59, no. 1, pp. 17–31, Jan.–Feb. 2011, doi: 10.1287/opre.1100.0865.

[17] Y. Yang, X. Xu, L. Pan, J. Liu, J. Liu, and W. Hu, “Distributed prosumer trading in the electricity and carbon markets considering user utility,” *Renewable Energy*, vol. 228, p. 120669, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120669.

[18] J. Martinez-Piazuelo, N. Quijano, and C. Ocampo-Martinez, “Decentralized charging coordination of electric vehicles under feeder capacity constraints,” *IEEE Trans. Control Netw. Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 1600–1610, Dec. 2022, doi: 10.1109/TCNS.2021.3128498.

[19] IRENA, "Renewable Power Generation Costs in 2024," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2025.

SIU Solar Station: A Decade of Research in Photovoltaic Devices Evaluation and Characterization

Santiago Restrepo Muñoz
GIMEL - CIDEMAT
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
santiago.restrepo11@udea.edu.co

Leider F Castro García
GIMEL - CIDEMAT
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
leider.castrog@udea.edu.co

Keony Jiménez Restrepo
GIMEL - CIDEMAT
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
keony.jimenezr@udea.edu.co

Andrés F Sánchez Prisco
GIMEL - CIDEMAT
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
afelipe.sanchez@udea.edu.co

Juan B Cano Quintero
GIMEL - CIDEMAT
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
bernando.cano@udea.edu.co

Esteban Velilla Hernández
GIMEL - CIDEMAT
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
esteban.velilla@udea.edu.co

Franklin Jaramillo Isaza
CIDEMAT
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
franklin.jaramillo@udea.edu.co

***Abstract*—The SIU Solar Station of the University of Antioquia has operated for ten years as an outdoor experimental platform for photovoltaic characterization and renewable energy research under tropical climatic conditions. The infrastructure enables the simultaneous evaluation of conventional and emerging photovoltaic technologies, including crystalline silicon, thin-film, and perovskite-based devices, through synchronized electrical and meteorological monitoring under real operating conditions.**

This paper summarizes the technological evolution and scientific contributions developed at the station, including custom I–V curve analyzers based on capacitive, potentiostat, and programmable electronic-load techniques, IoT-oriented monitoring architectures, and scalable data management systems for large-scale photovoltaic datasets. The platform has supported the development of numerical methodologies for outdoor characterization, machine-learning-based diagnostics, thermal-image fault detection, and intelligent monitoring systems. In addition, recent developments incorporating digital twins and Hardware-in-the-Loop methodologies enabled the validation of hybrid renewable energy systems and advanced energy management strategies.

Beyond scientific research, the station has contributed to technology transfer, photovoltaic deployment in vulnerable communities, and human resource formation through academic and industrial collaborations. Overall, the SIU Solar Station demonstrates the importance of long-term outdoor infrastructures for advancing photovoltaic characterization, intelligent diagnostics, and smart renewable energy systems under realistic environmental conditions.

***Index Terms*—Photovoltaic characterization, Outdoor Monitoring, I–V Curve Analysis, Photovoltaic Diagnostics, Energy Management Systems (EMS), Hardware-in-the-Loop (HIL).**

I. Introduction

Despite significant advances in photovoltaic technologies, an important limitation remains the gap between laboratory characterization and real outdoor operation. Most photovoltaic devices are evaluated under Standard Test Conditions (STC), which rarely represent actual operating environments, particularly in tropical regions characterized by dynamic irradiance, humidity variations, and transient thermal cycles [1]. As a result, the energy yield, efficiency, and degradation processes of photovoltaic systems may differ considerably from standardized predictions. In addition, the accelerated deployment of photovoltaic technologies and their increasing integration into modern electrical systems introduce challenges in operations, monitoring, predictive maintenance, and long-term reliability, where ensuring safety, efficiency, and economic viability remains essential for sustainable low-carbon energy systems [2]. Thus, improving the lifetime of PV modules and ensuring safe operation require a deeper understanding of the relationship between material degradation mechanisms and failure modes under real operating conditions [3].

Accordingly, different experimental setups have been developed intended to identify the most suitable PV technology regarding location [4], to evaluate the effects of temperature and seasonal weather conditions on the performance of different photovoltaic technologies [5], etc. However, since operating conditions vary significantly across locations, it is not possible to perform a direct comparison of PV technologies and generalize their performance under different climatic and environmental conditions. For that, methodologies that enablw performance correction under varying weather conditions [6], standardized procedures for performance testing [7], [8], and measurement equipment specifically designed for outdoor operation [1] are required to ensure reliable and comparable assessments of photovoltaic technologies.

In this regard, the SIU Solar Station of Universidad de Antioquia (6°15’38” N, 75°34’05” W, facing south at a fixed tilt angle of 13°) has been operating for ten years as an outdoor laboratory for photovoltaic performance characterization under

tropical conditions. The platform has supported the scaling and validation of emerging PV technologies, such as perovskite-based devices, while enabling the integration of performance data into a wide range of studies, including renewable-energy-based energy management systems. During this period, the station evolved from a conventional photovoltaic testing facility into an integrated experimental platform incorporating synchronized electrical and meteorological monitoring, IoT-based acquisition systems, artificial intelligence methodologies, and advanced energy management frameworks. The station has also supported technology transfer, photovoltaic deployment, human resource formation, and the validation of applications including BIPV systems, intelligent monitoring infrastructure, and hybrid energy systems.

Therefore, this paper presents an overview of the technological evolution, experimental developments, and scientific contributions achieved throughout a decade of operation of SIU Solar Station. The work summarizes the infrastructure capabilities, characterization methodologies, intelligent monitoring systems, and renewable energy integration strategies developed during this period, highlighting the role of the station as a long-term experimental platform for photovoltaic and smart energy systems research under tropical outdoor conditions.

II. SIU Solar Station: Experimental Infrastructure and Scientific Developments

A. Outdoor Photovoltaic Experimental Platform

The SIU Solar Station was established as a joint initiative between the Efficient Energy Management Research Group (GIMEL) and the Center for Research, Innovation, and Development of Materials (CIDEMAT) at the University of Antioquia. Located on the rooftop of the University Research Center (SIU), the station has operated for ten years as an outdoor experimental laboratory for the characterization, monitoring, and comparative evaluation of photovoltaic technologies under real operating conditions (Fig. 1a).

The experimental platform integrates photovoltaic technologies representative of the three generations of solar devices. The selection of these technologies was supported by the clustering analysis proposed by Velilla et al. (2017) [9], which was based on a database of 1016 commercially available photovoltaic modules reported up to 2016. This methodology enabled the identification of representative photovoltaic technologies with diverse electrical characteristics, efficiencies, and semiconductor materials. A detailed hierarchical classification of the technologies incorporated into the SIU Solar Station was previously presented in [10]. The Fig. 1b illustrates the simplified physical layout of the photovoltaic modules currently installed at the station, indicating the manufacturer, photovoltaic technology, and rated power of each module.

The station currently has a total installed photovoltaic capacity of 4.2 kWp distributed among grid-connected, backup, and characterization systems. In particular, 0.99 kWp is associated with a centralized Fronius inverter architecture, while 1.56 kWp is integrated through Enphase microinverter systems for



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Outdoor experimental infrastructure of the SIU Solar Station; (b) simplified physical distribution of the installed photovoltaic modules according to manufacturer, technology, and rated power.

module-level power conversion and monitoring. Additionally, 0.55 kWp is allocated to a backup system operated through a Victron inverter-charger, providing backup power to monitoring and characterization systems while enabling studies of hybrid and autonomous operation. All inverter systems are integrated with web-based monitoring platforms that enable remote data acquisition, continuous operational supervision, and long-term energy performance analysis. The remaining installed capacity is dedicated to photovoltaic characterization systems used for outdoor I–V curve acquisition and performance assessment.

Since its commissioning, the grid-connected photovoltaic systems installed at the SIU Solar Station have generated more than 26.3 MWh of renewable electrical energy under real tropical operating conditions. The centralized Fronius inverter system has accumulated 7.34 MWh, whereas the Enphase microinverter architecture has produced 18.99 MWh. These results demonstrate the operation of the experimental platform over the past decade and provide an overall indicator of its long-term operational performance.

To complement the electrical characterization infrastructure, the station incorporates a synchronized meteorological monitoring system, including pyranometers, calibrated reference cells, PT1000 temperature sensors, anemometers, and relative humidity sensors. These instruments enable continuous acqui-

sition of irradiance, ambient temperature, module temperature, wind speed, and humidity data, allowing detailed correlation analyses between environmental conditions and photovoltaic performance under tropical outdoor operation.

B. Electrical Characterization and Monitoring Infrastructure

To ensure high-resolution electrical characterization under dynamic outdoor conditions, the SIU Solar Station incorporated two custom analyzers for photovoltaic measurements under transient irradiance as part of the monitoring framework presented by Velilla et al. (2019) [1]. The Solar Panel Analyzer (SPA) is based on the capacitive I–V tracing technique, which enables characteristic curves to be acquired within milliseconds, minimizing the impact of irradiance fluctuations during outdoor operation (Fig. 2a). The Solar Cell Analyzer (SCA) employs a potentiostat-based architecture designed for the precise characterization of low-power devices such as solar cells and mini-modules (Fig. 2b).

One challenge associated with the SPA was the selection of the capacitor value, since this parameter strongly affects sweep duration and curve completeness in capacitive tracers. To address this limitation, Londoño et al. (2022) [11] proposed a capacitance sizing methodology based on curve-completeness indexes, significantly improving the reliability of photovoltaic parameter estimation under rapidly changing weather conditions. More recently, the panel characterization infrastructure was extended through programmable electronic loads based on linear MOSFET operation [12], enabling controlled current sweeps for high-voltage photovoltaic technologies such as CdTe modules (Fig. 2c).



(a) Capacitive technique



(b) Potentiostat technique



(c) Electronic load

Fig. 2. Photovoltaic electrical characterization instruments developed at the SIU Solar Station: (a) capacitive Solar Panel Analyzer (SPA); (b) potentiostat-based Solar Cell Analyzer (SCA); and (c) programmable electronic-load tracer for high-voltage photovoltaic modules.

The flexibility of the developed characterization infrastructure also enabled its adaptation to other energy-conversion technologies beyond photovoltaics. Sánchez Prisco et al. (2025) [13] implemented a thermoelectric systems characterization device based on the potentiostat architecture of the SCA, enabling synchronized acquisition of I–V and P–V curves together with temperature measurements for thermoelectric generators (TEGs). These developments demonstrate the versatility of the SIU Solar Station instrumentation framework for the characterization of multiple renewable-energy devices and energy-harvesting technologies.

C. Data Acquisition, Processing, and IoT Architecture

The monitoring infrastructure of the SIU Solar Station progressively evolved toward an IoT-oriented architecture based on distributed Raspberry Pi embedded systems. These units operate as autonomous acquisition and communication nodes, some integrated with photovoltaic analyzers for I–V curve acquisition, measurement of meteorological variables, or both tasks simultaneously. In addition to local processing and temporary storage, the embedded systems perform metadata tagging and automated synchronization with a centralized server, enabling the continuous acquisition and management of large-scale photovoltaic datasets generated under real operating conditions. Automated procedures for filtering, database generation, and parameter extraction enable the correlation of key electrical variables with the corresponding environmental conditions. Filtering methodologies based on the linearity criteria defined in IEC 61853, as described by Velilla et al. (2019) [14], are used to identify quasi-steady-state operating conditions and reduce the influence of transient irradiance fluctuations and atypical measurements during outdoor operation.

As the volume and complexity of the generated datasets increased, the data management framework was further expanded through the architecture proposed by Jiménez Restrepo et al. (2025) [10], illustrated in Fig. 3. The platform adopts a three-layer structure composed of a Data Lake, Data Warehouse, and Data Mart for the management of large-scale photovoltaic datasets. Raw measurements are stored in parquet-based repositories, while automated ETL pipelines orchestrated through Apache Airflow perform data cleaning, validation, synchronization, transformation, and parameter extraction. Processed information is consolidated in a MariaDB-based Data Warehouse and organized into optimized Data Marts for real-time visualization through Streamlit and Grafana dashboards. Over more than ten years of operation, this infrastructure has managed millions of I–V curves and environmental records, demonstrating the robustness and scalability of the SIU Solar Station for long-term photovoltaic monitoring, degradation analysis, predictive maintenance, and future machine-learning-based diagnostics.

III. Impact, Technology Transfer, and Energy Integration Applications

Beyond the development of experimental infrastructure and electrical characterization systems, the SIU Solar Station progressively evolved into a multidisciplinary research platform

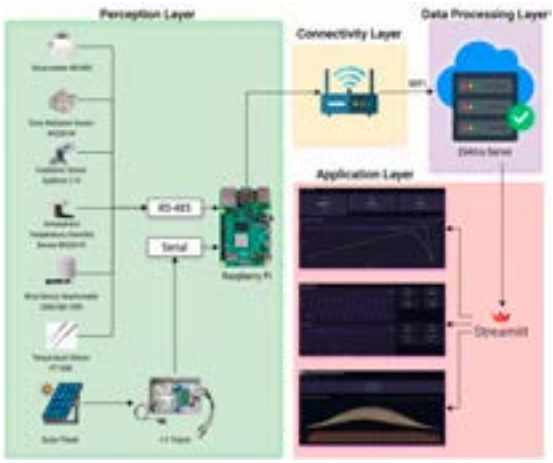


Fig. 3. IoT-based architecture for synchronized acquisition, storage, processing, and visualization of long-term photovoltaic monitoring data.

supporting the validation of emerging photovoltaic technologies, the development of intelligent diagnostic methodologies, and the integration of renewable energy systems under real outdoor conditions. The long-term operation of the station enabled the generation of large-scale synchronized electrical and environmental datasets, facilitating research activities ranging from photovoltaic device modeling and degradation analysis to applications of artificial intelligence, smart monitoring architectures, and energy management strategies.

Additionally, the station has played an important role in technology transfer and human resource formation by supporting the implementation of photovoltaic projects, testing protocols, and monitoring methodologies adopted in academic and industrial environments. Through these developments, the SIU Solar Station has contributed not only to photovoltaic characterization research but also to the broader transition toward intelligent and data-driven renewable energy systems adapted to tropical operating conditions.

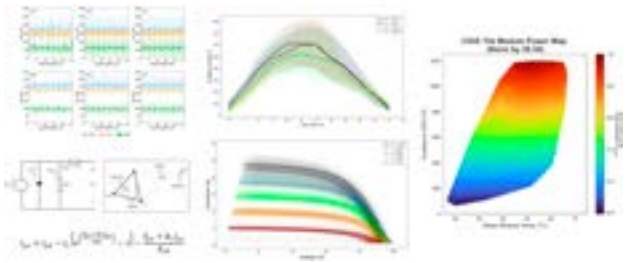


Fig. 4. Representative scientific contributions developed at the SIU Solar Station, including numerical modeling, outdoor characterization, and photovoltaic performance analysis.

A. Emerging Photovoltaic Technologies and Perovskite Solar Cells

One of the most prominent research lines developed at the SIU Solar Station has been the modeling, fabrication, and outdoor evaluation of perovskite solar cells. This work has enabled the validation of the technology across the full development cycle, from numerical parameter extraction and device design to long-term outdoor performance assessment under tropical operating conditions.

The first contribution focused on the reliable extraction of one-diode model parameters for perovskite solar cells. Velilla et al. (2018) [15] demonstrated that combining genetic algorithms with deterministic optimization techniques enables robust estimation of photovoltaic parameters even in the presence of hysteresis and nonlinear effects, providing a solid framework for interpreting the electrical behavior of this emerging technology. Building on this modeling foundation, Ramírez et al. (2019) [16] addressed one of the major barriers to commercialization by developing a p-i-n meso-superstructured architecture that demonstrated the scalability of perovskite devices from laboratory-scale cells to larger-area minimodules suitable for real-world applications.

Outdoor validation under tropical conditions revealed several distinctive advantages of perovskite technology. Velilla et al. (2019) [14] showed that perovskite devices exhibit a significantly lower dependence of performance on temperature than crystalline silicon, including a positive temperature dependence of the open-circuit voltage under high irradiance. This behavior provides an intrinsic advantage in hot climates, where conventional silicon modules typically experience substantial thermal losses. Extending this analysis, Velilla et al. (2021) [17] introduced the ideality factor as a physically meaningful diagnostic indicator for high-throughput outdoor monitoring. By correlating the time required to reach an ideality factor of two with the conventional T_{80} lifetime metric, the study demonstrated that this parameter provides direct insight into the evolution of recombination mechanisms and degradation pathways under real operating conditions.

Despite these promising results, long-term stability remains the principal challenge for the commercial deployment of perovskite photovoltaics. Patiño López et al. (2026) [8] synthesized the lessons learned from field and laboratory studies and concluded that controlling moisture ingress, ultraviolet exposure, thermal stress, and encapsulation defects is essential for achieving reliable outdoor operation. Together, these studies highlight the strategic role of the SIU Solar Station in advancing perovskite solar technology by demonstrating reliable modeling methodologies, scalable device architectures, competitive outdoor performance, and new diagnostic tools for understanding degradation and improving long-term stability.

B. Outdoor Characterization and Numerical Methodologies

A second major research line at the SIU Solar Station has focused on the development of numerical methodologies to improve the reliability and comparability of outdoor photovoltaic measurements (Fig. 4). These studies addressed one of the main limitations of field experiments: the difficulty of comparing technologies operating under continuously changing irradiance and temperature conditions.

Padilla et al. (2022) [6] demonstrated that outdoor I–V curves can be accurately translated to Standard Test Conditions (STC) and Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) using a numerical correction methodology based on Procedure 3 (interpolation/extrapolation) of the IEC 60891 standard. By proposing a random process that combines three different outdoor I–V curves to cover a wide range of weather conditions, the researchers reduced the discrepancy between corrected measurements and manufacturer specifications to relative errors below 8%. This approach provides a robust numerical tool for comparing different photovoltaic technologies under equivalent conditions and significantly reduces the uncertainty inherent in uncontrolled outdoor testing, highlighting that NOCT is a more stable reference for outdoor evaluations than STC.

To support the development of advanced data-driven methodologies, Londoño et al. (2023) [18] published a comprehensive open-access dataset containing outdoor and synthetic performance data for multiple photovoltaic technologies and capacitor configurations used in I–V tracers. This benchmark includes synchronized electrical and meteorological measurements and provides a standardized resource for validating numerical models, optimization algorithms, and machine learning techniques. Together, these contributions established a robust methodological foundation for translating outdoor measurements into comparable performance indicators, reducing uncertainty in field-based characterization, and enabling reliable diagnostics and predictive analyses across conventional and emerging photovoltaic technologies.

C. Artificial Intelligence and Intelligent Diagnostics

The continuous generation of synchronized electrical and meteorological datasets at the SIU Solar Station presents both a challenge and an opportunity for automated photovoltaic diagnostics. In this context, recent research efforts have focused on incorporating artificial intelligence, machine learning, and computer vision techniques into the station's monitoring infrastructure. Jiménez et al. (2026) [19] developed HDUNet, a lightweight deep learning architecture for photovoltaic fault detection from thermal images. The proposed model achieved high diagnostic accuracy while maintaining a low computational cost, making it suitable for deployment on edge-computing platforms such as Raspberry Pi systems for real-time monitoring applications. Building upon this previous work, current research focuses on adapting the published HDUNet architecture into a complete automated inspection framework. As illustrated in Fig. 5, the proposed workflow integrates UAV-based thermal image acquisition, photovoltaic module detection, image segmentation, and fault classification, extending the original model toward an end-to-end diagnostic pipeline suitable for large-scale photovoltaic inspections.

The SIU Solar Station provides the experimental environment required to validate this automated inspection framework under real operating conditions. The next stage of the project will integrate the outputs of the HDUNet-based workflow with synchronized I–V curves, single-diode model parameters, and meteorological measurements, enabling the generation of comprehensive multimodal datasets for model validation and performance assessment. This integration will facilitate the correlation of thermal anomalies with electrical signatures and environmental conditions, providing a more reliable basis for photovoltaic fault diagnosis while establishing the foundation for future prognostic and predictive maintenance strategies in photovoltaic systems.

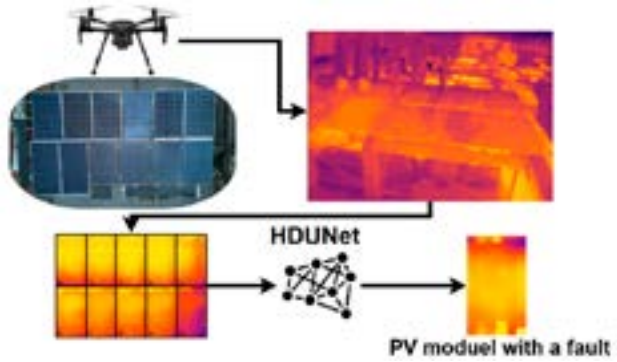


Fig. 5. Workflow of the AI-based photovoltaic fault diagnosis using UAV thermal imagery and the HDUNet segmentation model.

D. Smart Energy Systems and Hardware-in-the-Loop Validation

In recent years, the SIU Solar Station has expanded beyond photovoltaic characterization into an advanced experimental environment for smart energy systems, hybrid storage, and microgrid research. The long-term outdoor datasets generated by the station are now used to reproduce realistic photovoltaic generation profiles in the Energy Management Systems (EMSLAB), enabling the validation of control strategies and supervisory algorithms under representative operating conditions. Fig. 6 presents the current EMSLAB infrastructure, where programmable power equipment and physical energy devices are integrated for Hardware-in-the-Loop experimentation and digital-twin validation. EMSLAB integrates programmable electronic loads and sources with physical and emulated components, including batteries, electrolyzers, fuel cells, and power converters, allowing the implementation and testing of EMS and digital twins applications [13], [20].

Sánchez Prisco et al. (2025a) [13] presented a Hardware-in-the-Loop (HIL) platform for validating a mobile green hydrogen refueling station powered by renewable energy, developed as part of the Hydrogen Laboratory (H2omeLab). Fig. 7 illustrates the experimental infrastructure, where photovoltaic generation, battery energy storage systems, electrolyzers, hydrogen storage, and programmable electrical loads are integrated into a unified platform for renewable hydrogen production and validation. The platform system demonstrated the complete energy pathway from solar electricity to hydrogen production, storage, and end use. In parallel, Sánchez Prisco et al. (2025b) [20] developed a flexible simulation–emulation



Fig. 6. Experimental infrastructure of the Energy Management Systems Laboratory (EMSLAB) used for Hardware-in-the-Loop validation of renewable energy systems.

framework in which computational models interact in real time with programmable power supplies and electronic loads, enabling the validation of photovoltaic and battery digital twins together with their associated control strategies prior to field deployment.

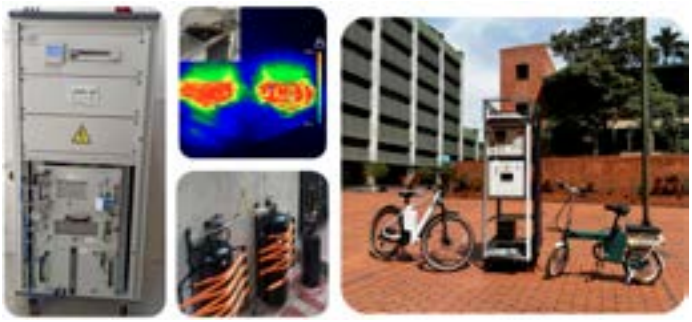


Fig. 7. Experimental infrastructure of the H2omeLab platform for renewable hydrogen production and validation.

These developments transformed the SIU Solar Station into a broader experimental ecosystem for renewable integration, where outdoor photovoltaic measurements, EMSLAB, and H2omeLab operate in a complementary manner. By enabling the integration of photovoltaic systems with batteries, supercapacitors, electrolyzers, fuel cells, and hydrogen storage, the platform reduces implementation risks, accelerates the development of digital twins, and supports the design and validation of intelligent EMS and resilient microgrids adapted to tropical operating conditions.

E. Institutional and Social Impact

Beyond its scientific and technological contributions, the SIU Solar Station has played a strategic role in promoting the adoption and social appropriation of photovoltaic energy. The platform provided the technical foundation for selecting photovoltaic technologies and system configurations used in solar installations implemented in eleven schools located in energy-vulnerable regions of Antioquia. Representative examples of these installations are shown in Fig. 8 (Project ”Nanostructured solar cells: development and technology application in non-interconnected zones or regions with energy intermittency in Antioquia”; and initiatives involving the General Royalties System, EPM, Sumicol S.A.S, and Andercol S.A). These projects not only improved energy reliability in remote communities but also facilitated the introduction and appropriation of renewable energy technologies in educational environments.



Fig. 8. Photovoltaic systems and social appropriation activities implemented in rural schools in Antioquia.

The knowledge generated at the station also supported technology transfer to industrial and research applications, including building-integrated photovoltaics, distributed monitoring systems, and hybrid renewable energy projects. Equally important has been its contribution to human resource formation. Over more than a decade of operation, the station has served as a training platform for undergraduate and graduate students, young researchers, and technical professionals, fostering interdisciplinary expertise in photovoltaic technologies, intelligent monitoring, and smart energy systems. Together, these contributions highlight the SIU Solar Station as a research infrastructure with a significant human and social impact, advancing scientific knowledge while strengthening local capabilities and supporting the sustainable energy transition in Colombia.

IV. Conclusions

This paper presented the technological evolution and scientific contributions developed during ten years of operation of the SIU Solar Station as an outdoor experimental platform for photovoltaic characterization and renewable energy research under tropical climatic conditions. Throughout this period, the station evolved from a conventional photovoltaic testing facility into a multidisciplinary infrastructure integrating synchronized electrical and meteorological monitoring, embedded acquisition systems, IoT-based architectures, artificial intelligence methodologies, and smart energy management frameworks.

The development of custom photovoltaic analyzers based on capacitive, potentiostat, and programmable electronic-load techniques enabled high-resolution outdoor electrical charac-

terization for a wide range of photovoltaic technologies, including crystalline silicon, thin-film, and emerging perovskite devices. These developments, together with the implementation of distributed monitoring systems and scalable data architectures, enabled the generation and management of large-scale synchronized datasets under real operating conditions.

The SIU Solar Station also supported the development of numerical methodologies for outdoor characterization, machine-learning-based photovoltaic diagnostics, thermal-image fault detection, and intelligent monitoring systems. In addition, the incorporation of digital twins and Hardware-in-the-Loop methodologies expanded the station capabilities toward smart energy systems, hybrid renewable integration, and advanced energy management validation. Beyond scientific research, the station contributed to technology transfer, renewable energy deployment, and human resource formation through academic projects, industrial collaborations, and photovoltaic implementations in vulnerable communities.

The experience accumulated over a decade of continuous operation demonstrates that long-term outdoor experimental infrastructures are essential for bridging the gap between laboratory characterization and real-world photovoltaic performance. Beyond supporting individual research projects, the SIU Solar Station has evolved into a multidisciplinary platform that enables the development, validation, and deployment of advanced monitoring, diagnostic, and energy management methodologies under realistic tropical operating conditions.

V. ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the projects “Development of Capabilities for the Generation of Electric Power to Address the Challenges of Diversification, Decentralization, and Demand in Urban and Rural Environments of Antioquia, Risaralda, Caldas, and Quindío” with BPIN 2023000100025, ”Plataforma de Hardware in the Loop para la Gestión Energética” (code 2024-76942), funded through the 2023-2024 call for proposals by UdeA and “Development of an Energetically Autonomous Smart Agriculture Platform for Continuous Monitoring of Relevant Variables Aimed at Improving Productivity and Mitigating Environmental Impact in Horticultural Crops of Antioquia and Quindío”, code BPIN 2022000100012 which provided key support for the execution of this work.

REFERENCES

[1] E. Velilla, J. B. Cano, and F. Jaramillo, “Monitoring system to evaluate the outdoor performance of solar devices considering the power rating conditions,” *Solar Energy*, vol. 194, pp. 79–85, 2019.

[2] A. Mellit and S. Kalogirou, “Artificial intelligence and internet of things to improve efficacy of diagnosis and remote sensing of solar photovoltaic systems: Challenges, recommendations and future directions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, p. 110889, 2021.

[3] E. Wang, H. E. Yang, J. Yen, S. Chi, and C. Wang, “Failure modes evaluation of pv module via materials degradation approach,” *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 245–252, 2013.

[4] V. Sharma, A. Kumar, O. S. Sastry, and S. S. Chandel, “Performance assessment of different solar photovoltaic technologies under similar outdoor conditions,” *Energy*, vol. 58, pp. 511–518, 2013.

[5] G. Makrides, B. Zinsser, M. Norton, G. E. Georghiou, M. Schubert, and J. H. Werner, “Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 2, pp. 754–762, 2010.

[6] A. Padilla, C. Londoño, F. Jaramillo, I. Tovar, J. B. Cano, and E. Velilla, “Photovoltaic performance assess by correcting the i-v curves in outdoor tests,” *Solar Energy*, vol. 237, pp. 11–18, 2022.

[7] M. U. Ali, H. Mo, Y. Li, and A. B. Djurišić, “Outdoor stability testing of perovskite solar cells: Necessary step toward real-life applications,” *APL Energy*, vol. 1, no. 2, p. 020903, 2023.

[8] J. J. Patiño López, K. G. Rivera Botia, K. Ballestas, E. Velilla, J. F. Montoya, F. Jaramillo, and D. Ramirez, “The long road to outdoor stability: Real-world challenges for controlling perovskite materials for solar cells,” *Chemical Society Reviews*, vol. 55, pp. 4648–4706, 2026.

[9] E. Velilla, S. Restrepo, and F. Jaramillo, “Cluster analysis of commercial photovoltaic modules based on the electrical performance at standard test conditions,” *Solar Energy*, vol. 144, pp. 335–341, 2017.

[10] K. Jimenez Restrepo, L. F. Castro García, M. A. Moreno Rodas, A. López Cardona, S. D. García Aristizábal, and E. Velilla Hernández, “Monitoring platform for pv devices considering i-v curve and weather data,” in *IEEE Conference Proceedings*, IEEE, 2025.

[11] C. D. Londoño, J. B. Cano, and E. Velilla, “Capacitive tracer design to mitigate incomplete i-v curves in outdoor tests,” *Solar Energy*, vol. 243, pp. 361–369, 2022.

[12] S. Restrepo Muñoz, A. F. Sánchez Prisco, L. F. Castro García, J. A. Gómez Múnera, S. García Aristizábal, J. B. Cano Quintero, and E. Velilla Hernández, “Implementation of iot curve tracer based on programmable electronic load using linear mosfet,” in *2025 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, IEEE, 2025.

[13] A. F. Sánchez Prisco, J. A. Valencia V., J. A. Gómez Múnera, S. García Aristizábal, J. B. Cano Quintero, and E. Velilla Hernández, “Prototype validation for mobile green hydrogen refueling station using hardware-in-the-loop,” in *2025 7th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, pp. 729–734, IEEE, 2025.

[14] E. Velilla, D. Ramirez, J.-I. Uribe, J. F. Montoya, and F. Jaramillo, “Outdoor performance of perovskite solar technology: Silicon comparison and competitive advantages at different irradiances,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 191, pp. 15–20, 2019.

[15] E. Velilla, J. B. Cano, K. Jimenez, J. Valencia, D. Ramirez, and F. Jaramillo, “Numerical analysis to determine reliable one-diode model parameters for perovskite solar cells,” *Energies*, vol. 11, no. 8, p. 1963, 2018.

[16] D. Ramirez, E. Velilla, J. F. Montoya, and F. Jaramillo, “Mitigating scalability issues of perovskite photovoltaic technology through a p-i-n meso-superstructured solar cell architecture,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 195, pp. 191–197, 2019.

[17] E. Velilla, F. Jaramillo, and I. Mora-Sero, “High-throughput analysis of the ideality factor to evaluate the outdoor performance of perovskite solar minimodules,” *Nature Energy*, vol. 6, pp. 54–62, 2021.

[18] C. D. Londoño, J. B. Cano, F. Jaramillo, J. A. Valencia, and E. Velilla, “Outdoor and synthetic performance data for pv devices concerning the weather conditions and capacitor values of i-v tracer,” *Data in Brief*, vol. 47, p. 109007, 2023.

[19] K. Jimenez, J. B. Cano, and E. Velilla, “A lightweight deep learning model for fault detection of pv modules using thermal images,” *Solar Energy*, vol. 303, p. 114120, 2026.

[20] A. F. Sánchez Prisco, J. A. Gómez Múnera, S. García Aristizábal, J. B. Cano Quintero, S. A. Díaz Carmona, and E. Velilla Hernández, “Hil emulation and simulation for smart energy management: Photovoltaic panels and battery cases,” in *2025 IEEE 7th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, IEEE, 2025.

Marco conceptual para la evaluación integral de proyectos de energía eólica en Colombia: un enfoque de operacionalización de criterios

Juan E. Posada
Facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia
Medellín 050010, Colombia
juan.posadar@udea.edu.co

Luiza Álvarez
Facultad de Minas, Sede Medellín
Universidad Nacional de Colombia
Carrera 80 No 65-223
Medellín 050034, Colombia
lualvarezl@unal.edu.co

Laura M. Cárdenas
Facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia
Medellín 050010, Colombia
lauram.cardenas@udea.edu.co

Maritza Jiménez
Facultad de Minas, Sede Medellín
Universidad Nacional de Colombia
Carrera 80 No 65-223
Medellín 050034, Colombia
mjimenezz@unal.edu.co

César Nieto-Londoño
Grupo de Investigación en Ingeniería Aeroespacial
Grupo de Energía y Termodinámica
Universidad Pontificia Bolivariana
Medellín 050031, Colombia
cesar.nieto@upb.edu.co

Resumen*—Este artículo presenta una base conceptual para la evaluación integral de proyectos de energía eólica en Colombia, orientada a apoyar la toma de decisiones estratégicas para una transición energética sostenible. La investigación responde a la necesidad de una propuesta consolidada que integre y operacionalice de manera coherente las dimensiones y criterios empleados en la evaluación de estos proyectos, dado que los enfoques existentes suelen ser parciales o desconectados y presentan limitaciones en la definición y medición de los criterios. Para abordar esta necesidad, se realizó una revisión estructurada de literatura apoyada en artículos indexados y marcos normativos, con el propósito de identificar y recopilar los criterios considerados en la evaluación de proyectos de energía eólica. Posteriormente, dichos criterios se operacionalizaron mediante un procedimiento orientado a establecer una forma de medición estandarizada que permitiera su uso como insumo en diversos estudios. Para cada criterio se estableció su definición contextual, se identificó su unidad de medida y se precisó la forma de medición correspondiente. Finalmente, se revisaron casos de estudio sobre evaluación de proyectos de energía eólica en Colombia, para identificar las fuentes de información empleadas y recopilar los datos requeridos para la aplicación del marco en el contexto nacional. Como resultado, se propone un marco conceptual compuesto por criterios ambientales, económicos, sociales, técnicos y geoespaciales, articulados con los insumos de información necesarios para su aplicación. Este aporte constituye una base estructurada para apoyar la evaluación integral de proyectos de energía eólica y contribuir al desarrollo sostenible del sector energético en Colombia.

Palabras clave*—Energía eólica, Operacionalización de criterios de evaluación, Marco conceptual, Transición energética.

Abstract*—This paper presents a conceptual basis for the comprehensive evaluation of wind energy projects in Colombia, aimed at supporting strategic decision-making for a sustainable energy transition. The research addresses the need for a consolidated proposal that coherently integrates and operationalizes the dimensions and criteria employed in the evaluation of these projects, given that existing approaches are often partial or disconnected and present limitations in the definition and measurement of the criteria. To address this need, a structured literature review supported by indexed articles and regulatory frameworks was conducted with the purpose of identifying and compiling the criteria considered in the evaluation of wind energy projects. Subsequently, these criteria were operationalized through a procedure aimed at establishing a standardized form of measurement that would allow their use as input for various studies. For each criterion, its contextual definition was established, its unit of measurement was identified, and the corresponding method of measurement was specified. Finally, case studies on the evaluation of wind energy projects in Colombia were reviewed in order to identify the information sources employed and compile the data required for the application of the framework in the national context. As a result, a conceptual framework composed of environmental, economic, social, technical, and geospatial criteria, articulated with the information inputs required for their application, is proposed. This contribution constitutes a structured basis to support the comprehensive evaluation of wind energy projects and contribute to the sustainable development of the energy sector in Colombia.

Keywords*—Wind energy, Operationalization of evaluation criteria, Conceptual framework, Energy transition.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de las temperaturas a nivel mundial refleja un desafío crítico que exige acciones inmediatas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y adoptar modelos energéticos sostenibles [1]. En este contexto, la transición energética se entiende como un proceso orientado a la descarbonización del sector energético, mediante la sustitución progresiva de combustibles fósiles por fuentes renovables, buscando contribuir a la diversificación de la matriz eléctrica y al fortalecimiento de la seguridad del suministro [1], [2]. En Colombia, esta necesidad de diversificación es evidente, dado que la matriz eléctrica depende en gran medida de la generación

hidroeléctrica; ante fenómenos climáticos como El Niño, la disminución de los aportes hídricos obliga a cubrir la demanda con generación térmica, lo que incrementa los costos operativos y las emisiones [3].

Ante esto, resulta relevante evaluar la generación con fuentes no convencionales, entre las que destaca la energía eólica por su potencial significativo en el país [2], [4]. No obstante, este proceso enfrenta diversos desafíos, como la necesidad de realizar inversiones significativas, contar con marcos regulatorios adecuados, asegurar respaldo social y considerar aspectos como el impacto ambiental, la disponibilidad del recurso energético en los sitios de instalación y la conexión a la infraestructura eléctrica existente, factores que deben ser contemplados por los tomadores de decisiones al determinar la viabilidad de los proyectos [5], [6]. En este sentido, la evaluación y el desarrollo de proyectos de energía requieren un enfoque multidimensional, capaz de considerar de manera articulada los aspectos ambientales, económicos, sociales y técnicos que condicionan su desarrollo [7], [8].

Pese a la abundancia de estudios, la literatura aún carece de una propuesta consolidada que articule de forma coherente las distintas dimensiones y criterios aplicados a la evaluación de este tipo de proyectos [8]. En particular, los enfoques existentes suelen ser parciales o desconectados y presentan limitaciones en la definición y medición de los criterios, lo que dificulta su operacionalización precisa y su aplicación en los procesos de evaluación [9], [10]. Esta situación genera incertidumbre en los procesos de planificación, al limitar la capacidad de los tomadores de decisiones para identificar oportunidades, gestionar riesgos y diseñar estrategias informadas.

En este contexto, resulta necesario avanzar hacia una estructura coherente y unificada de los criterios empleados en la literatura, bajo una lógica común que permita analizar de manera integral los factores que condicionan la viabilidad de los proyectos de energía eólica y posibilite su operacionalización como criterios comparables dentro de los procesos de evaluación [11].

Ante ello, el presente estudio tiene como objetivo desarrollar un marco conceptual para la evaluación integral de proyectos de energía eólica que articule y operacionalice los criterios relevantes para su análisis, con el fin de apoyar la toma de decisiones estratégicas orientadas al desarrollo sostenible del sector energético en Colombia.

II. METODOLOGÍA

La metodología empleada se estructuró en tres fases articuladas, orientadas al cumplimiento del objetivo planteado en esta investigación. A continuación, se describe cada una de ellas.

A. Revisión de literatura

Se realizó una revisión estructurada de literatura apoyada en artículos indexados y marcos normativos, con el propósito de identificar los criterios empleados en la evaluación de proyectos de energía eólica y reconocer los enfoques utilizados para su clasificación. El análisis consideró las dimensiones reportadas, la recurrencia de los criterios y la relación conceptual entre estos y las categorías de evaluación propuestas en los estudios revisados. Con base en ello, se establecieron las dimensiones de análisis del marco y se organizó el conjunto de criterios que lo conforma.

B. Operacionalización de criterios

Posteriormente, se desarrolló la operacionalización de los criterios con el propósito de establecer una forma de medición estandarizada para su evaluación. Para ello, a cada criterio se le estableció una definición contextual, se le identificó la unidad de medida correspondiente y se le precisó la forma de medición requerida para su aplicación, con el fin de estructurarlos como criterios medibles y comparables dentro del marco propuesto.

C. Obtención de fuentes de información

Como etapa final, una vez clasificados y operacionalizados los criterios, se revisaron casos de estudio sobre evaluación de proyectos de energía eólica en Colombia, con el propósito de identificar las fuentes de información empleadas y recopilar los datos requeridos para la aplicación de los criterios en el contexto nacional.

III. RESULTADOS

A. Estructuración de dimensiones y criterios

A partir de la revisión de literatura, se evidenció una diversidad de enfoques en la evaluación de proyectos de energía eólica. Si bien los estudios analizados no presentan un consenso claro sobre la selección y clasificación de los criterios considerados, sí permiten identificar categorías analíticas recurrentes que fundamentaron la estructuración del marco adoptado en esta investigación.

De este modo, se integran las dimensiones ambiental, económica, social, técnica y geoespacial, identificadas como las más representativas y consistentes en la literatura revisada. Estas permiten abordar los principales aspectos implicados en la evaluación de proyectos de energía eólica, incluyendo las condiciones ambientales del entorno y sus posibles impactos y beneficios asociados; el desempeño económico del proyecto; la aceptación social y las dinámicas de percepción e interacción con el territorio, incluyendo las oportunidades de desarrollo local y las condiciones de gobernanza y seguridad que enmarcan su viabilidad social; las condiciones técnicas y operativas; y las características de localización e infraestructura que inciden en su implementación.

Una vez definidas las dimensiones, los criterios identificados en la literatura fueron integrados dentro de cada una de ellas, procurando mantener la coherencia conceptual del marco frente a las diferencias observadas entre los enfoques revisados. Como resultado, se estructuraron 28 criterios de evaluación, los cuales se presentan en la Fig. 1.

B. Criterios operacionalizados

Como resultado de la operacionalización, cada criterio quedó definido en términos de su descripción contextual, unidad de medida y método de evaluación. Esta definición permitió precisar la forma en que cada criterio puede ser incorporado al proceso de evaluación y aplicado de manera consistente dentro del marco propuesto. A continuación, se presentan criterios representativos de cada dimensión.



Fig. 1. Criterios seleccionados

1) Dimensión ambiental

a) Nivel de ruido percibido: Corresponde al impacto acústico generado durante la operación de los aerogeneradores y a su posible incidencia sobre el área de influencia del proyecto [12]. Su consideración permite analizar los efectos potenciales del ruido sobre la fauna y las comunidades cercanas, dado que las emisiones sonoras asociadas a esta actividad pueden derivar en impactos tanto sociales como ambientales; además, permite establecer si los niveles estimados se ajustan a los límites permitidos en la regulación nacional vigente [13].

La evaluación del criterio se realiza mediante la estimación del nivel de presión sonora percibido en función de la potencia sonora del aerogenerador y de la distancia entre la fuente y el receptor. El resultado se expresa en decibelios (dB), conforme a la formulación propuesta en [12]. El cálculo se expresa como:

$$L_p = L_w - 10Log_{10}(2\pi R^2) - \alpha R \quad (1)$$

Donde:

$$R^2 = H^2 + X^2 \quad (2)$$

En (1), L_p corresponde al nivel de presión sonora percibido en el punto receptor, L_w al nivel de potencia sonora en la fuente, R a la distancia efectiva entre el aerogenerador y el receptor y α al coeficiente de absorción atmosférica del sonido, cuyo valor corresponde a 0.005 dB/m para una frecuencia de 1000 Hz. Asimismo, en (2), H corresponde a la altura de la torre y X a la distancia horizontal del observador respecto al aerogenerador [12].

b) Reducción de emisiones de dióxido de carbono: Representa el beneficio ambiental que aporta la energía eólica al disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO_2). Este criterio evalúa el potencial del proyecto para sustituir fuentes energéticas basadas en combustibles fósiles y, en consecuencia, reducir las emisiones asociadas a la generación eléctrica [14], [15]. En este sentido, en zonas con mayores niveles de CO_2, los parques eólicos pueden adquirir mayor relevancia ambiental, debido a que su operación contribuye a reducir dichas emisiones [14].

La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero se estima a partir de la diferencia entre el factor de emisión de la red eléctrica y el factor de emisión de la tecnología eólica, considerando la electricidad disponible para exportación a la red y las pérdidas de transmisión y distribución [15]. El resultado se expresa en toneladas de dióxido de carbono (tCO_2) y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$GHG_{red} = (E_g - E_w)E_{grid}(1 - \beta_p) \quad (3)$$

Donde GHG_{red} corresponde a la reducción anual de emisiones de gases de efecto invernadero, E_g es el factor de emisión de la red eléctrica, E_w es el factor de emisión de la tecnología eólica, E_{grid} corresponde a la electricidad disponible para exportación a la red y β_p representa las pérdidas de transmisión y distribución [15].

2) Dimensión económica

a) Costo nivelado de la generación de electricidad (LCOE): Representa el costo por unidad de electricidad generada, considerando todos los gastos asociados al proyecto durante su vida útil, como la inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento y otros costos recurrentes [16]. Es considerado uno de los indicadores económicos más utilizados en los estudios de viabilidad [17]. Esta medida permite comparar distintas tecnologías de generación bajo una misma base al reflejar el costo promedio de producir electricidad de manera consistente a lo largo del tiempo.

La evaluación del criterio se realiza mediante la relación entre los costos descontados del proyecto y la energía generada durante el horizonte de análisis [18]. El cálculo se expresa en

dólares por megavatio-hora (USD/MWh) y se determina mediante la siguiente expresión:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{T}(I_t + O_t + M_t)/(1+r)^t}{\sum_{t=0}^{T} E_t/(1+r)^t} \quad (4)$$

Donde $LCOE$ corresponde al costo nivelado de energía, I_t representa los costos de inversión en el periodo t, O_t los costos de operación en el periodo t, M_t los costos de mantenimiento en el periodo t, E_t la energía generada en el periodo t, r la tasa de descuento y T el horizonte temporal de evaluación del proyecto [18].

b) Periodo de recuperación dinámico (DPBP): Corresponde a una medida económica orientada a analizar el retorno temporal de la inversión, incorporando el valor del dinero en el tiempo a través de los flujos de caja descontados [19]. En la evaluación económica, este criterio permite analizar la rapidez con la que el proyecto retorna la inversión realizada y complementa otros indicadores financieros al aportar una medida temporal del desempeño esperado.

La evaluación del criterio se realiza mediante el tiempo necesario para que el valor acumulado de los flujos de caja netos descontados sea equivalente a la inversión inicial del proyecto [19]. El resultado se expresa en años y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sum_{t=1}^{DPBP} \frac{FCN_t}{(1+r)^t} = C_0 \quad (5)$$

Donde $DPBP$ corresponde al tiempo requerido para recuperar la inversión inicial del proyecto mediante los flujos de caja netos descontados, FCN_t representa el flujo de caja neto en el periodo t, r la tasa de descuento y C_0 la inversión inicial del proyecto [19].

3) Dimensión social

a) Distancia a zonas urbanas: Corresponde a la proximidad entre el proyecto y las áreas urbanas o residenciales, y permite considerar la posible exposición de la población cercana a impactos asociados con su desarrollo y operación. Una menor distancia respecto a estas zonas puede aumentar la exposición a efectos como la intrusión visual, la alteración en la percepción del paisaje y los conflictos por el uso del suelo [20], [21]. Por ello, este criterio contribuye a orientar la identificación de localizaciones que reduzcan potenciales conflictos sociales asociados a la cercanía con zonas habitadas.

La evaluación del criterio se realiza a partir de la proximidad entre el área prevista para el parque eólico y las zonas urbanas o residenciales. El resultado se expresa en kilómetros (km) y se clasifica mediante rangos de idoneidad, en los que una mayor distancia se asocia con mejores condiciones para evitar posibles afectaciones sobre la población cercana. La escala de clasificación asigna valores entre 1 y 5, donde 1 corresponde a la condición de mayor idoneidad y 5 a la de menor idoneidad para la localización del proyecto [20]. La clasificación utilizada se presenta en la Tabla I.

TABLA I.
CLASIFICACIÓN DE LA DISTANCIA A ZONAS URBANAS

Clase de idoneidad	Distancia a zonas urbanas (km)
No adecuado (5)	< 10
Menos adecuado (4)	10 - 20
Moderadamente adecuado (3)	20 - 30
Adecuado (2)	30 - 40
Altamente adecuado (1)	> 40

Fuente: Adaptado de [20]

b) Nivel de riesgo de los grupos armados: Corresponde a las condiciones de seguridad del territorio asociadas con la actividad de actores armados ilegales y la capacidad de control institucional en el área de influencia del proyecto. En la evaluación de proyectos de energía, este aspecto resulta relevante debido a que contextos con mayores niveles de conflictividad pueden generar limitaciones operativas, riesgos para el personal y dificultades para el desarrollo continuo de las actividades del proyecto. Asimismo, antecedentes reportados en Colombia evidencian que este tipo de condiciones puede afectar la estabilidad de infraestructura eléctrica [22].

La evaluación del criterio se realiza mediante la clasificación del riesgo asociado a la presencia de grupos armados ilegales y a la existencia de supervisión institucional o militar en el territorio. Esta clasificación diferencia las zonas según su nivel de restricción para el desarrollo del proyecto y asigna valores entre 1 y 3, correspondientes de menor a mayor nivel de riesgo. Así, las áreas sin presencia de grupos armados presentan condiciones más favorables, mientras que aquellas con presencia activa de estos actores implican mayores limitaciones para su implementación [22]. La clasificación utilizada se presenta en la Tabla II.

TABLA II.
CLASIFICACIÓN DEL RIESGO DE GRUPOS ARMADOS

Nivel de riesgo	Condición del territorio
Bajo (1)	Ausencia de grupos armados ilegales
Alto (2)	Presencia simultánea de grupos armados y supervisión militar
Extremo (3)	Presencia de grupos armados sin supervisión militar

Fuente: Adaptado de [22]

4) Dimensión técnica

a) Velocidad del viento: Corresponde a la velocidad promedio del recurso eólico en el área de interés. En proyectos de energía eólica, este criterio es fundamental porque incide directamente en el potencial de generación eléctrica y en la viabilidad técnica del emplazamiento. Por ello, las zonas con mayores velocidades promedio del viento presentan mejores condiciones para el aprovechamiento energético del recurso [23].

La velocidad del viento se evalúa a partir de la velocidad promedio del recurso eólico en el área prevista para el proyecto.

El resultado se expresa en metros por segundo (m/s) y se clasifica mediante rangos de idoneidad, en los que una mayor velocidad promedio se asocia con mejores condiciones técnicas para el aprovechamiento energético del recurso [23]. La escala de clasificación asigna valores entre 1 y 5, donde 1 corresponde a la condición de mayor idoneidad y 5 a la de menor idoneidad para la localización del proyecto. La clasificación utilizada se presenta en la Tabla III.

TABLA III.
CLASIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Clase de idoneidad	Velocidad del viento (m/s)
No adecuado (5)	4 - 4.5
Menos adecuado (4)	4.5 - 5
Moderadamente adecuado (3)	5 - 5.5
Adecuado (2)	5.5 - 6
Altamente adecuado (1)	>6

Fuente: Adaptado de [23]

b) Rugosidad topográfica: Corresponde a las características del relieve que pueden influir en el comportamiento del recurso eólico en el área de interés. En terrenos con mayor irregularidad topográfica, la circulación del viento puede presentar variaciones y turbulencias que afectan su velocidad, estabilidad y aprovechamiento energético. Por ello, este criterio es considerado en la selección de emplazamientos para proyectos de energía eólica, debido a su incidencia sobre las condiciones de operación y el desempeño del recurso eólico [24], [25].

La rugosidad topográfica se calcula mediante el índice de rugosidad topográfica (TRI), obtenido a partir de las diferencias de elevación entre una celda central y sus celdas vecinas en una ventana móvil de 3×3, sobre un Modelo de Elevación Digital (DEM) o un Modelo Digital de Superficie (DSM). El resultado se expresa en unidades de elevación, donde valores más altos del índice representan una mayor irregularidad topográfica del terreno [24]. El cálculo se expresa mediante la siguiente expresión:

$$TRI = \sqrt{\sum(x_{ij} - x_{00})^2} \quad (6)$$

Donde TRI corresponde al índice de rugosidad topográfica, x_{ij} representa la elevación de cada celda vecina y x_{00} la elevación de la celda central [24].

5) Dimensión geoespacial

a) Distancia a las líneas de transmisión y centrales eléctricas: Corresponde a la proximidad del área prevista para el proyecto respecto a la infraestructura eléctrica existente, particularmente líneas de transmisión y centrales eléctricas. Este criterio permite considerar las condiciones de accesibilidad eléctrica del proyecto, dado que una menor distancia puede facilitar su conexión al sistema eléctrico, reducir pérdidas asociadas al transporte de energía y disminuir los requerimientos de infraestructura eléctrica adicional [20].

La distancia a infraestructura eléctrica se evalúa a partir de la distancia entre el área prevista para el parque eólico y la línea de transmisión o central eléctrica más cercana. El resultado se expresa en kilómetros (km) y se clasifica mediante rangos de idoneidad, en los que una menor distancia se asocia con mejores condiciones para la localización del proyecto [23]. La escala asigna valores entre 1 y 5, donde 1 corresponde a la condición de mayor idoneidad y 5 a la de menor idoneidad. La clasificación utilizada se presenta en la Tabla IV.

TABLA IV.
CLASIFICACIÓN DE LA DISTANCIA A LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y CENTRALES ELÉCTRICAS

Clase de idoneidad	Distancia a líneas de transmisión y centrales eléctricas (km)
No adecuado (5)	> 40
Menos adecuado (4)	30 - 40
Moderadamente adecuado (3)	20 - 30
Adecuado (2)	10 - 20
Altamente adecuado (1)	< 10

Fuente: Adaptado de [20]

C. *Fuentes de información*

A partir de la revisión de los casos de estudio aplicados al contexto nacional, se identificaron y recopilaron las fuentes de información requeridas para la aplicación de los criterios operacionalizados en proyectos de energía eólica. Esta fase permitió reconocer entidades y repositorios nacionales relevantes, como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), Datos Abiertos Colombia, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), a partir de los cuales se descargaron datos asociados con variables geoespaciales, técnicas, sociales, ambientales y de infraestructura eléctrica.

Asimismo, para la dimensión económica se identificaron informes, bases de datos y aplicativos web que permitieron recopilar información sobre los costos de inversión, los costos de operación y mantenimiento, la tasa de descuento y otros parámetros financieros requeridos para la evaluación de proyectos de energía eólica en el país. De esta manera, los criterios operacionalizados quedaron articulados con los insumos de información necesarios para su aplicación en distintos procesos de evaluación, fortaleciendo la utilidad práctica del marco conceptual propuesto.

IV. CONCLUSIONES

La investigación contribuye a la evaluación integral de proyectos de energía eólica en Colombia al consolidar una estructura de criterios que permite analizar, de forma articulada, los factores ambientales, económicos, sociales, técnicos y geoespaciales que inciden en su viabilidad. Este resultado evidencia la importancia de abordar estos proyectos desde una perspectiva multidimensional, especialmente en un contexto donde la toma de decisiones requiere información comparable, organizada y aplicable.

El principal hallazgo del estudio radica en que la operacionalización de los criterios permite pasar de una identificación general de factores de evaluación a una base más precisa para su aplicación, al definir una forma de medición estandarizada que facilita su incorporación en futuros análisis. Esto fortalece la consistencia de los procesos de evaluación y favorece la comparación entre distintos estudios o alternativas de localización.

En este sentido, el marco propuesto constituye una herramienta valiosa para investigadores, planificadores y tomadores de decisiones, al ofrecer una base estructurada que contribuye a orientar la evaluación de proyectos de energía eólica y a apoyar decisiones estratégicas asociadas con la transición energética sostenible en Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Proyecto de Investigación "Fortalecimiento de las capacidades nacionales para el aprovechamiento de Fuentes No Convencionales de Energía - FNCE, mediante el desarrollo y uso de una plataforma tecnológica multicriterio que favorezca una transición energética justa", con código 1210-951-110321, financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) del Gobierno de Colombia a través de la convocatoria "951-2024 Convocatoria Fortalecimiento del Conocimiento Geocientífico y Tecnológico de las Fuentes No Convencionales de Energía y la Captura, Almacenamiento y Uso de CO2" con contrato No. 049-2025.

REFERENCIAS

[1] S. Bakhsh, W. Zhang, K. Ali, and M. Anas, "Energy transition and environmental stability prospects for OECD economies: The prominence role of environmental governance, and economic complexity: Does the geopolitical risk matter?," J. Environ. Manage., vol. 354, p. 120358, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2024.120358.

[2] O. Churio-Silvera, M. Vanegas-Chamorro, and P. B. Zarante, "Status of Non-Conventional Sources of Energy in Colombia: A Look at the Challenges and Opportunities of the Electric Sector," *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 11, no. 44, p. 2163, 2018, doi: 10.12988/ces.2018.85221.

[3] J. C. González-Madrid, L. G. Marín, K. Chamorro-Cáceres, A. Navas, and J. Vuelvas, "Energy Management System for microgrid operation with green hydrogen storage in the Colombian electricity sector," *J. Energy Storage*, vol. 152, p. 120224, Mar. 2026, doi: 10.1016/J.EST.2025.120224.

[4] W. A. Ñustes-Cuellar and S. R. Rivera-Rodriguez, "Colombia: Territorio de inversión en fuentes no convencionales de energía renovable para la generación eléctrica," *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 17, no. 1, pp. 37–48, Jan. 2017, doi: 10.19053/1900771x.v17.n1.2017.5954.

[5] M. Ahmad, T. Peng, A. Awan, and Z. Ahmed, "Policy framework considering resource curse, renewable energy transition, and institutional issues: Fostering sustainable development and sustainable natural resource consumption practices," *Resources Policy*, vol. 86, p. 104173, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2023.104173.

[6] M. Colla, A. Ioannou, and G. Falcone, "Critical review of competitiveness indicators for energy projects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 125, p. 109794, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109794.

[7] A. Seetharaman, L. L. Sandanaraj, M. K. Moorthy, and A. S. Saravanan, "Enterprise framework for renewable energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 1368–1381, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.10.127.

[8] A. G. Abdullah, H. P. Utami, B. Gunawan, B. M. Ratmono, and N. T. Pasaribu, "Multi-criteria decision-making for wind power project feasibility: Trends, techniques, and future directions," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 27, p. 100987, Jul. 2025, doi: 10.1016/J.CLET.2025.100987.

[9] Z. Y. I. Abba, N. Balta-Ozkan, and P. Hart, "A holistic risk management framework for renewable energy investments," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 160, May 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112305.

[10] T. Tsani, J. M. Weinand, J. Linßen, and D. Stolten, "Quantifying social factors for onshore wind planning – A systematic review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 203, p. 114762, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.RSER.2024.114762.

[11] G. Gamboa and G. Munda, "The problem of windfarm location: A social multi-criteria evaluation framework," *Energy Policy*, vol. 35, no. 3, pp. 1564–1583, Mar. 2007, doi: 10.1016/J.ENPOL.2006.04.021.

[12] R. Van Haaren and V. Fthenakis, "GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State," 2011, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2011.04.010.

[13] S. Das Karmakar and H. Chattopadhyay, "A comprehensive look into the sustainability of wind power," Jul. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2025.115694.

[14] S. S. Hosseini Dehshiri and B. Firoozabadi, "Comprehensive framework on wind energy: A sustainable site selection under uncertainty and reliability, layout optimization and 7E analysis," *Appl. Energy*, vol. 373, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123937.

[15] F. Odoi-Yorke, T. F. Adu, B. C. Ampimah, and L. Atepor, "Techno-economic assessment of a utility-scale wind power plant in Ghana," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 18, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100375.

[16] M. R. Elkadeem, A. Younes, S. W. Sharshir, P. E. Campana, and S. Wang, "Sustainable siting and design optimization of hybrid renewable energy system: A geospatial multi-criteria analysis," *Appl. Energy*, vol. 295, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117071.

[17] A. Mostafaeipour *et al.*, "A thorough analysis of renewable hydrogen projects development in Uzbekistan using MCDM methods," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 61, pp. 31174–31190, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.046.

[18] E. Ángel-Sanint, S. García-Orrego, and S. Ortega, "Refining wind and solar potential maps through spatial multicriteria assessment. Case study: Colombia," *Energy for Sustainable Development*, vol. 73, pp. 152–164, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.esd.2023.01.019.

[19] C. Wang, J. Shuai, L. Ding, Y. Lu, and J. Chen, "Comprehensive benefit evaluation of solar PV projects based on multi-criteria decision grey relation projection method: Evidence from 5 counties in China," *Energy*, vol. 238, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.121654.

[20] S. K. Saraswat, A. K. Digalwar, S. S. Yadav, and G. Kumar, "MCDM and GIS based modelling technique for assessment of solar and wind farm locations in India," *Renew. Energy*, vol. 169, pp. 865–884, May 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.01.056.

[21] G. Villacreses, J. Martínez-Gómez, D. Jijón, and M. Cordovez, "Geolocation of photovoltaic farms using Geographic Information Systems (GIS) with Multiple-criteria decision-making (MCDM) methods: Case of the Ecuadorian energy regulation," Nov. 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.egyr.2022.02.152.

[22] S. Bernal-del Río, C. Luján, S. Ferrer, R. Mereu, and G. Osorio-Gómez, "GIS-based approach including social considerations for identifying locations for solar and wind power plants," *Energy for Sustainable Development*, vol. 84, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.esd.2024.101602.

[23] M. R. Elkadeem *et al.*, "Geospatial-assisted multi-criterion analysis of solar and wind power geographical-technical-economic potential assessment," *Appl. Energy*, vol. 322, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119532.

[24] H. Alphan, "Incorporating visibility information into multi-criteria decision making (MCDM) for wind turbine deployment," *Appl. Energy*, vol. 353, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122164.

[25] G. Rediske, H. P. Burin, P. D. Rigo, C. B. Rosa, L. Michels, and J. C. M. Siluk, "Wind power plant site selection: A systematic review," Sep. 01, 2021, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2021.111293

Assessment of the Energy Potential of Thermoelectric Generators Derived From Temperature Gradients

Andrés Felipe Sánchez Prisco
Grupo Manejo Eficiente de la Energía
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
afelipe.sanchez@udea.edu.co

Daniel Andres Ortiz Botina
Grupo Manejo Eficiente de la Energía
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
daniel.ortiz5@udea.edu.co

Stiven David García Aristizábal
Grupo Manejo Eficiente de la Energía
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
stiven.garcia2@udea.edu.co

John Anderson Gómez Múnera
Grupo Manejo Eficiente de la Energía
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
janderson.gomez@udea.edu.co

Juan B. Cano Quintero
Grupo Manejo Eficiente de la Energía
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
bernardo.cano@udea.edu.co

Esteban Velilla Hernández
Grupo Manejo Eficiente de la Energía
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
esteban.velilla@udea.edu.co

***Abstract*—The use of temperature gradients induced by solar radiation on metallic surfaces or photovoltaic panels represents a viable energy harvesting alternative through thermoelectric generators (TEGs). This paper evaluates the energy harvesting potential of a TEG-based outdoor system by combining thermal concentration; moreover, the design and experimental setup of a system for direct electrical characterization. The proposed platform composed of two main components: (i) a solar radiation capture device to generate temperature differences (ΔT), and (ii) an electronic system for TEG characterization based on current–voltage (I–V) curve tracing.**

The thermal capture device consists of a concave aluminum plate designed to enhance solar heat concentration on one side of the TEG, while the opposite side is coupled to a heat sink structure to promote heat dissipation and maintain a temperature gradient across the module. This configuration enables effective electrical energy generation.

For system characterization, dedicated electronic prototypes were developed to obtain I–V and power–voltage (P–V) curves under varying operating conditions, recording simultaneously the temperatures of both sides of TEG and weather data (ambient temperature and irradiance). These results allow the estimation of maximum power output and generated electrical energy as a function of weather conditions.

Finally, the relationship between available thermal energy, derived from the temperature gradient, and the produced energy is analyzed to assess system performance. The proposed approach demonstrates potential for powering low-consumption devices such as wireless sensor networks and IoT systems, reducing reliance on conventional batteries.

***Index Terms*—Energy harvesting, thermoelectric generator, energy potential, supercapacitor, energy management.**

I. Introduction

The increasing global demand for energy and the need to reduce dependence on fossil fuels have intensified interest in energy harvesting technologies, which capture small amounts of energy from the environment to power autonomous devices [1]. Among the available alternatives, thermoelectric generators (TEGs) are particularly attractive because they convert a temperature difference directly into electrical energy through the Seebeck effect, without moving parts and with relatively simple integration requirements [2]. These features make TEGs suitable for low-power applications in which long-term autonomy is desirable, such as wireless sensor networks, industrial monitoring platforms, aerospace instrumentation, and Internet-of-Things (IoT) devices [3], [4].

The practical use of TEGs depends not only on the existence of a thermal gradient, but also on the ability to characterize the electrical response of the module under realistic operating conditions. In this context, the analysis of current–voltage (I–V) and power–voltage (P–V) curves remains essential because it reveals the operating point at which the device delivers its maximum electrical power. Since the Seebeck coefficient and the internal resistance of the module vary with temperature, the generated power is strongly influenced by the thermal state of the device, and in the first approximation it scales with the square of the temperature difference [5]. Therefore, maintaining a sufficiently large and stable temperature gradient is a key requirement for improving the harvesting capability of TEG-based systems.

Recent studies have explored hybrid configurations in which TEGs are combined with other energy technologies, particularly photovoltaic–thermoelectric (PV–TEG) systems. In these arrangements, thermoelectric modules recover part of the heat accumulated in photovoltaic panels and convert it into additional electrical power, while also contributing to thermal management of the panel [6], [7]. Thermoelectric systems have also been investigated in building envelopes, residual-heat recovery structures, and outdoor applications

with thermal buffering or phase-change materials to improve heat-flow management and increase the time during which useful temperature gradients are available [8], [9].

In recent literature, experimental analyses focused on low-cost commercial thermoelectric modules (TEMs) integrated into PV panels have gained significant attention due to their versatility in simultaneous thermal management and power generation. Furthermore, these hybrid systems have been shown to mitigate solar cell overheating, achieving temperature reductions of up to 3.2 °C on the panel surface. Additionally, when operating in TEG mode, these devices successfully harvest waste heat to deliver a power output of up to 1246 µW [10], [11].

Despite these advances, estimating the true electrical energy that can be harvested from a given thermal scenario remains challenging. Full electrical characterization requires dedicated instrumentation, whereas preliminary field studies often rely only on temperature measurements. For this reason, there is value in establishing a practical relationship between thermal-gradient measurements and the electrical energy that a TEG can realistically produce. This relationship can simplify the evaluation of candidate surfaces and support the early-stage design of autonomous energy systems.

This paper presents an outdoor assessment of a TEG-based energy harvesting system composed of a solar-heated aluminum structure and an electronic platform for I–V curve tracing. The contribution of this work is twofold. First, it provides direct experimental characterization of TEG power and energy under outdoor exposure. Second, it proposes an empirical energy indicator based on the time integral of ΔT^2, enabling the estimation of electrical energy from temperature measurements alone. This methodology can be used to evaluate the harvesting potential of real surfaces, support the sizing of low-power autonomous devices, and provide a useful basis for future energy-management and control strategies [12], [13].

II. Thermoelectric Technologies

Thermoelectric technologies enable direct conversion between thermal and electrical energy through solid-state effects. In power-generation mode, the Seebeck effect produces a voltage when a temperature difference exists across the module; in cooling mode, the Peltier effect pumps heat when an electrical current is applied [14], [15]. A conventional thermoelectric module is built from multiple pairs of p-type and n-type semiconductor elements connected electrically in series and thermally in parallel. Because these devices contain no moving parts, they offer silent operation, high reliability, and long service life [16].

Although the conversion efficiency of thermoelectric devices is usually limited, often remaining in the range of approximately 5% to 7%, TEGs are still valuable in applications where the energy source would otherwise be wasted, such as residual heat recovery or low-power ambient harvesting [3], [17]. In such cases, the simplicity and robustness of thermoelectric conversion compensate for the modest efficiency, especially when the target load is a low-power electronic device.

A. Electrical Model of the TEG

The equivalent circuit of a TEG module consists of a temperature-dependent voltage source in series with an internal resistance R_{TEG}, as shown in Fig. 1. Under open-circuit conditions, the output voltage is determined by the Seebeck coefficient and the temperature difference across the module.

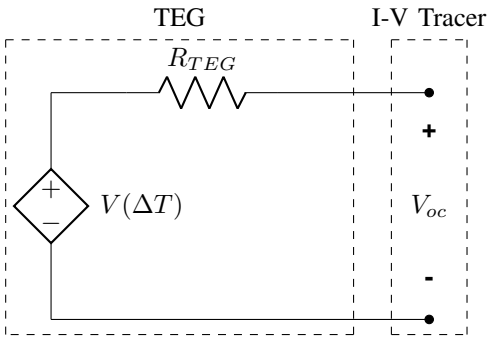


Fig. 1. Equivalent electrical model of the TEG and connection to the I–V tracer.

When a temperature gradient exists between the two sides of the TEG, a voltage appears across the output terminals due to the Seebeck effect and the open-circuit voltage can be expressed as

$$V_{oc} = \alpha \Delta T, \tag{1}$$

where V_{oc} is the open-circuit voltage, α is the Seebeck coefficient of the module, and ΔT is the temperature difference between the hot and cold sides. The temperature difference is defined as

$$\Delta T = T_{hot} - T_{cold}, \tag{2}$$

where T_{hot} is the temperature of the heated side and T_{cold} is the temperature of the cooled side.

If the TEG is connected to a load resistance R_{Load}, the electrical power delivered to the load is

$$P = V_{oc}^2 \frac{R_{Load}}{(R_{TEG} + R_{Load})^2}, \tag{3}$$

and, by substituting (1) into (3),

$$P_{elec} = \frac{\alpha^2 R_{Load} \Delta T^2}{(R_{TEG} + R_{Load})^2}. \tag{4}$$

Maximum power transfer occurs when $R_{Load} = R_{TEG}$. Under this condition, the maximum electrical power is given by [18]

$$P_{max} = \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{4 R_{TEG}}. \tag{5}$$

Equation (5) highlights the strong influence of the thermal gradient on the electrical response of the module. Even though α and R_{TEG} vary with temperature, the dominant effect in outdoor operation is usually the change in ΔT, which governs the main trend of the delivered power [1].

B. Energy potential of TEG

To quantify the electrical energy that can be harvested during outdoor operation, the maximum power is integrated over time. The resulting calculated energy is defined as

$$E_c = \int P_{max}\, dt, \tag{6}$$

which can be evaluated numerically from discrete measurements. In this work, the trapezoidal rule is adopted to estimate the accumulated energy from consecutive power samples,

$$E_d = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} [P_{max,i} + P_{max,i+1}] \cdot \Delta t, \tag{7}$$

where Δt is the sampling interval.

Beyond direct electrical characterization, it is useful to define a thermal indicator that can be obtained from temperature measurements alone. Since (5) shows that the maximum power is proportional to ΔT^2. According to [9], an empirical estimator of the thermal harvesting potential can be expressed as

$$E_e = \int \Delta T^2\, dt. \tag{8}$$

The quantity E_e is not electrical energy by itself; rather, it is an empirical indicator of thermal harvesting potential. Nevertheless, if a consistent relationship between E_e and the measured electrical energy is established experimentally, the indicator becomes a practical tool for assessing candidate surfaces, including cases in which temperature data are obtained from direct sensors or thermal images instead of a full electrical characterization system.

III. Energy Harvesting System Architecture

Figure 2 presents the experimental architecture used to estimate instantaneous power and harvested energy from outdoor temperature gradients. The platform combines the thermal structure, the TEG module, the temperature-acquisition subsystem, and the electronic I–V tracer in a synchronized measurement chain [19], [20].

The thermal structure is designed to increase the temperature difference across the thermoelectric module while reducing unwanted heat transfer between its two sides. Solar radiation heats a concave aluminum surface that concentrates thermal energy near the central region, where the hot side of the TEC-12706 module is installed. On the opposite side, an elongated aluminum dissipation structure and insulating foam promote heat rejection and help preserve the cold-side temperature. This arrangement increases the effective temperature gradient and therefore improves the electrical output predicted by (1) and (5).

The TEG output terminals are connected to an electronic analyzer that performs I–V sweeps and determines the corresponding P–V curves. A Raspberry Pi coordinates the acquisition process, stores the measurements locally, and supports data synchronization for remote access. The platform and

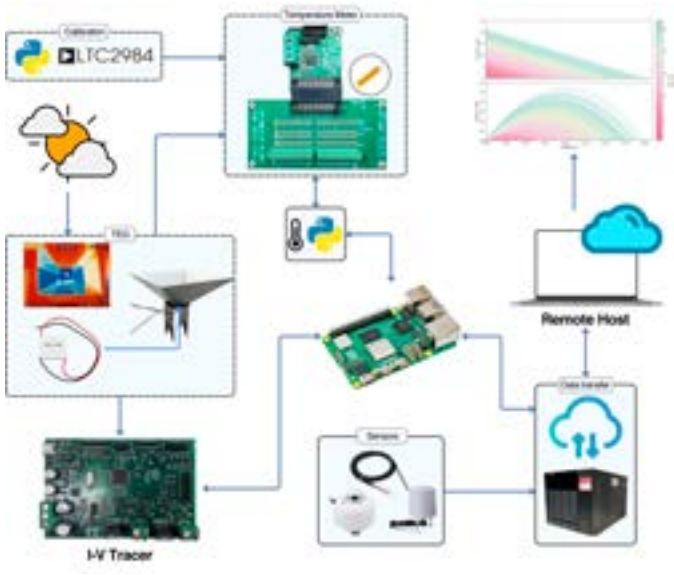


Fig. 2. System architecture for temperature acquisition, I–V tracing, synchronization, and remote data access.

methodology used for this data transfer are detailed in [21]. Temperature measurements are obtained with an Analog Devices acquisition board connected to four NTC sensors: two sensors are installed on the hot side and two on the cold side of the module to improve robustness and reduce the effect of local thermal nonuniformities. The sensors were configured and calibrated using the LTC2984 environment together with the corresponding Steinhart–Hart coefficients.

The platform is intended not only for direct electrical characterization, but also for preliminary energy assessment in scenarios where only thermal information is available. For that reason, the proposed methodology can be extended to surface studies based on contact sensors or thermal imaging, allowing the user to estimate the energy harvesting potential of a location before deploying a complete TEG characterization setup.



Fig. 3. Outdoor experimental setup.

IV. Results

The proposed aluminum thermal concentrator and the electronic TEG characterization platform were evaluated over a 60-day outdoor measurement campaign. The experimental setup, shown in Fig. 3, was deployed at the Laboratory Photovoltaic Station, located on the rooftop of the Sede de Investigación Universitaria (SIU) at the Universidad de Antioquia in Medellín [22]. Data were acquired at 1-min intervals, enabling the estimation of the instantaneous maximum power, the directly calculated electrical energy, and the empirical thermal-energy indicator defined in (8). The discussion in this section focuses on the representative study day of 2026-03-11, which is used to illustrate the relationship among irradiance, temperature gradient, power, and harvested energy.

A. Power Analysis

Figure 4 shows the maximum power obtained from the electrical characterization system together with the irradiance profile measured using the Hukseflux pyranometer and the ClimaVue40 weather station. As expected, the largest power values occur around midday, when solar irradiance is highest and the concave surface receives the strongest thermal loading. However, the power profile does not follow irradiance instantaneously because the thermal behavior of the structure exhibits inertia. Consequently, short-term cloud passages or abrupt weather changes do not produce an immediate proportional variation in electrical power.

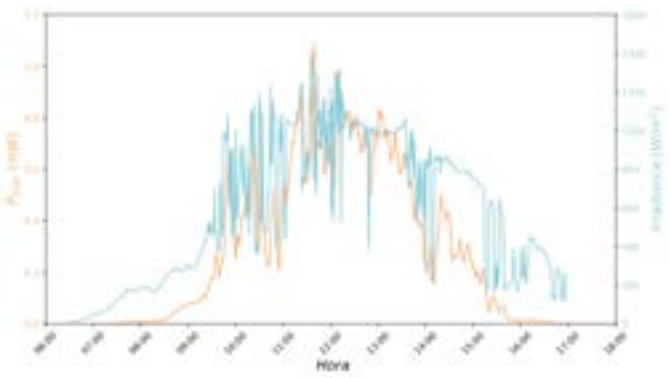


Fig. 4. Maximum power P_{max} and its relation to solar irradiance during outdoor operation.

Figure 5 confirms that the instantaneous power is strongly correlated with the temperature gradient. This observation is consistent with (5), which predicts a quadratic dependence on ΔT. Although both the Seebeck coefficient and the internal resistance vary with temperature, their changes are much smaller than the variation introduced by the thermal gradient itself, so the dominant shape of the power curve is governed by ΔT [1].

Temperature measurements used to compute ΔT are obtained from two sensors on each side of the module. Figure 6 compares the average hot-side temperature T_{hot}, the average cold-side temperature T_{cold}, and the resulting maximum power. The figure shows that power increases as the

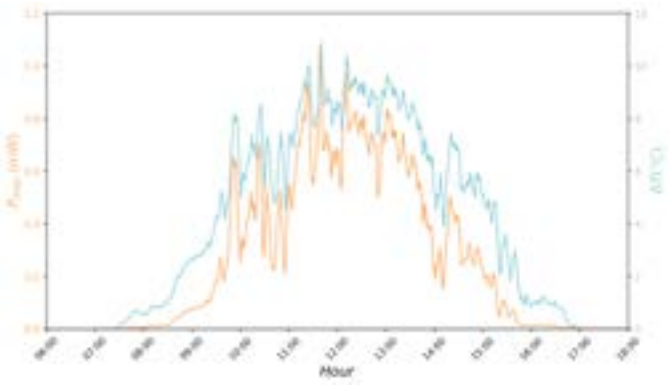


Fig. 5. Relationship between maximum power P_{max} and the temperature gradient ΔT.

separation between the two temperatures becomes larger, and then decreases toward the end of the day as both temperatures converge.

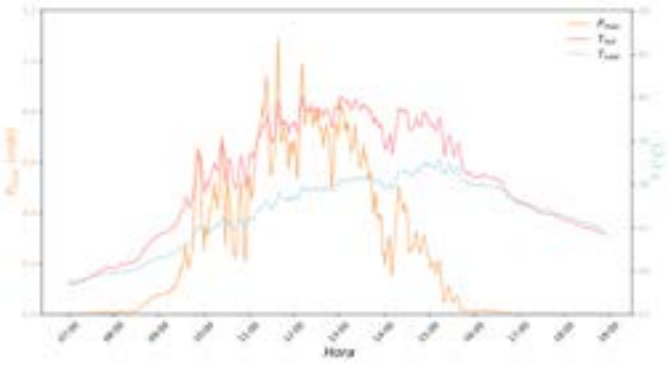


Fig. 6. Maximum power P_{max} compared with the temperatures measured on both sides of the TEG.

To provide additional context, Fig. 7 shows the distribution of temperature gradients over one week, including the representative analysis day. The combined box plot and density representation illustrates the variability of ΔT under outdoor conditions and helps position the selected day relative to the surrounding operating range.

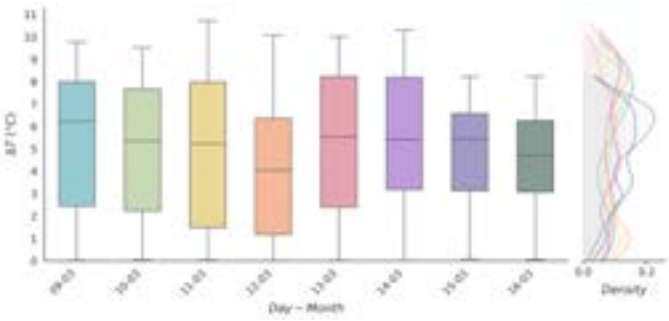


Fig. 7. Distribution of ΔT over several days and density profile for the representative day.

Figure 8 presents representative I–V and P–V curves ob-

tained with the developed tracer. The results are consistent with the equivalent circuit of Fig. 1: the maximum power point occurs approximately at half the open-circuit voltage, while lower temperature gradients lead to lower power levels across the full operating range.

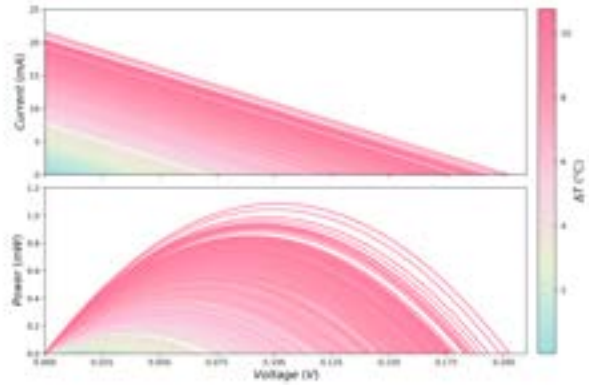


Fig. 8. Representative I–V and P–V curves obtained during the selected outdoor study day.

B. Potential Energy Analysis

The purpose of the energy analysis is to compare the electrical energy measured through direct characterization with the empirical thermal-energy indicator derived only from the temperature gradient. This comparison is relevant because it enables evaluation of the TEG harvesting potential in scenarios where a complete I–V tracing system is not available and only thermal measurements can be collected, for example from contact probes or infrared thermography.

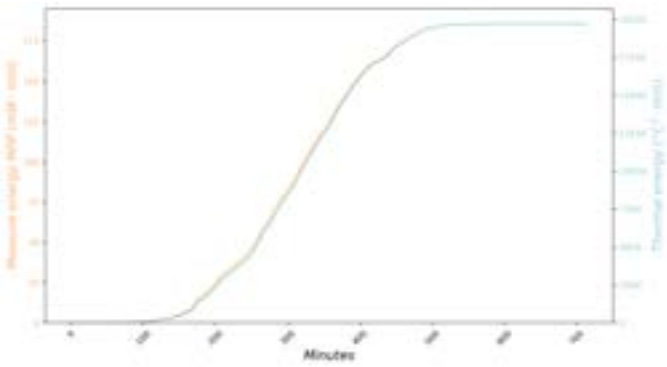


Fig. 9. Comparison between directly calculated electrical energy and the thermal potential indicator based on the temperature gradient.

Figure 9 compares the electrical energy measured on 2026-03-11 with the empirical estimate obtained from (8). Both curves exhibit similar temporal behavior, which indicates that the thermal indicator captures the main dynamics of the harvesting process. For the selected day, the measured energy is on the order of $\approx$ 180 mW $\cdot$ min, whereas the empirical thermal indicator reaches values on the order of $\approx$ 20,000 $^{\circ}\mathrm{C}^2 \cdot \mathrm{min}$. These quantities do not share the same physical units; however, (5) explains why a strong proportional relationship can still emerge after calibration.

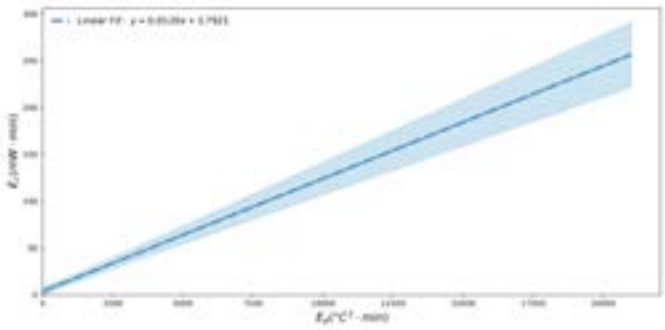


Fig. 10. Regression between the empirical thermal-energy indicator and the measured electrical energy.

Figure 10 shows the approximately linear relationship obtained when the analysis is extended to the 60-day dataset and average values are used to fit a simple model. The resulting regression is

$$E_f = 0.0120 \cdot E_e + 3.7921, \tag{9}$$

where E_f represents the estimated electrical energy associated with the TEG and E_e is the empirical thermal-energy indicator obtained from temperature measurements. This linear mapping provides a practical way to estimate the energy that a comparable TEG configuration can produce from thermal measurements alone.

Finally, Fig. 11 illustrates the comparison between measured electrical energy and estimated electrical energy after applying (9). The agreement supports the use of the proposed methodology as a first-stage assessment tool for outdoor thermoelectric harvesting, especially when the objective is to evaluate feasibility, compare candidate installation surfaces, or preliminarily size low-power loads.

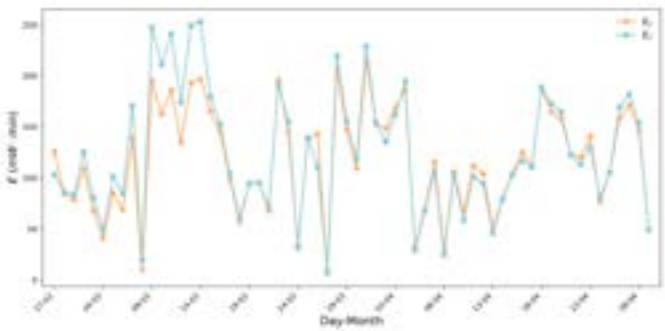


Fig. 11. Comparison between measured electrical energy and estimated electrical energy.

V. Conclusions

This work presented an outdoor evaluation of a thermoelectric energy harvesting system composed of a solar-heated

aluminum structure and an electronic platform for direct TEG characterization through I–V tracing. The results confirm that the proposed configuration can generate useful temperature gradients under real environmental conditions and that the resulting electrical response follows the expected dependence on irradiance and, more fundamentally, on the temperature difference across the module.

Experimental study also showed that the direct electrical energy obtained from the TEG can be related to an empirical thermal indicator based on the time integral of ΔT^2. This result is important because it enables practical estimation of electrical harvesting potential from temperature measurements alone, including measurements obtained with contact sensors or thermal imaging systems. As a result, the methodology can be used to evaluate candidate surfaces and outdoor scenarios before deploying a complete electrical characterization platform.

From an application perspective, the proposed approach is relevant for the design of low-power autonomous systems such as wireless sensor networks and IoT devices. Once the relationship between thermal measurements and electrical output is calibrated for a given structure and TEG module, it becomes possible to estimate the expected energy budget and to support the sizing of the harvesting stage for specific load requirements.

The results also highlight the importance of energy storage and ultra-low-power power-conditioning circuits in practical deployments. Because the harvested energy is intermittent and relatively small, supercapacitors or similar storage elements, together with low-consumption DC/DC conversion stages, are essential to accumulate energy and deliver it when the load requires operation. Future work may extend this methodology to arrays of TEG modules, alternative heat-spreading structures, and adaptive power-management strategies for fully autonomous outdoor sensing systems.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the project ”Development of an Energetically Autonomous Smart Agriculture Platform for Continuous Monitoring of Relevant Variables Aimed at Improving Productivity and Mitigating Environmental Impact in Horticultural Crops of Antioquia and Quindío” (code BPIN 2022000100012), and the project ”Plataforma de Hardware in the Loop para la Gestión Energética” (code 2024-76942), funded through the 2023-2024 call for proposals by UdeA.

REFERENCES

[1] A. F. S. Prisco, S. G. Aristizábal, J. A. G. Múnera, J. B. C. Quintero, and E. V. Hernández, “Development of a thermoelectric systems characterization device,” in *Proceedings of the XXIV Congreso de la Asociación Argentina de Control Automático (AADECA)*, (Córdoba, Argentina), 2025.

[2] M. A. Üstüner, H. Mamur, and S. TAŞKIN, “Modeling and validation of the thermoelectric generator with considering the change of the seebeck effect and internal resistance,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 30, no. 7, pp. 2688–2706, 2022.

[3] D. Samson, M. Kluge, T. Becker, and U. Schmid, “Wireless sensor node powered by aircraft specific thermoelectric energy harvesting,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 172, no. 1, pp. 240–244, 2011.

[4] G. Verma and V. Sharma, “A novel thermoelectric energy harvester for wireless sensor network application,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 3530–3538, 2018.

[5] W. C. Khang, S. A. Jumaat, M. A. Johar, and U. S. A. Bakar, “Development of prototype hybrid photovoltaic-thermoelectric (pv-teg) system,” in *2023 IEEE 3rd International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA)*, pp. 175–178, IEEE, 2023.

[6] W. Indrasari, Habiburosid, and R. Fahdiran, “Characterization of hybrid solar panel prototype using pv-teg module,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2169, p. 050005, AIP Publishing LLC, 2019.

[7] Y. Zhang and P. Gao, “Hybrid photovoltaic/thermoelectric systems for round-the-clock energy harvesting,” *Molecules*, vol. 27, no. 21, p. 7590, 2022.

[8] P. Piantanida, “Pv & peltier façade: preliminary experimental results,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 3477–3482, 2015.

[9] P. Carvalhaes-Dias, A. Cabot, and J. Siqueira Dias, “Evaluation of the thermoelectric energy harvesting potential at different latitudes using solar flat panels systems with buried heat sink,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 12, p. 2641, 2018.

[10] S. Altınkök and A. Altınkök, “Experimental investigation and scaling of integrated pv-teg systems for thermal management and electrical power gain,” *Next Energy*, vol. 12, p. 100707, 2026.

[11] S. Altınkök, M. Altınay, and A. Altınkök, “Overcoming the efficiency dilemma in pv-teg hybrid systems: A multi-domain critical review and 4e roadmap for commercialization,” *Next Energy*, vol. 12, p. 100717, 2026.

[12] J. A. Gómez Múnera, P. S. Rivadeneira Paz, and V. Costanza, “A cost reduction procedure for control-restricted nonlinear systems,” *International Review of Automatic Control (IREACO)*, 2017.

[13] V. Costanza, P. S. Rivadeneira, and J. A. G. Múnera, “An efficient cost reduction procedure for bounded-control lqr problems,” *Computational and Applied Mathematics*, vol. 37, no. 2, pp. 1175–1196, 2018.

[14] O. Ando Jr, C. L. Izidoro, J. M. Gomes, J. H. Correia, J. P. Carmo, and L. Schaeffer, “Acquisition and monitoring system for teg characterization,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 3, p. 531516, 2015.

[15] M. A. Muñoz-García, G. Moreda, M. P. Raga-Arroyo, and O. Marín-González, “Water harvesting for young trees using peltier modules powered by photovoltaic solar energy,” *Computers and electronics in agriculture*, vol. 93, pp. 60–67, 2013.

[16] S. Sanaye, A. Shourabi, and D. Borzuei, “Sustainable water production with an innovative thermoelectric-based atmospheric water harvesting system,” *Energy Reports*, vol. 10, pp. 1339–1355, 2023.

[17] J.-D. Park, H. Lee, and M. Bond, “Uninterrupted thermoelectric energy harvesting using temperature-sensor-based maximum power point tracking system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 233–240, 2014.

[18] T. T. K. Tuoi, N. Van Toan, and T. Ono, “Thermal energy harvester using ambient temperature fluctuations for self-powered wireless IoT sensing systems: A review,” *Nano energy*, vol. 121, p. 109186, 2024. Publisher: Elsevier.

[19] S. R. Muñoz, A. F. S. Prisco, L. F. C. García, J. A. G. Múnera, S. G. Aristizábal, J. B. C. Quintero, and E. V. Hernández, “Implementation of iot curve tracer based on programmable electronic load using linear mosfet,” in *2025 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, pp. 1–6, IEEE, 2025.

[20] E. Velilla Hernández, J. B. Cano Quintero, J. F. Montoya, I. Mora-Seró, and F. Jaramillo Isaza, “Outdoor performance of perovskite photovoltaic technology,” in *Thin Films Photovoltaics*, IntechOpen, 2021.

[21] K. J. Restrepo, M. Á. M. Rodas, S. D. G. Aristizábal, L. F. C. García, A. L. Cardona, and E. V. Hernández, “Monitoring platform for pv devices considering iv curve and weather data,” in *2025 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, pp. 1–6, IEEE, 2025.

[22] C. Londoño, J. Cano, F. Jaramillo, J. Valencia, and E. Velilla, “Outdoor and synthetic performance data for pv devices concerning the weather conditions and capacitor values of iv tracer,” *Data in Brief*, vol. 47, p. 109007, 2023.

Producción de Biohidrógeno a partir de Lactosuero mediante Fermentación Oscura Asistida con Catalizadores Inorgánicos

Carlos Rincón
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
crincon91218@universidadean.edu.co

Paola Acevedo
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
paacevedo@universidadean.edu.co

Lina Chacón
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
lmchacon@universidadean.edu.co

Rommy Gómez
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
rgomezl16743@universidadean.edu.co

Erika Forero
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
eforero14857@universidadean.edu.co

Juan Gutiérrez
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
jgutier52779@universidadean.edu.co

Laura Caballero
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
lcaball85711@universidadean.edu.co

Sharmel Flor
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
sflorpe28078@universidadean.edu.co

Laura Rivera
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
lrivera53479@universidadean.edu.co

Roiberg Acosta
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
RACOSTA07335@universidadean.edu.co

Kimberly Tapiero
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
KTAPIER64415@universidadean.edu.co

María F Suárez
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
msuarez02699@universidadean.edu.co

Camilo Rodríguez
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
jrodrig76937@universidadean.edu.co

Federico López
Ingeniería Química
Universidad EAN
Bogotá, Colombia
felopez@universidadean.edu.co

Pablo Velázquez
Ingeniería Industrial
Universidad Cooperativa de Colombia
Bogotá, Colombia
pablo.velasquez@campusucc.edu.co

Iván Cabeza
Ingeniería Química
Universidad de la Sabana
Bogotá, Colombia
ivan.cabeza@unisabana.edu.co

***Abstract*— La valorización de residuos agroindustriales mediante procesos biotecnológicos ofrece una vía sostenible para la producción de energía limpia. En este trabajo se evaluó la producción de biohidrógeno a partir de lactosuero mediante fermentación oscura asistida con catalizadores inorgánicos. Se implementó un diseño experimental tipo Box-Behnken para analizar el efecto de la temperatura, la relación entre sustrato e inóculo, la carga orgánica y la concentración de catalizadores. Los resultados evidenciaron que el sulfato ferroso en concentraciones cercanas a 450 partes por millón incrementa la tasa de generación de hidrógeno y permite su producción desde el primer día de fermentación, incrementando la producción de biohidrógeno aproximadamente un 20 % respecto al sistema control. Las condiciones óptimas correspondieron a una temperatura de treinta y cinco grados Celsius, una relación sustrato/inóculo de cuatro y una carga orgánica de diez gramos de sólidos volátiles por litro. La validación en reactor piloto confirmó la reproducibilidad de la cinética y del rendimiento. Estos hallazgos demuestran que la incorporación de catalizadores basados en hierro constituye una estrategia prometedora para intensificar la producción de biohidrógeno a partir de lactosuero, con potencial de escalamiento en el contexto colombiano.**

Keywords— *Biohidrógeno, fermentación oscura, catalizadores inorgánicos.*

I. Introduction

El lactosuero, subproducto de la industria láctea, presenta una elevada carga orgánica, medida en términos de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO). Cuando se dispone inadecuadamente, contribuye de forma significativa a la eutrofización de cuerpos de agua y a la contaminación ambiental [1]. A nivel global, la industria láctea genera entre 3,5 y 4 millones de toneladas anuales de lactosuero, de las cuales menos del 40 % es aprovechado adecuadamente [2].

En el contexto colombiano, la producción de lactosuero está asociada principalmente a la elaboración de queso, generando volúmenes significativos de este residuo que, en muchos casos, es dispuesto sin tratamiento adecuado, lo que incrementa su impacto ambiental. Esta situación ha impulsado la búsqueda de alternativas tecnológicas orientadas a la valorización de subproductos agroindustriales, con el fin de reducir la carga contaminante y generar productos de valor agregado.

Dentro de estas alternativas, la fermentación oscura se ha consolidado como una biotecnología prometedora para la producción de biohidrógeno (H_2), al permitir la conversión anaerobia de carbohidratos sin requerir radiación lumínica [3]. Esta tecnología representa una opción sostenible tanto para la producción de energía renovable como para la mitigación de impactos ambientales asociados a residuos agroindustriales [4].

Diversos sustratos han sido evaluados para este proceso, incluyendo residuos de frutas, bagazo de caña, almidón, glicerol y estiércol [5], [6], mientras que el uso de lactosuero ha sido menos estudiado y aún presenta limitaciones en la optimización de condiciones operativas [7].

No obstante, uno de los principales desafíos de la fermentación oscura radica en su limitada eficiencia, atribuida a la acumulación de metabolitos intermedios, la competencia entre poblaciones microbianas y la desviación de rutas metabólicas que reducen la producción de hidrógeno [7]. En condiciones no optimizadas, el contenido de H_2 en el biogás puede ser inferior al 20 %, mientras que sistemas optimizados pueden alcanzar valores entre el 40 % y el 60 %.

En este contexto, el uso de catalizadores ha emergido como una estrategia efectiva para mejorar el rendimiento del proceso. Los catalizadores pueden modular las rutas metabólicas, incrementar la transferencia de electrones y favorecer la actividad de las hidrogenasas. En particular, los catalizadores inorgánicos como sales de hierro (Fe^{2+}/Fe^{3+}), óxidos metálicos (Fe_2O_3, TiO_2, NiO) y materiales carbonosos han demostrado incrementar la producción de hidrógeno entre un 20 % y un 100 % [8]. Asimismo, materiales soportados como el carbón activado pueden mejorar la interacción microbiana y la estabilidad del sistema [9].

A pesar de estos avances, aún existen limitaciones en la estandarización de condiciones operativas y en la optimización simultánea de variables como pH, temperatura, relación sustrato/inóculo (S/X) y concentración de catalizador, especialmente en sistemas que emplean lactosuero como sustrato. Esto evidencia la necesidad de aplicar metodologías experimentales robustas que permitan evaluar la interacción entre múltiples variables y maximizar la producción de biohidrógeno.

II. METODOLOGÍA

A. Diseño Experimental y Enfoque Metodológico

El presente estudio tuvo como objetivo optimizar la producción de biohidrógeno mediante el proceso de fermentación oscura a partir de lactosuero como sustrato, incorporando catalizadores inorgánicos como variables para mejorar el proceso. Para tal fin, se empleó un diseño experimental tipo Box-Behnken, el cual permite evaluar la interacción entre múltiples variables independientes para identificar las condiciones óptimas con un número reducido de experimentos. A continuación, en Tabla I se presentan los factores y niveles del diseño experimental.

TABLA I
FACTORES Y NIVELES DEL DISEÑO BOX-BEHNKEN

Factor	Variable	Nivel bajo (-1)	Nivel medio (0)	Nivel alto (+1)
A	Temperatura (°C)	30	32.5	35
B	Relación S/X	2	3	4
C	Carga orgánica (gSV/L)	10	15	20
D	Concentración $FeSO_4$ (ppm)	150	350	600

Se debe tener en cuenta que el diseño Box-Behnken es un método de superficie de respuesta (RSM) que se caracteriza por su eficiencia en la evaluación de efectos cuadráticos y de interacción, evitando combinaciones extremas de variables que podrían generar condiciones experimentales inviables [10]. Lo que lo hace adecuado para sistemas biotecnológicos complejos, donde los diferentes factores influyen significativamente en la respuesta del proceso.

En este estudio, el modelo permitió analizar la influencia de variables críticas como la temperatura, la carga orgánica, la relación sustrato/inóculo (S/X) y la concentración de catalizador sobre la producción de biohidrógeno, evaluada a partir del volumen de biogás obtenido y el porcentaje de H_2 presente en este gas, determinado con un equipo Nanosens DP28 que utiliza tecnología de Infrarrojo (NDIR) para realizar la detección.

B. Variables Experimentales

La selección de las variables experimentales se fundamenta en su influencia directa sobre la actividad metabólica de los consorcios microbianos, que, a su vez, afectan la producción del biohidrógeno en los procesos de fermentación oscura. Las variables propuestas, tienen influencia directa tanto en la cinética del proceso como en la estabilidad del sistema biológico, por lo que su adecuada optimización resulta esencial para maximizar el rendimiento de la producción de biohidrógeno.

En este estudio se evaluaron las siguientes variables independientes:

1. Temperatura

La temperatura es un parámetro clave que regula la actividad enzimática y la velocidad de crecimiento microbiano. En procesos de fermentación oscura, el rango mesofílico (30-40 °C) se utiliza ampliamente debido a su estabilidad operativa y menor requerimiento energético.

Temperaturas cercanas a 35 °C favorecen la actividad de las bacterias hidrogenogénicas especialmente del género Clostridium que promueven las rutas metabólicas asociadas a la producción de hidrógeno. Por el contrario, temperaturas bajas pueden reducir la velocidad de reacción y favorecer rutas metabólicas menos eficientes, mientras que temperaturas elevadas pueden generar estrés térmico a los microorganismos.[10]

2. Carga orgánica (10 y 20 gSV/L)

La carga orgánica, expresada en términos de sólidos volátiles (SV), representa la cantidad de materia orgánica biodegradable disponible para la fermentación. Este parámetro influye directamente en la producción potencial de biohidrógeno, ya que determina la disponibilidad de sustratos para los microorganismos.

Sin embargo, cargas orgánicas elevadas pueden provocar acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) y metabolitos intermedios como el lactato, generando inhibición del proceso y desviación metabólica hacia rutas no productoras de hidrógeno. Por el contrario, cargas bajas pueden limitar la productividad del sistema.[10].

La evaluación de 10 y 20 gSV/L permiten identificar un equilibrio entre disponibilidad sustrato y estabilidad metabólica del sistema.

3. Relación sustrato/inóculo (S/X = 2, 3 y 4)

La relación sustrato/inóculo (S/X) es un parámetro crítico que define el balance entre la cantidad de materia orgánica disponible y la biomasa activa en el sistema. Este balance influye en la dinámica microbiana, la velocidad de consumo del sustrato y la acumulación de productos intermedios.

Relaciones altas de S/X implican mayor disponibilidad sustrato por unidad biomasa, lo que puede aumentar la producción de hidrógeno, pero también incrementa el riesgo de acumulación de metabolitos inhibidores. Por lo otro lado, relaciones bajas favorecen una rápida adaptación microbiana, pero pueden reducir la productividad global [13].

La evaluación de valores entre 2 y 4 permite analizar el compromiso entre eficiencia de conversión y estabilidad del sistema fermentativo.

4. Tipo y concentración de catalizador

El tipo de catalizador influye directamente en la trasferencia de electrones y en la actividad enzimática de las hidrogenasas por tanto permite intensificar la reacción.

En este estudio se evaluaron inicialmente los siguientes compuestos inorgánicos como sistemas de catalizadores.

Sulfato ferroso ($FeSO_4$)
Cloruro férrico ($FeCl_3$)
Dióxido de titanio (TiO_2)
Carbón activado

El hierro (Fe^{2+}/Fe^{3+}) desempeña un papel fundamental como cofactor enzimático en las hidrogenasas, facilitando la producción de hidrógeno mediante la transferencia de electrones. Sin embargo, concentraciones elevadas pueden generar efectos tóxicos o precipitación de compuestos no deseados, afectando la actividad microbiana.

El TiO_2 y el carbono activado, por su parte, pueden actuar como soportes o facilitadores de transferencia electrónica, mejorando la interacción entre microorganismos y el sustrato.

La evaluación de diferentes tipos y concentraciones de catalizadores permite identificar condiciones óptimas que maximicen la producción de hidrógeno sin comprometer la estabilidad del sistema.

5. Variables de respuesta

Para evaluar el desempeño del proceso, se definieron las siguientes variables de respuesta:

Producción de biogás (mL): indicador de actividad fermentativa

Porcentaje de hidrógeno (% H_2): indicador de eficiencia del proceso

Tiempo de generación: asociado a la cinética del sistema

Estas variables permiten analizar tanto la productividad como la eficiencia del proceso de fermentación oscura bajo diferentes condiciones experimentales.

A continuación, en Tabla II se presentan las condiciones experimentales evaluadas.

TABLA II
RESUMEN DE CONDICIONES EXPERIMENTALES

Parámetro	Rango Evaluado	Observaciones
Temperatura	30–35 °C	Rango mesofílico
Carga orgánica	10–20 gSV/L	Evaluación de inhibición
Relación S/X	2–4	Balance sustrato/biomasa

Parámetro	Rango Evaluado	Observaciones
Catalizadores	$FeSO_4$, $FeCl_3$, TiO_2, carbón activado	Comparación de desempeño
$FeSO_4$	150–600 ppm	Evaluación de dosis óptima
pH	5.5–6.1	Control acidogénico
Tipo de reactor	Batch (200 mL) y piloto (4 L)	Escalamiento

C. Materiales: Sustrato e Inóculo

El sustrato utilizado en el proceso de fermentación oscura fue lactosuero proveniente de la industria láctea local, el cual se caracteriza por su alto contenido de materia orgánica, principalmente en forma de lactosa (aprox. 4.5–5 %), proteínas solubles y minerales. Este subproducto presenta una elevada demanda química de oxígeno (DQO), lo que lo convierte en un residuo con alto potencial para la producción de biohidrógeno mediante procesos biológicos anaerobios.

Antes de su uso, el lactosuero fue caracterizado en términos de sólidos volátiles (SV) y pH, presentando valores aproximados de 5.36 gSV/L y un rango de pH entre 4.3 y 4.8, lo cual indica la necesidad de ajuste de pH para favorecer condiciones óptimas de fermentación.

El inóculo empleado correspondió a un consorcio microbiano mixto proveniente de residuos orgánicos de origen agroindustrial, con un contenido aproximado de 3.7 gSV/L y un pH entre 8.0 y 8.5. Este tipo de inóculo contiene una diversidad de microorganismos anaerobios, incluyendo bacterias hidrogenogénicas, que permiten la conversión de compuestos orgánicos en biohidrógeno.

Con el fin de inhibir la actividad de microorganismos metanogénicos y favorecer la predominancia de bacterias productoras de hidrógeno, el inóculo fue sometido a un pretratamiento térmico a 85 °C durante 2 horas. Este procedimiento permite seleccionar microorganismos formadores de esporas, como especies del género Clostridium, que son clave en la producción de hidrógeno en fermentación oscura.

D. FASES EXPERIMENTALES

El desarrollo experimental se llevó a cabo en tres fases:

1. Fase de formulación en laboratorio

En esta fase se implementó el diseño experimental Box-Benhken propuesto. Para poder llevar a cabo la reacción de fermentación se utilizaron botellas tipo Schott de 250 mL, con un volumen de trabajo de 200 mL, operadas en condiciones anaerobias. Estos sistemas operan como reactores tipo batch, dentro de las condiciones operativas no se consideró la agitación, lo cual puede afectar la transferencia de masa, pero permite evaluar el comportamiento base del proceso en condiciones controladas.

2. Pretratamiento del inóculo.

Con el fin de favorecer la actividad de las bacterias hidrogénicas y limitar las metanogénicas, el inóculo fue sometido a un pretratamiento térmico a 85 °C durante 2 horas. Este procedimiento permite seleccionar microorganismos formadores de esporas, como especies del género *Clostridium*, que son responsables de la producción de hidrógeno.

3. Evaluación de los catalizadores

Se evaluó el efecto de diferentes catalizadores inorgánicos sobre la producción de hidrógeno. Particularmente, el sulfato ferroso ($FeSO_4$) fue analizado en diferentes concentraciones (150–600 ppm), debido a su papel como cofactor enzimático en las hidrogenas y la capacidad para mejorar la transferencia de electrones.

Adicionalmente, se analizaron combinaciones con TiO_2 y carbón activado, con el fin de evaluar posibles efectos sinérgicos en la actividad microbiana

4. Escalamiento reactor piloto

Las condiciones más favorables identificadas en la fase de laboratorio fueron evaluadas en un reactor piloto de 4 litros operado en modo semicontinuo, con agitación mecánica de 15 rpm y control de temperatura entre 30 y 35 °C.

El escalamiento permitió validar la reproducibilidad del proceso y analizar su comportamiento en condiciones más cercanas a una actividad industrial.

5. Medición y análisis del biogás

La producción de biogás se llevó a cabo mediante el desplazamiento volumétrico utilizando una bureta con solución alcalina, mientras que la composición del gas particularmente el porcentaje de hidrógeno fue determinado mediante un analizador especializado Nanosens DP-28

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Efecto del uso de catalizadores en la producción de biohidrógeno

Los resultados experimentales evidenciaron que la adición de catalizadores es un factor determinante en la producción de biohidrógeno a partir de lactosuero mediante fermentación oscura. En ausencia de catalizador, no se observó generación significativa de hidrógeno en los ensayos a escala laboratorio ni

en el reactor piloto, lo que confirma la limitación del sistema base y la necesidad de estrategias de intensificación del proceso.

En contraste, la incorporación de sulfato ferroso ($FeSO_4$) permitió alcanzar valores cercanos al 19 % v/v de H_2 en el biogás, particularmente en concentraciones de aproximadamente 450 ppm, evidenciando un incremento significativo en comparación con sistemas no catalizados, Fig. 1.

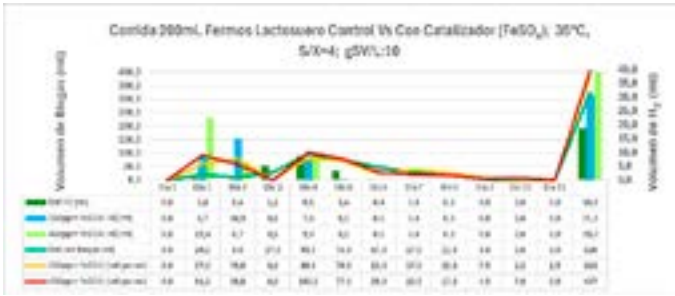


Fig. 1. Producción de biogás e hidrógeno en función del tiempo con y sin catalizador de $FeSO_4$

Este comportamiento puede explicarse por el papel del hierro como cofactor esencial en las enzimas hidrogenasas, las cuales catalizan la formación de hidrógeno molecular. Estudios previos han demostrado que la adición de iones Fe^{2+} mejora la transferencia de electrones en sistemas anaerobios, incrementando la actividad metabólica de bacterias hidrogenogénicas y favoreciendo rutas productoras de H_2 [14], [15].

Por otro lado, catalizadores como el carbón activado y el TiO_2 no mostraron mejoras significativas en el rendimiento bajo las condiciones evaluadas, e incluso introdujeron mayor variabilidad en los tiempos de generación de biogás. En el caso del carbón activado, se observó una prolongación del tiempo de retención hidráulica sin un aumento proporcional en la producción de hidrógeno, lo que sugiere limitaciones en su efectividad como facilitador de transferencia electrónica en este sistema específico.

B. Efecto de la temperatura

La temperatura mostró un impacto significativo en la producción de biohidrógeno, siendo 35 °C la condición más favorable en comparación con 30 °C, a 35 °C se observó una mayor actividad fermentativa y una producción más consistente de hidrógeno, mientras que a 30 °C se registraron episodios de baja o nula generación. Fig. 2.

TEMPERATURA (°C)	CATALIZADOR	CONCENTRACIÓN CATALIZADOR (ppm)	BIOGÁS (mL)	H_2 (%)	Tiempo de retención hidráulica (días)
35	Estándar	0	260	17	16
	Sulfato Ferroso	350	385	31,1	11
		450	407	39,0	11
30		250	147	13	11
		450	147	11,7	11

Fig. 2. Efecto de la temperatura sobre la producción de biohidrógeno empleando $FeSO_4$

Este comportamiento es consistente con la literatura, donde se reporta que el rango mesofílico (30–40 °C) favorece la actividad de bacterias hidrogenogénicas, particularmente del género Clostridium, las cuales presentan una mayor eficiencia metabólica en condiciones cercanas a 35 °C [16]. Temperaturas más bajas pueden ralentizar la actividad enzimática, mientras que temperaturas más altas pueden inducir estrés celular.

Desde una perspectiva operativa, el uso de 35 °C representa un compromiso adecuado entre rendimiento biológico y consumo energético, lo cual es relevante para aplicaciones a escala industrial.

C. Efecto de la carga orgánica

La evaluación de la carga orgánica mostró que valores de 10 gSV/L generaron mejores resultados en términos de producción de hidrógeno en comparación con 20 gSV/L. Aunque cargas más altas implican mayor disponibilidad de sustrato, también favorecen la acumulación de metabolitos intermedios como ácidos grasos volátiles y lactato, lo que puede inhibir la producción de hidrógeno.

En los ensayos con 20 gSV/L se observó una mayor actividad microbiana no selectiva, con comportamientos inconsistentes y desviaciones metabólicas que redujeron la eficiencia del proceso.

Estos resultados coinciden con estudios que indican que cargas orgánicas elevadas pueden generar inhibición por acumulación de productos, afectando la estabilidad del sistema fermentativo [17]. Por lo tanto, existe un punto óptimo de carga que maximiza la producción de H_2 sin comprometer la estabilidad del sistema.

D. Efecto de la relación sustrato/inóculo (S/X)

La relación sustrato/inóculo (S/X) mostró una influencia significativa en el rendimiento del proceso. Los mejores resultados se obtuvieron con una relación S/X = 4, lo que indica que una mayor disponibilidad de sustrato por unidad de biomasa favorece la producción de hidrógeno.

Sin embargo, este efecto debe interpretarse cuidadosamente, ya que relaciones elevadas pueden también incrementar el riesgo de acumulación de metabolitos inhibidores. En este caso, la combinación de S/X = 4 con una carga orgánica moderada (10 gSV/L) permitió mantener un

equilibrio adecuado entre disponibilidad de sustrato y estabilidad microbiana.

La literatura respalda estos hallazgos, indicando que la optimización de la relación S/X es fundamental para evitar limitaciones por sustrato o inhibición por sobrecarga orgánica [18].

E. Optimización del sistema y condiciones óptimas

A partir del análisis conjunto de las variables evaluadas, se identificaron las condiciones óptimas para la producción de biohidrógeno, correspondientes a un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 11 días y una carga orgánica de 10 gSV/L. Bajo estas condiciones, la adición de sulfato ferroso ($FeSO_4$) mostró un efecto significativo sobre la producción de hidrógeno, particularmente a concentraciones de 450 ppm, como se presenta en la Tabla III

TABLA III. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE $FeSO_4$ SOBRE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A 35 °C

	Control	**$FeSO_4$**	
		150 ppm	***450 ppm***
Biogás (mL)	326	178	407
H_2 (mL)	18	6.6	39
TRH (días)	11	11	11

Bajo estas condiciones, se alcanzó una fracción de H_2 en el biogás cercana al 19 %, lo que representa una mejora significativa frente a sistemas sin catalizador. Sin embargo, estos valores aún se encuentran por debajo de los reportados en la literatura para sistemas altamente optimizados donde se alcanzan fracciones entre 40 % y el 60 % de H_2, lo que indica que existen oportunidades de mejora relacionadas con el control microbiológico, la eliminación de bacterias ácido-lácticas y la optimización del pH y la cinética del proceso.

F. Comparación con la literatura y análisis crítico

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios que reportan incrementos en la producción de hidrógeno mediante el uso de catalizadores basados en hierro. Wang y Wan [15] demostraron que la adición de iones Fe^{2+} en sistemas anaerobios favorecen la actividad metabólica de los microorganismos hidrogenogénicos, incrementando significativamente la producción de hidrógeno. De manera similar, Lin et al. [14] evidenciaron que el empleo de materiales basados en hierro mejora la transferencia de electrones y la eficiencia del proceso fermentativo, contribuyendo al aumento del rendimiento de H_2. Estos antecedentes respaldan los resultados obtenidos en el presente estudio, donde la adición de sulfato ferroso ($FeSO_4$) permitió mejorar la producción de biohidrógeno respecto al sistema sin catalizador.

Sin embargo, la diferencia entre los resultados experimentales (aproximadamente 19 % H_2) y los valores reportados en sistemas optimizados sugiere que el sistema aún presenta limitaciones, posiblemente asociadas a:

- Competencia microbiana (bacterias ácido-lácticas)
- Acumulación de lactato
- Limitaciones de transferencia de masa (reactores batch sin agitación)

Esto resalta la importancia de integrar estrategias adicionales, como el control del pH, la selección de inóculos y la optimización de condiciones operativas, para mejorar el rendimiento del proceso.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar la viabilidad de producir biohidrógeno a partir de lactosuero mediante fermentación oscura, incorporando catalizadores inorgánicos como estrategia para la intensificación del proceso. Los resultados evidencian que el sistema base sin catalizador presenta limitaciones significativas, ya que no se observó generación apreciable de hidrógeno en estas condiciones, lo que resalta la necesidad de utilizar en el proceso agentes catalíticos.

El uso de sulfato ferroso ($FeSO_4$) demostró ser el factor más influyente en la mejora del rendimiento, alcanzando valores cercanos al 19 % de hidrógeno en el biogás en la concentración de 450 ppm. Este comportamiento se atribuye al papel del hierro como cofactor enzimático en las hidrogenasas, favoreciendo la transferencia de electrones y la actividad metabólica de bacterias hidrogénicas.

En cuanto a las variables operativas, se identificó que una temperatura de 35 °C, una carga orgánica de 10 gSV/L y una relación sustrato/inóculo (S/X) de cuatro, constituyen las condiciones más favorables para la producción de hidrógeno, al permitir un equilibrio adecuado entre disponibilidad del sustrato y estabilidad microbiana. Cargas orgánicas elevadas y condiciones no controladas favorecieron desviaciones metabólicas que redujeron la eficacia del proceso.

A pesar de las mejoras observadas los valores obtenidos se encuentran por debajo de los reportados en sistemas altamente optimizados, lo que indica que el proceso aún presenta limitaciones asociadas a factores como la competencia microbiana, la acumulación del lactato y la restricción de transferencia en masa en reactores tipo batch. En este sentido, se recomienda profundizar en estrategias de control microbiológico, optimización de pH y evaluación de sistemas continuos como semicontinuos con mayor grado de control operacional.

Finalmente, el aprovechamiento del lactosuero como sustrato para la producción de hidrógeno representa una alternativa sostenible que contribuye a la reducción de la carga contaminante de residuos agroindustriales y a la generación de energía renovable. Ese enfoque se alinea con principios de economía circular y presenta un alto potencial de aplicación en

contextos rurales industriales, siempre que se continúe avanzando en la optimización del proceso y en la validación de su escalamiento a nivel industrial.

V. REFERENCIAS

[1] A. R. Prazeres, F. Carvalho, and J. Rivas, "Cheese whey management: A review," Journal of Environmental Management, vol. 110, pp. 48–68, 2012.

[2] C. M. Hendrickson-González, "Aplicaciones y tecnologías utilizadas para el aprovechamiento del lactosuero en Colombia," Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), 2022. [En línea]. Disponible: https://repository.unad.edu.co/handle/10596/51553

[3] S. V. Mohan, G. Mohanakrishna, and P. N. Sarma, "Biohydrogen production from wastewater," Bioresource Technology, vol. 215, pp. 2–12, 2016.

[4] G. Kumar, S. Bakonyi, and K. K. S. Y. Kumar, "Recent advances in biohydrogen production via dark fermentation," Bioresource Technology, vol. 301, 2020.

[5] K. Y. Show, D. J. Lee, and J. H. Tay, "Biohydrogen production: Current perspectives and the way forward," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 36, pp. 608–622, 2011.

[6] D. Das and T. N. Veziroğlu, "Hydrogen production by biological processes: A survey," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 26, pp. 13–28, 2001.

[7] F. Silva, R. Mahler, and J. R. Ferreira, "Dark fermentation of cheese whey: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 3230–3244, 2018.

[8] B. R. Dhar, A. Elbeshbishy, H. Hafez, and G. Nakhla, "Influence of iron on fermentative hydrogen production," Bioresource Technology, vol. 180, pp. 79–86, 2015.

[9] X. Guo, X. Wang, and Y. Zhang, "Hydrogen production from agricultural residues by dark fermentation," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 45, pp. 123–135, 2020.

[10] Sharma S, Srivastava S, Chaudhary A. Response surface methodology based Box-Behnken Design for statistical optimization of Curcuma caesia mediated copper oxide nanoparticles synthesis. Biochem Biophys Res Commun. 2026 Apr 2;807:153414. doi: 10.1016/j.bbrc.2026.153414. Epub 2026 Feb 9. PMID: 41678950. DOI: 10.1016/j.bbrc.2026.153414

[11] J. Mesa-Jiménez et al., "Producción de biohidrógeno en biorreactores mesófilos usando Clostridium butyricum: efecto de la temperatura sobre la actividad metabólica y el rendimiento de hidrógeno," Rev. Colombiana de Ciencia y Tecnología, vol. X, no. Y, pp. Z–Z, 2021.

[12] D. M. Hernández Avilés, D. K. Grisales Penagos, and A. T. Rodríguez Chaparro, "Efecto de la configuración de reactores anaerobios de alta tasa en la producción de hidrógeno: biomasa fija y UASB-híbrido," Revista ION, vol. 29, no. 1, pp. 27–36, Jun. 2016, doi: 10.18273/revion.v29n1-2016002.

[13] H.A. Amaranto Álzate, H. "Modelo cinético de la digestión anaerobia basado en la bioenergética de los microorganismos". Universidad de Antioquia. Disponible en: https://hdl.handle.net/10495/31867,2022.

[14] C. Lin et al., "Enhancement of biohydrogen production…," Int. J. Hydrogen Energy, 2016.

[15] J. Wang and W. Wan, "Effect of Fe^{2+}…," Int. J. Hydrogen Energy, 2008.

[16] V. Mohan et al., "Fermentative hydrogen production…," Int. J. Hydrogen Energy, 2007.

[17] Y. Luo et al., "Dark fermentation…," Biotechnol. Adv., 2010.

[18] J. Wang and W. Wan, "Factors influencing dark fermentation…," Int. J. Hydrogen Energy, 2009.

WEEF 2026
(IFEES & GEDC)

Engineering Education That Transforms

September 22 – 25, 2026
Cartagena de Indias, Colombia



DOCTORAL STUDENTS IN ENGINEERING

Powered by

Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI

Diseño de rutas con drones para vigilancia bajo restricciones operativas

Oscar Mayorga Torres
Doctorado en Ingeniería – Ingeniería Industrial
Universidad del Valle
Universidad Francisco de Paula Santander
San José de Cúcuta-Colombia
oscarmtorres@ufps.edu.co

Juan Pablo Orejuela Cabrera
Doctorado en Ingeniería – Ingeniería Industrial
Universidad del Valle
Santiago de Cali-Colombia
juan.orejuela@correounivalle.edu.co

***Resumen*—El monitoreo eficiente en actividades de patrullaje y vigilancia representa un desafío clave para la seguridad en zonas con alta incidencia delictiva. Aunque el uso de drones ha emergido como una alternativa para la recolección de información en tiempo real, en contextos de alta complejidad geográfica es fundamental integrar la planificación de trayectorias con restricciones operativas, cobertura espacial y condiciones topográficas. Este estudio propone un modelo de ruteo de drones orientado a la supervisión y vigilancia de zonas críticas, incorporando las condiciones propias de la operación. La metodología se estructura en tres etapas: (i) caracterización del sistema, identificando variables y restricciones relevantes; (ii) formulación del modelo de ruteo para la definición de trayectorias eficientes; y (iii) validación en campo mediante la evaluación del desempeño en escenarios reales.**

Los resultados muestran mejoras en la eficiencia del monitoreo, reducción de costos operativos y aumento de la cobertura espacial frente a enfoques tradicionales. En conjunto, la investigación aporta una herramienta analítica replicable para la planificación de sistemas de vigilancia con drones en contextos de alta complejidad geográfica y delictiva.

Palabras clave– Diseño de rutas, restricciones operativas, drones, vigilancia.

I. Introducción

La incorporación de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) en operaciones de vigilancia y monitoreo ha generado nuevas oportunidades para optimizar actividades de seguridad en entornos complejos, su capacidad para operar de forma autónoma, acceder a zonas de difícil cobertura y transmitir información en tiempo real los convierte en herramientas estratégicas para aplicaciones de patrullaje y supervisión territorial. No obstante, la eficiencia operativa de estos sistemas depende en gran medida de una adecuada planeación de rutas que considere restricciones relacionadas con autonomía, cobertura, condiciones geográficas y tiempo de operación. En este sentido, estudios recientes destacan la necesidad de desarrollar modelos de optimización que permitan mejorar el desempeño operativo de los UAVs en contextos dinámicos y de alta exigencia logística [1].

La literatura especializada ha abordado el problema de ruteo de UAVs desde diferentes perspectivas, principalmente asociadas a restricciones energéticas, cobertura espacial y eficiencia operativa; investigaciones como las de [3] y [4] evidencian que las limitaciones de autonomía y consumo energético representan uno de los principales desafíos para la continuidad de las misiones, asimismo, [5] y [6] muestran que las condiciones de vuelo, la velocidad y la carga operativa influyen significativamente en el diseño de trayectorias eficientes. Sin embargo, estos enfoques se concentran en aplicaciones logísticas o de distribución, dejando en segundo plano las particularidades asociadas a escenarios de vigilancia y patrullaje en zonas de alta complejidad geográfica.

En operaciones de vigilancia, la planificación de rutas requiere integrar restricciones operativas adicionales relacionadas con persistencia de monitoreo, capacidad de cobertura y condiciones topográficas del entorno, a diferencia de los problemas clásicos de ruteo vehicular, las misiones de patrullaje con drones demandan recorridos que garanticen supervisión continua sobre áreas críticas, minimizando tiempos de desplazamiento y maximizando eficiencia operacional. En este contexto, autores como [7] y [8] resaltan la importancia de incorporar variables operativas y espaciales dentro de modelos de optimización para UAVs, especialmente en escenarios donde las restricciones de movilidad y autonomía afectan directamente la efectividad del sistema de vigilancia.

De igual manera, investigaciones recientes han enfatizado la necesidad de formular modelos matemáticos capaces de representar de forma más realista las condiciones de operación de los UAVs. [9] y [10] plantean enfoques orientados a mejorar la planificación de trayectorias mediante estrategias de optimización adaptadas a entornos dinámicos; mientras que [11] y [12] destacan el potencial de las metaheurísticas y formulaciones de programación matemática para resolver problemas complejos de ruteo bajo restricciones operativas. A pesar de estos avances, aún persisten limitaciones relacionadas con la integración de variables geográficas y operacionales específicas de las misiones de vigilancia autónoma.

En este contexto, el presente trabajo propone un modelo de diseño de rutas para drones orientado a operaciones de vigilancia bajo restricciones operativas, la investigación se enfoca en la formulación de trayectorias eficientes que permitan mejorar la cobertura espacial y la capacidad de supervisión en zonas críticas, considerando condiciones propias de la operación y del entorno geográfico. La metodología contempla la caracterización del sistema, la formulación del modelo de ruteo y la validación mediante escenarios de prueba, con el propósito de aportar una herramienta analítica aplicable a problemas de

vigilancia inteligente y planificación operativa de UAVs en contextos de alta complejidad territorial.

II. Referentes teóricos

A. *Modelos de ruteo con drones*

Los modelos de ruteo con drones han evolucionado a partir de las formulaciones clásicas del Vehicle Routing Problem (VRP), incorporando restricciones propias de los vehículos aéreos no tripulados, como autonomía energética, capacidad de carga y limitaciones de vuelo. En este contexto, [5] introdujeron el Flying Sidekick Traveling Salesman Problem, considerado uno de los primeros enfoques orientados a coordinar rutas con drones en operaciones logísticas; posteriormente, [1] ampliaron estas formulaciones hacia escenarios inteligentes de distribución y monitoreo, integrando criterios de eficiencia operativa y reducción de costos; estos avances permitieron consolidar el ruteo de UAVs como una línea de investigación relevante dentro de la optimización combinatoria y la logística autónoma.

La literatura reciente ha enfatizado la necesidad de incorporar restricciones energéticas dentro de los modelos de ruteo debido a la limitada capacidad de batería de los UAVs, investigaciones como las de [3] y [4] evidencian que el consumo energético depende de variables dinámicas como velocidad, altitud, condiciones climáticas y trayectoria de vuelo; de igual manera, [6] demostraron que la variación de velocidad y carga modifica significativamente la eficiencia operacional del sistema. En consecuencia, los modelos contemporáneos han evolucionado hacia formulaciones multiobjetivo capaces de equilibrar distancia recorrida, tiempo de operación y uso eficiente de energía en escenarios complejos.

Por otro lado, los problemas de ruteo con drones presentan una elevada complejidad computacional, especialmente en entornos dinámicos y de gran escala, por esta razón, diversos autores han propuesto estrategias híbridas basadas en programación matemática, metaheurísticas y algoritmos adaptativos. [7] desarrollaron enfoques matheurísticos para cobertura completa con múltiples UAVs, mientras que [12] aplicaron algoritmos de búsqueda adaptativa para optimizar rutas bajo restricciones operativas. Asimismo, [11] formularon modelos lineales enteros mixtos para problemas de ruteo energético, aportando estructuras matemáticas robustas para representar sistemas de vigilancia y monitoreo autónomo.

B. *Operaciones de seguridad y vigilancia*

Las operaciones de seguridad y vigilancia requieren sistemas capaces de monitorear áreas extensas de manera continua, eficiente y adaptable a diferentes condiciones geográficas, en este contexto, los UAVs han emergido como herramientas estratégicas debido a su capacidad para realizar patrullaje autónomo, supervisión en tiempo real y recolección de información en zonas de difícil acceso. Según [2], la incorporación de drones en sistemas de vigilancia ha permitido reducir costos operativos y aumentar la capacidad de cobertura espacial frente a métodos tradicionales, estas características han impulsado el desarrollo de modelos orientados a maximizar persistencia operativa y eficiencia en escenarios de monitoreo crítico.

Los enfoques actuales de vigilancia con UAVs se fundamentan en problemas como el Persistent Surveillance Problem y el Multi-UAV Routing Problem, donde el objetivo principal consiste en optimizar la cobertura temporal y espacial de las áreas monitoreadas. [10] plantea que la coordinación de trayectorias y la planificación eficiente del patrullaje permiten mejorar significativamente la capacidad de respuesta en entornos dinámicos. De igual manera, [9] destacan que la planeación de rutas debe integrar variables operativas relacionadas con autonomía, tiempos de misión y restricciones del entorno. Estas investigaciones evidencian que la vigilancia autónoma requiere modelos más complejos que los problemas tradicionales de distribución o transporte.

En escenarios de seguridad, las restricciones operativas representan un elemento determinante para el desempeño de los UAVs, factores como: topografía, zonas restringidas, cobertura de comunicación y duración del vuelo condicionan la efectividad del monitoreo y la continuidad de las misiones. [8] y [13] señalan que la planificación de trayectorias debe considerar explícitamente las limitaciones espaciales y operacionales del sistema para garantizar sostenibilidad y eficiencia. En consecuencia, la literatura reciente orienta sus esfuerzos hacia modelos de optimización que permitan mejorar la toma de decisiones en operaciones de vigilancia inteligente bajo condiciones reales de operación.

C. *Logística militar*

La logística militar ha experimentado un proceso de transformación tecnológica impulsado por la incorporación de sistemas autónomos, inteligencia artificial y plataformas no tripuladas, bajo este panorama, los UAVs han adquirido un papel estratégico en actividades de reconocimiento, vigilancia y apoyo táctico debido a su capacidad para operar en entornos de riesgo con menores costos y mayor flexibilidad operativa. [14] destacan que la digitalización de los sistemas logísticos militares ha permitido fortalecer los procesos de monitoreo y control mediante tecnologías inteligentes de supervisión, asimismo, [15] señalan que la eficiencia energética y la planificación de rutas son factores críticos para garantizar continuidad operacional en misiones de larga duración.

Desde una perspectiva operacional, la logística militar demanda sistemas de vigilancia capaces de adaptarse a escenarios dinámicos caracterizados por incertidumbre, restricciones de movilidad y alta variabilidad geográfica. En este tipo de entornos, los modelos de ruteo con drones permiten optimizar tiempos de respuesta, ampliar cobertura territorial y mejorar la capacidad de supervisión estratégica. [9] y [1] evidencian que la integración de modelos de optimización con tecnologías autónomas favorece la toma de decisiones en operaciones críticas; estas capacidades resultan especialmente relevantes para actividades de patrullaje fronterizo, protección de infraestructura y vigilancia táctica.

La literatura resalta la importancia de incorporar restricciones operativas dentro de los sistemas logísticos militares basados en UAVs, variables como autonomía energética, condiciones topográficas, riesgos operacionales y disponibilidad de recursos influyen directamente en la efectividad de las misiones de vigilancia. [3] y [4] demuestran que las limitaciones energéticas afectan significativamente la

continuidad operativa de los drones en escenarios complejos. Por esta razón, los modelos actuales buscan desarrollar estrategias de planeación de rutas más robustas y sostenibles, orientadas a maximizar eficiencia operacional y capacidad de monitoreo en aplicaciones de seguridad y defensa.

III. Métodos y procedimientos

A. Caracterización del sistema

En la primera fase se realizó la caracterización operativa del sistema de vigilancia con drones, identificando las variables, parámetros y restricciones que intervienen en las misiones de patrullaje, para ello, se efectuó una revisión de literatura científica relacionada con modelos de ruteo UAV, vigilancia autónoma y restricciones operativas en sistemas de monitoreo; asimismo, se definieron elementos asociados a cobertura espacial, autonomía de vuelo, distancia máxima de operación, y condiciones topográficas (con criticidad de vigilancia). Esta etapa permitió establecer los criterios técnicos necesarios para la construcción del modelo matemático y delimitar el alcance operacional, las principales restricciones consideradas en la literatura son:

Tabla 1. Restricciones del modelado

Restricción	Descripción
Autonomía	Tiempo máximo de vuelo
Altitud	Límite operativo vertical
Cobertura	Área efectiva monitoreada
Velocidad	Restricción cinemática
Obstáculos	Edificaciones y relieve
Clima	Viento y precipitación
Energía	Consumo de batería

En la caracterización se evalúa los componentes de morfológicos del terreno, perímetro, área altitud, velocidad relacional (del dron y el viento), en las figuras 1a, 1b, 2a y 2b, se analiza el perímetro y área de operación del dron, que influye en la tarea (misiones) y por ende en el diseño del modelo matemático.

Fig. 1a. Mapa perimetral urbanístico



Fuente:
https://aerocivil.maps.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=b4be4d501c8d4bcabd0c35297521c16e&center=-74.3578;4.7377&level=10

Fig. 1b. Mapa perimetral infraestructura



Fuente:
https://aerocivil.maps.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=b4be4d501c8d4bcabd0c35297521c16e&center=-74.3578;4.7377&level=10

Fig. 2a. Mapa espacial urbanístico (área en m2)



Fuente:
https://aerocivil.maps.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=b4be4d501c8d4bcabd0c35297521c16e&center=-74.3578;4.7377&level=10

Fig. 2b. Mapa espacial infraestructura (área en m2)



Fuente:
https://aerocivil.maps.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=b4be4d

501c8d4bcabd0c35297521c16e&center=-74.3578;4.7377&level=10

B. Formulación matemática del modelo de ruteo de drones para vigilancia bajo restricciones operativas

La segunda fase consistió en el diseño del modelo matemático orientado a la planeación de rutas eficientes para UAVs en operaciones de vigilancia; se definieron las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones operativas relacionadas con cobertura espacial, autonomía de vuelo y continuidad de las trayectorias. El modelo fue estructurado mediante criterios de optimización enfocados en la minimización de recorridos, asimismo, las restricciones operativas fueron consideradas como uno de los elementos más críticos en el diseño de trayectorias UAV, debido a que condicionan la viabilidad de las misiones y afectan directamente el desempeño global de las operaciones de vigilancia.

Conjuntos

$N = \{0,1,2,3,\dots,n\}$ Conjunto de nodos de vigilancia. El nodo 0 representa la base o estación de salida y retorno del dron.

$A = \{(i,j): i,j \in N, i \neq j\}$ Conjunto de arcos o trayectorias posibles entre nodos.

$K = \{1,2,\dots,k\}$ Conjunto de drones disponibles para la operación de vigilancia.

Parámetros

d_{ij} Distancia entre el nodo i y el nodo j.

t_{ij} Tiempo de desplazamiento entre los nodos iy j.

c_{ij} Consumo energético requerido para desplazarse entre iy j.

E_k Capacidad máxima de energía disponible del dron k.

T_k Tiempo máximo de operación del dron k.

q_i Nivel de prioridad o demanda de vigilancia del nodo i.

R Distancia máxima operativa permitida para cada dron.

M Constante suficientemente grande utilizada en restricciones lineales.

Variables de decisión

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1: si\ el\ dron\ k\ viaja\ del\ i\ al\ nodo\ j \\ 0: en\ otro\ caso \end{cases}$$

*** Variable binaria de la asignación de rutas

u_{ik} Variable auxiliar asociada al orden de visita del nodo i por el dron k

e_{ik} Nivel de energía restante del dron k al llegar al nodo i.

Función objetivo: Minimizar la distancia total recorrida por los drones durante la operación de vigilancia

$$\text{F.O. Min Z} = \sum_{k\in N} \sum_{i\in N} \sum_{j\in N} d_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Restricciones del modelo

Restricción de cobertura de nodos: Cada nodo de vigilancia debe ser visitado al menos una vez

$$\sum_{k\in N} \sum_{i\in N} x_{ijk} \geq 1 \qquad \forall j \in K \,/\, \{0\} \quad (2)$$

Restricción de salida desde la base: Cada dron debe iniciar su recorrido desde la base

$$\sum_{j\in N} x_{0jk} = 1 \qquad \forall k \in K \quad (3)$$

Restricción de retorno a la base: Cada dron debe regresar a la base al finalizar la misión

$$\sum_{i\in N} x_{i0k} = 1 \qquad \forall k \in K \quad (4)$$

Restricciones de continuidad: Conservación de flujo, garantiza continuidad en la trayectoria del dron

$$\sum_{i\in N} x_{ihk} - \sum_{j\in N} x_{hjk} = 0 \qquad \forall h \in N, \forall k \in K \quad (5)$$

Eliminación de subrutas: Evita ciclos no conectados mediante restricciones MTZ

$$u_{ik} - u_{jk} + |N| \, x_{ijk} \leq |N| - 1 \quad (6)$$

$$\forall i,j \in N, i \neq i, k \in K \quad (7)$$

Restricción de energía disponible: La energía consumida durante la ruta no puede superar la capacidad del dron:

$$\sum_{i\in N} \sum_{j\in N} c_{ij} x_{ijk} \leq E_k \qquad \forall k \in K \quad (8)$$

Actualización de energía residual: Control del nivel energético durante la trayectoria:

$$e_{jk} \leq e_{ik} - c_{ij} + M(1 - x_{ijk}) \quad (9)$$

$$\forall i,j \in N, \forall k \in K \quad (10)$$

Restricción de distancia máxima operativa: La distancia recorrida por cada dron no debe exceder el límite permitido

$$\sum_{i\in N} \sum_{j\in N} d_{ij} x_{ijk} \leq R \qquad \forall k \in K \quad (11)$$

Restricción de tiempo máximo de operación: El tiempo total de vuelo debe mantenerse dentro del límite operacional

$$\sum_{i\in N} \sum_{j\in N} t_{ij} x_{ijk} \leq T_k \qquad \forall k \in K \quad (12)$$

Restricción de asignación única de trayectoria: Un dron no puede ejecutar simultáneamente múltiples desplazamientos desde el mismo nodo

$$\sum_{j\in N} x_{ijk} \leq 1 \qquad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (13)$$

La función objetivo busca minimizar la distancia total recorrida durante las operaciones de patrullaje, garantizando simultáneamente cobertura de zonas críticas, continuidad de las trayectorias y cumplimiento de restricciones energéticas y operativas. Las restricciones incorporadas permiten representar

condiciones reales de operación relacionadas con autonomía de vuelo, persistencia de vigilancia y capacidad operacional de los UAVs en entornos de alta complejidad geográfica.

C. Validación experimental y trabajo de campo

La validación computacional del modelo matemático se desarrolló mediante el software GAMS, utilizando técnicas de programación lineal entera mixta (MILP) para resolver el problema de ruteo de drones bajo restricciones operativas. La implementación computacional permitió representar los conjuntos, parámetros, variables de decisión y restricciones asociadas a cobertura espacial, continuidad de trayectorias, autonomía energética y tiempo máximo de operación de los UAVs. Para la experimentación se construyeron diferentes escenarios de prueba con múltiples configuraciones de nodos de vigilancia, distancias operativas y capacidades energéticas, permitiendo obtener rutas factibles orientadas a minimizar la distancia total recorrida y garantizar el cumplimiento de las restricciones definidas en la formulación matemática (ver tabla 2).

TABLA 2. SUPUESTOS DEL MODELADO

Supuestos	Requerimiento
Nodos	Mínimo 4 / máximo 7 Geolocalización determinística
Plataforma (base)	Geolocalización determinística
Velocidad de la misión (dron)	1.5 mtrs/seg
Altura de vuelo (dron / normativa)	45 mtrs
Alcance de la plataforma de vuelo al dron	1000 mtrs^2
Distancia de seguridad	900 mtrs^2
Tiempo consumo energético de seguridad	5 min
Tecnología UAV	DJI Phantom 4

Los resultados computacionales evidenciaron la capacidad del modelo para generar trayectorias continuas y operativamente viables en escenarios de vigilancia con múltiples zonas de supervisión. Asimismo, se verificó el cumplimiento de las restricciones relacionadas con autonomía de vuelo, continuidad de rutas y límites máximos de operación, validando la consistencia matemática y funcional del modelo propuesto. La experimentación computacional fue desarrollada considerando diferentes configuraciones de rutas operativas con un único UAV, observándose un incremento progresivo en el consumo energético y en la distancia recorrida conforme aumentó el número de nodos supervisados, manteniéndose en todos los casos dentro de los límites operacionales establecidos para el sistema. Finalmente, la validación fue complementada mediante pruebas de campo en escenarios controlados de vigilancia, donde se analizaron variables asociadas a cobertura espacial, estabilidad de trayectoria y desempeño operativo de los UAVs, permitiendo evaluar la aplicabilidad del modelo en condiciones cercanas a un entorno real de operación (ver tabla 3).

TABLA 3. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN

Misión	Número de nodos	Número de drones	Rutas generadas	Distancia recorrida (mtr)	Tiempo de operación (min)	Consumo energético (%)	Cobertura alcanzada (%)
1	4	1	R_1: 0 → 1 → 2 → 0 R_2: 0 → 3 → 4 → 0	655	7.2	29.1	100
2	5	1	R_1: 0 → 1 → 2 → 3 → 0 R_2: 0 → 4 → 5 → 0	1180	13.1	48.4	100
3	6	1	R_1: 0 → 1 → 2 → 3 → 0 R_2: 0 → 4 → 5 → 6 → 0	1765	19.6	69.7	100
4	7	1	R_1: 0 → 1 → 2 → 3 → 4 → 0 R_2: 0 → 5 → 6 → 7 → 0	2480	27.5	93.0	100

Los resultados obtenidos permitieron validar el comportamiento operativo del modelo matemático considerando las capacidades técnicas de un UAV tipo DJI Phantom 4, cuya autonomía máxima de vuelo se aproxima a 30 minutos bajo condiciones normales de operación. Se evidenció que el incremento progresivo en el número de nodos supervisados genera un aumento proporcional en la distancia recorrida, el tiempo de operación y el consumo energético del sistema. No obstante, todos los escenarios evaluados mantuvieron cobertura total de las zonas de vigilancia y cumplimiento de las restricciones operativas asociadas a autonomía, continuidad de trayectoria y distancia máxima de vuelo.

De igual manera, los resultados permitieron verificar que las trayectorias generadas por el modelo matemático permanecen dentro de los límites operacionales del UAV, garantizando factibilidad técnica para operaciones reales de patrullaje y monitoreo autónomo. A medida que incrementa el número de nodos de vigilancia, se evidencia un crecimiento progresivo en la longitud de las trayectorias, el tiempo de operación y el consumo energético del sistema, manteniéndose una relación consistente entre cobertura territorial y requerimientos energéticos. En todos los escenarios evaluados se alcanzó cobertura total de las zonas supervisadas y cumplimiento de las restricciones de autonomía, continuidad de trayectoria y retorno seguro al punto base. Particularmente, la Misión 4 representó el escenario de mayor exigencia operacional, alcanzando un tiempo estimado de vuelo de 27.56 minutos y un consumo energético aproximado del 93%, valores aún coherentes con los límites técnicos del DJI Phantom 4 utilizado en la validación computacional y que garantizan una reserva mínima de seguridad energética para el retorno a la plataforma de vuelo. Finalmente, las Figuras 3–6 presentan los diagramas de trayectoria correspondientes a cada misión y ruta generada, permitiendo validar gráficamente la estabilidad operativa y la aplicabilidad del modelo en escenarios reales de vigilancia y

monitoreo autónomo.

Fig. 3. Ruteo de la misión 1: R1 y R2



Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Aerocivil Visor UAV. 2026

Fig. 4. Ruteo de la misión 2: R1 y R2



Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Aerocivil Visor UAV. 2026

Fig. 5. Ruteo de la misión 3: R1 y R2



Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Aerocivil Visor UAV. 2026

Fig. 6. Ruteo de la misión 4: R1 y R2



Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Aerocivil Visor UAV. 2026

IV. Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la formulación propuesta representa las restricciones operativas inherentes a las misiones de vigilancia con UAVs, particularmente aquellas asociadas a autonomía energética, continuidad de trayectorias y cobertura espacial. El comportamiento incremental observado en las misiones experimentales confirma una relación no lineal entre el número de nodos supervisados y el consumo energético del sistema, lo cual coincide con los planteamientos de [3] sobre la sensibilidad operativa de los UAVs frente a la longitud de trayectoria y las condiciones de vuelo. Asimismo, la estabilidad operacional alcanzada en todos los escenarios demuestra que las restricciones MTZ implementadas permitieron eliminar subrutas inviables y garantizar conectividad continua entre nodos de vigilancia. El modelo presenta una estructura robusta para resolver problemas de patrullaje autónomo bajo entornos de complejidad territorial media, en consecuencia, la formulación propuesta constituye una aproximación técnicamente viable para aplicaciones de vigilancia inteligente y logística de seguridad basada en UAVs.

De igual manera, los resultados de validación permitieron identificar que el desempeño operacional del sistema depende significativamente de la interacción entre distancia recorrida, tiempo de operación y capacidad energética disponible. La Misión 4 evidenció condiciones cercanas al límite técnico del DJI Phantom 4, alcanzando un consumo energético del 93%, situación que confirma la necesidad de incorporar márgenes de seguridad energética dentro de modelos de ruteo aplicados a operaciones reales. Este comportamiento coincide con los enfoques desarrollados por [9] y [8], quienes sostienen que las restricciones operativas deben integrarse explícitamente en la planeación de trayectorias UAV para garantizar sostenibilidad y continuidad funcional. Adicionalmente, el modelo demostró capacidad para mantener cobertura total de vigilancia sin violar restricciones de autonomía ni retorno seguro a la base operativa. Desde el punto de vista metodológico, la investigación aporta una estructura matemática adaptable a problemas multi-UAV y escenarios dinámicos de vigilancia territorial. Por tanto, el modelo representa una contribución relevante para futuras

aplicaciones de seguridad inteligente, monitoreo táctico y logística autónoma en contextos geográficos complejos.

V. Conclusiones

La investigación permitió desarrollar un modelo matemático de ruteo para UAVs orientado a operaciones de vigilancia bajo restricciones operativas, integrando variables relacionadas con cobertura espacial, autonomía energética, continuidad de trayectorias y límites de operación. La formulación implementada en software GAMS®© demostró capacidad para generar trayectorias factibles y operacionalmente consistentes en escenarios de patrullaje con múltiples nodos de supervisión. Los resultados experimentales confirmaron que el incremento del número de zonas vigiladas produce un crecimiento progresivo en distancia recorrida, tiempo de vuelo y consumo energético, manteniéndose dentro de los límites técnicos establecidos para el sistema UAV evaluado. Asimismo, la incorporación de restricciones energéticas y operativas permitió representar de manera más realista las condiciones de funcionamiento de los drones en entornos de alta complejidad geográfica. Desde una perspectiva aplicada, el modelo mejora la eficiencia operacional y contribuye a optimizar procesos de vigilancia autónoma en contextos de seguridad y monitoreo territorial. En consecuencia, la investigación valida la pertinencia de utilizar modelos de optimización matemática como soporte para la planificación estratégica de sistemas UAV.

Adicionalmente, la validación computacional y las pruebas de campo evidenciaron que la formulación propuesta mantiene cobertura total de las zonas críticas de vigilancia, garantizando simultáneamente continuidad operativa y retorno seguro a la base. El modelo mostró estabilidad funcional incluso en escenarios de mayor exigencia energética, demostrando capacidad de adaptación frente a restricciones de autonomía y distancia máxima operativa. Estos resultados permiten inferir que la integración de técnicas de programación lineal entera mixta constituye una alternativa eficiente para resolver problemas complejos de vigilancia autónoma y logística militar con UAVs. De igual manera, la estructura matemática desarrollada puede ser extendida hacia formulaciones multiobjetivo que incorporen variables como condiciones climáticas, riesgo operacional y coordinación multi-UAV. Como línea futura de investigación, se puede incorporar algoritmos metaheurísticos híbridos y técnicas de inteligencia artificial para mejorar escalabilidad computacional y respuesta en tiempo real. Finalmente, el trabajo aporta una base analítica replicable para el diseño de sistemas inteligentes de vigilancia aérea en escenarios urbanos, fronterizos y estratégicos.

VI. Referencias

[1] Y. Wang, X. He and M. Huang, “Drone routing optimization for intelligent surveillance and logistics systems,” IEEE Access, vol. 11, pp. 45821–45839, 2023.

[2] D. Mladenović, Ž. Stević and A. Puška, “Applications of unmanned aerial vehicles in security and surveillance systems,” Technological Forecasting and Social Change, vol. 170, 120851, 2021.

[3] J. Ding, Y. Lin and H. Liu, “Energy-aware UAV routing under operational constraints,” Applied Sciences, vol. 13, no. 4, pp. 1–18, 2023.

[4] J. Sasiadek and Q. Wang, “Autonomous UAV path planning considering energy consumption and operational limitations,” Aerospace Science and Technology, vol. 98, 105657, 2020.

[5] C. Murray and A. Chu, “The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery,” Transportation Research Part C, vol. 54, pp. 86–109, 2015.

[6] Z. Zhongli, Y. Zhang and H. Zhang, “Multi-constraint UAV routing optimization considering velocity and payload variations,” Sensors, vol. 24, no. 2, pp. 1–21, 2024.

[7] G. Santin et al., “Matheuristic approaches for multi-UAV coverage routing problems,” Computers & Operations Research, vol. 131, 105281, 2021.

[8] A. Karapetyan et al., “Operationally constrained UAV surveillance routing in complex geographical environments,” Expert Systems with Applications, vol. 238, 121912, 2024.

[9] S. Basiri et al., “Optimization models for autonomous UAV trajectory planning in dynamic environments,” Robotics and Autonomous Systems, vol. 176, 104675, 2024.

[10] Y. Huo, “Persistent surveillance routing optimization for unmanned aerial systems,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 26, no. 1, pp. 112–126, 2025.

[11] T. Saboia, P. França and L. Lorena, “Mixed integer linear programming models for energy-constrained UAV routing,” European Journal of Operational Research, vol. 301, no. 2, pp. 544–558, 2022.

[12] X. Qin, Y. Zhang and J. Guo, “Adaptive search algorithms for UAV routing under operational constraints,” Computers & Industrial Engineering, vol. 158, 107412, 2021.

[13] Y. Huang, X. Chen and Z. Liu, “Trajectory planning for UAV surveillance missions with operational constraints,” Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 99, pp. 567–584, 2020.

[14] M. Marzouk et al., “Smart military logistics systems supported by autonomous aerial platforms,” Journal of Defense Modeling and Simulation, vol. 18, no. 4, pp. 455–468, 2021.

[15] R. Vidal et al., “Energy-efficient UAV operations in military surveillance environments,” Defence Technology, vol. 16, no. 5, pp. 1032–1045, 2020.

Análisis del comportamiento dinámico de suelos diatomáceos de la ciudad de Tunja - Colombia

Omar Javier Jiménez Jiménez
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Tunja, Colombia
omar.jimenez@uptc.edu.co
https://orcid.org/0000-0002-7309-5085

Carlos Javier Sainea Vargas
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Tunja, Colombia
carlos.sainea@uptc.edu.co
https://orcid.org/0000-0001-5434-0746

Yaneth Pineda Triana
Escuela de Ingeniería Metalúrgica
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Tunja, Colombia
yaneth.pineda@uptc.edu.co
https://orcid.org/0000-0002-5561-9412

***Resumen*— El comportamiento dinámico de los suelos es una de las características más importantes para comprender la estabilidad de las estructuras frente a cargas cíclicas. Por lo tanto, para ciudades como Tunja, ubicadas en una zona de amenaza sísmica intermedia, y con suelos vulnerables debido a su estructura geológica, el análisis de las propiedades dinámicas debe ser una prioridad. Con el fin de contribuir a la caracterización dinámica de los suelos presentes en la ciudad, esta investigación contiene el procesamiento y análisis de las curvas de degradación: módulo de corte y relación de amortiguamiento, de tres muestras de suelo, al igual que la descripción y caraceristicas de estructuras diatomáceas identificadas en estos suelos.**

Estos se obtuvieron de suelos residuales de las formaciones Bogotá y Tilatá, y depósitos fluviolacustres y coluviales. Los ensayos se realizaron con el equipo combinado de Columna Resonante (CR) y Torsión Cíclica (TC) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), el cual es de tipo libre fijo, este permite el análisis de deformaciones bajas a medias, y se considera el ensayo más adecuado para estimar la rigidez del suelo.

En este caso se establecen presiones de confinamiento constantes y voltajes constantes, para observar la variación del comportamiento dinámico según el tipo de suelo. Adicionalmente, se presenta la caracterización física de las muestras de suelo, cuyas propiedades permiten comparar los resultados dinámicos obtenidos con correlaciones reconocidas como las curvas de Vucetic & Dobry.

Se presenta resultados de la caracterización física, química y mineralógica de los suelos presentes en la zona de estudio y en especial detalle se da a conocer una caracterización de las estructuras diatomáceas identificadas principalmente en dos depósitos enmarcados en la ciudad, aplicando diferentes técnicas que permiten realizar la correspondiente caracterización como es el uso del microscopio electrónico de barrido, Fluorescencia, entre otros ensayos, permitiendo conocer estos materiales de una forma más detallada.

Palabras clave— Diatomeas, Torsión Cíclica, columna resonante

I. INTRODUCIÓN

Tunja es una ciudad propensa a la actividad sísmica, debido a que se desarrollan varios sistemas de fallas activas [1]. Según el Preliminary Determination of Epicenters, entre 1973 y 2008, se registraron 192 temblores en la ciudad [2]. Por eso, el estudio del comportamiento dinámico de suelos prioriza implementar evaluaciones preventivas y correctivas que aseguren de mejor manera las edificaciones de la ciudad.

El comportamiento que presentan los suelos ante cargas cíclicas es un factor fundamental para la ejecución de cualquier obra ingenieril [3]; [4], ya que comprenden deformaciones que alteran la seguridad de los proyectos y de los usuarios involucrados [5].

Para examinar estos comportamientos, se realizan estudios dinámicos del suelo, los cuales analizan los comportamientos y propiedades ante estos efectos [6]. El ensayo de CR y TC, es un método de laboratorio, que estima de manera adecuada la rigidez del suelo a pequeñas y medias deformaciones, y permite el estudio del comportamiento del suelo ante cargas dinámicas establecidas [7]; [8]. Esto permite evaluar las propiedades dinámicas, como la degradación del módulo de corte (G) y la variación de la relación de amortiguamiento (D) frente a una caracterización física de los suelos de la ciudad.

Este ensayo utiliza la propagación de ondas en probetas cilíndricas [9], y permite la implementación de estrategias que toman en cuenta los diferentes niveles de amenaza y efectos locales probables, para la modificación de la respuesta sísmica de Tunja [10].

Por otro lado, el estudio de suelos diatomáceos ha sido estudiado por diferentes investigadores [11], [12], [13] y [14], donde se ha presentado importantes investigaciones sobre el comportamiento de este tipo de suelos, como es el caso particular de los suelos presentes en la Ciudad de México, observando que estos materiales exhiben un comportamiento que va más allá de los rangos normales de comportamiento geotécnico, según la literatura estudiada. Igualmente, [15], ha presentado los resultados de la caracterización físico-química y mineralógica de los suelos de México, donde encuentra características importantes de estas microestructuras, que intervienen notablemente en el comportamiento geomecánico de los suelos diatomáceos, así como la influencia de las estructuras en el comportamiento de compresibilidad de estos materiales [16].

De este mismo tipo de suelo hay una caracterización muy detallada presentada por [17], exponiendo la caracterización de

tres tipos de diatomeas presentes en el área de estudio de la ciudad de México, que permite conocer su tamaño como morfología entre otros aspectos importantes en este tipo de estructuras.

Otros investigadores como [18], presenta resultados de investigaciones de la variación en el comportamiento de resistencia debido a la presencia de diatomeas en un suelo, donde el cambio de comportamiento de estos es muy notable a medida que aumenta el porcentaje de partículas en la estructura del suelo.

Para el caso particular de Colombia, [19], ha presentado resultados del comportamiento y caracterización de los suelos del depósito lacustre de la Sabana de Bogotá, evidenciando porcentajes significativos de diatomeas en la formación de estos suelos y que muestran comportamientos geomecánicos con valores que salen de los rangos normales expuestos en la literatura de la mecánica de suelos.

A nivel local, [20], presenta una descripción y caracterización geológica para fines de explotación industrial de varios depósitos ubicados en el departamento de Boyacá - Colombia, donde igualmente también fue publicado por [21], presentando el caso de los suelos del depósito de la ciudad de Tunja, encontrando y referenciando la presencia de diatomeas, indicando que estas estructuras fueron desarrolladas en periodos geológicos de origen reciente y que se ubican en el sector este de la ciudad, encontrando que existe una gran exposición superficial de estos materiales y que actualmente el crecimiento del casco urbano de la ciudad ha generado que se estén desarrollando construcciones de edificaciones en este tipo de suelos, lo cual motiva conocer su comportamiento.

En trabajos de investigación previos se han desarrollado diferentes exploraciones geotécnicas, llevadas a cabo en el área urbana de la ciudad de Tunja, y en especial en la zona de depósito de origen lacustre, donde se ha encontrado la presencia de partículas de diatomeas, registrando valores de humedad natural con valores mayores a 100%, como límite liquido superiores a 100%, propiedades que generan incertidumbre debido a su altos valores registrados y que están influenciados por la presencia de frústulas, como lo registran estudios desarrollados por [22], [23] y [24]. De esta manera, se ha realizado y complementado la información obtenida de investigaciones previas y que a continuación será presentada los respectivos resultados del análisis realizado a los suelos diatomáceos presentes.

II. Metodología

El equipo a utilizar, corresponde a un equipo combinado, de base fija y extremo superior libre, el cual presenta una capacidad máxima de carga de 1 MPa, y con dimensionamiento de muestras que deben ser talladas en forma cilíndrica en promedio de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. El material analizado se delimita a suelos de la ciudad de Tunja, Boyacá.

En este caso, se presenta la caracterización y análisis de tres muestras inalteradas de suelo, seleccionadas por ser las más relevantes del estudio, correspondientes a tipo limo y arcilla con profundidades promedio de 2.0 m. Estas se encuentran distribuidas como se observa en la Fig. 1, siendo obtenidas en un muestreo aleatorio por medio de tubo shelby de 2 ½", las cuales, fueron posteriormente perfiladas en laboratorio. Igualmente se tomó una muestra localizada en el sector del patinódromo donde aflora un depósito de suelos diatomáceos.



Fig. 1. Localización de muestras analizadas, Tunja-Colombia. Fuente: Google Earth.

El área de estudio de la investigación se restringe a la zona urbana de la ciudad de Tunja, mediante un barrido general por muestreo probabilístico discrecional. Las características de localización, profundidad y proveniencia de las muestras ensayadas se presentan en la Tabla 1.

TABLA I. Localización y obtención de muestras

N°	Prof. (m)	Coordenada Norte (N)	Coordenada Oeste (W)	Origen
M1	0,9 - 1,4	5°33'8,49"	73°20'57,02"	Depósito (Qfl)
M3	1,0 - 1,5	5°33'36,38"	73°20'19,03"	Formación (Tst)
M7	1,6 - 2,2	5°31'2,97"	73°21'43,80"	Formación (Tb)
Ap1	0.0 – 0.2	5°31'18.39"	73°21'24.72"	Formación (Tst)

III. Resultados

La investigación tiene como objetivo, llevar a cabo la caracterización física las muestras de suelo, complementando para el caso particular de la muestra extraída del Apique, programando una serie de pruebas de ensayos de laboratorio con el fin de realizar la correspondiente caracterización físico-química y mineralógica, además de llevar a cabo una caracterización dinámica mediante el equipo de CR y TC, con el fin de obtener las curvas de amortiguamiento y degradación del módulo cortante para cada muestra de suelo.

Se presenta un análisis de las propiedades de cada una de las muestras, en las que se analiza su comportamiento y relación física y dinámica, para conocer un comportamiento completo de los tipos de suelos encontrados.

A. Caracterización de diatomeas

Para el caso de la muestra del Ap1, se programó una serie de pruebas de ensayos de laboratorio con el fin de realizar la correspondiente caracterización físico-química y mineralógica, realizando ensayos de fluorescencia de rayos X, microscopía electrónica de barrido (*SEM*), toma de humedad natural (*Wn*), límites de consistencia y gravedad específica. Por lo tanto, los resultados de cada prueba se describen a continuación. La

muestra analizada corresponde a un suelo diatomáceo de color amarillo HUE 5.0 Y-8/4.

- *Fluorescencia de rayos X.*

Se realizó el respectivo ensayo donde se registraron los siguientes resultados, Tabla 2:

TABLA II. COMPOSICI'ON DE SUELOS DIATOMÁCEOS

Componente	Mg%	Si%	S%	K%	Ti%	Fe%
Concentración	4.1	83.3	0.50	0.45	0.35	11.3

De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que el elemento principal corresponde a sílice con 83.3%, seguido de hierro con 11.3% y Magnesio 4.1%. De la misma forma en la Fig. 2, se muestra el espectro obtenido.

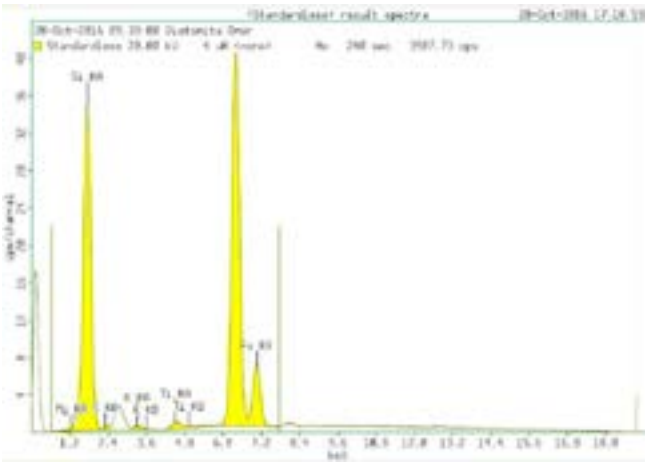


Fig. 2. Resultados de espectro de diatomeas.

- *Microscopio Electrónico de Barrido.*

Se realizó prueba microscopía electrónica de barrido con el fin de determinar la Morfoespecies, tamaño de las frústulas y diámetro de las areolas (poros) de las diatomeas, así como la identificación de minerales asociados.

De esta prueba realizada se encuentra que la especie más abundante es la Aulacoseira granulata (Ehrenberg), ver Fig. 3, las frústulas son cilíndricas, están unidas formando cadenas rectas y largas, presenta válvulas circulares. La unión entre las válvulas vecinas está dada por espinas que están en el borde, las espinas se ensanchan en la base y están incrustadas en la válvula adyacente. Hay espinas largas que se unen en surcos longitudinales que están entre las líneas de las areolas del manto de la diatomea vecina. Las areolas del manto están dispuestas en filas diagonales. El diámetro de las areolas es de 506.0 nm, la longitud de la frústula es variable de 10 µm a 21.38 µm, y su ancho es de 9.438 µm a 19 µm.

Se conoce que este tipo de especies, crece sobre un sustrato fangoso, sobre y alrededor de vegetación acuática sumergida, vive en lagos, estanques y ríos, en ambientes de agua dulce, con concentraciones de sal muy restringidas. El PH está entre 6.3 y 9.0, en ambientes con alta concentración de nutrientes (eutróficos) y temperaturas entre 15 y 30 ° C. En general, la Aulacoseira granulata tiene una distribución muy amplia. En Colombia se encuentran en lagos relativamente poco profundos. También se resaltan otros cuatro tipos de estructuras que se muestran en la Fig. 4.

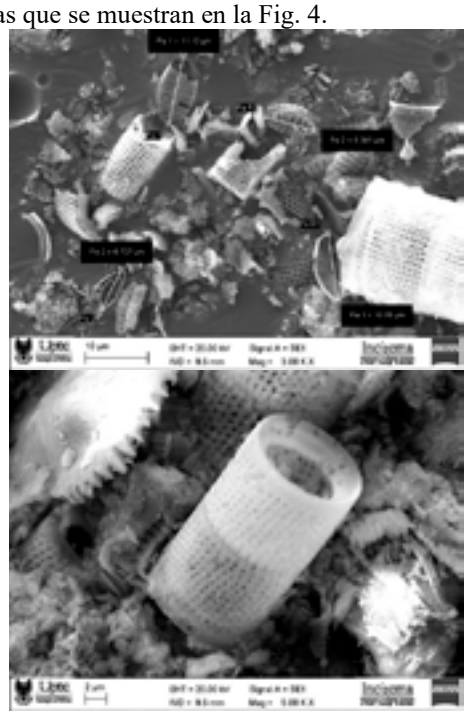


Fig. 3. Imágenes registradas de diatomeas con ayuda de Microscopio Electrónico de Barrido. Aulacoseira Granulata (Ehrenberg), especies dominantes.

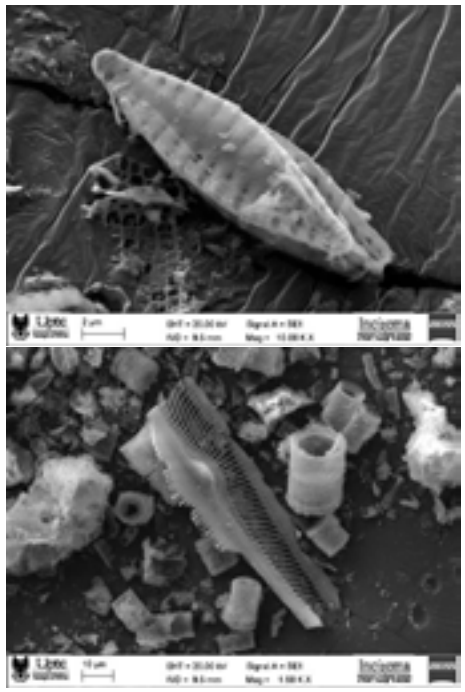


Fig. 4. Otros tipos de diatomeas observadas en rastreo con Microscopio Electrónico de Barrido, presentes en suelos diatomáceos estudiados.

- *Propiedades Índice*

Asimismo, se realizaron pruebas para determinar propiedades índices, donde se realizaron ensayos de humedad

natural, límites de consistencia, peso unitario y gravedad específica, donde se obtuvieron los siguientes resultados: *Wn*: 44.7% a 120%, Límite Líquido: 70% a 135%, Límite Plástico: 36% a 85%, Índice Plástico: 34% a 50%, Peso Unitario Total: 13.4 kN/m^3 a 15.0 kN/m^3. Peso Unitario Seco: 6.9 kN/m^3 a 8.9 kN/m^3, Relación de vacíos: 1.6 a 2.44, Gravedad Específica: 2.22 a 2.27.

B. Caracterización física de suelos

La caracterización de las propiedades físicas de las otras tres muestras se realizó por medio de diversos ensayos contenidos en la normativa [25]. El desarrollo de ensayos de gravedad específica y humedad natural, es base para la configuración de datos de inicio en el equipo de CR y TC.

Se realizaron ensayos para determinar la granulometría de suelos finos por medio de hidrómetro y ensayos de límites de consistencia para determinar la plasticidad de los suelos. La caracterización de los suelos se establece de acuerdo a las propiedades mecánicas y su comportamiento geotécnico. Se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) el cual utiliza la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos [26].

En la Tabla 3, se presenta los resultados de caracterización física. Estos permiten clasificar y validar el comportamiento geotécnico del depósito o formación del material en la zona del cual fue extraído.

TABLA III. RESULTADOS DE PROPIEDADES FÍSICAS

N°	SUCS	%Limo	%Arcilla	Descripción
M1	CH	36,696	63,304	Arcilla grasa
M3	ML	51,856	48,144	Limo
M7	ML	66,799	33,201	Limo

C. Caracterización dinámica de suelos

La caracterización dinámica, se realiza con estado del suelo posterior a la saturación y consolidación (condición final). Se determina la frecuencia de resonancia o el valor donde la deformación se maximiza para CR. Al establecer el voltaje como variable independiente, se aplica una diferencia de potencial que se repite con una secuencia duplicada en cada prueba.

A continuación, se presentan las curvas definitivas de cada muestra, en la cual se compila el resultado de degradación evaluado en los ensayos de CR y TC. La ordenada de la izquierda representa el rango de módulo cortante normalizado, y la ordenada de la derecha representa la relación de amortiguamiento. Ambas ordenadas van en función de una misma abscisa de deformación cortante.

En la Fig. 5, se muestran las curvas de degradación de la muestra 1, la cual, fue evaluada a una presión de confinamiento de 60 KPa y rango de frecuencia de 45.8 Hz a 63.9Hz.

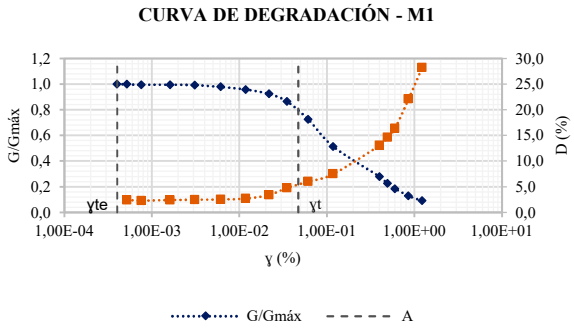


Fig. 5. Curva de degradación, muestra M1.

En la Fig. 6, se muestran las curvas de degradación de la muestra 3, la cual, fue evaluada a una presión de confinamiento de 50 KPa y rango de frecuencia de 52.2 Hz a 74.5Hz.

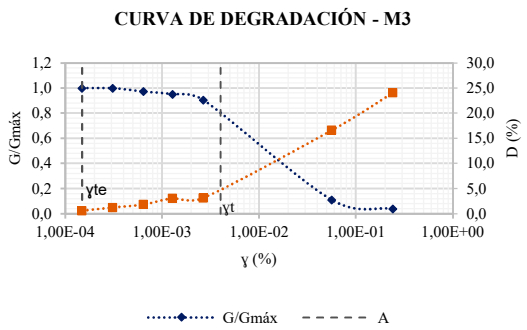


Fig. 6. Curva de degradación, muestra M3.

En la Fig. 7, se muestran las curvas de degradación de la muestra 7, la cual, fue evaluada a una presión de confinamiento de 50 KPa y rango de frecuencia de 20.9 Hz a 43.3 Hz.

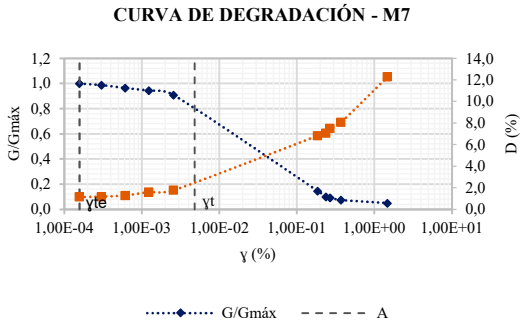
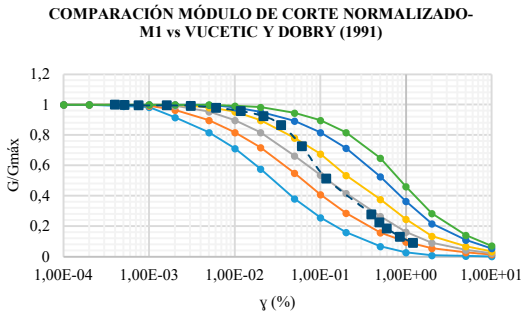


Fig. 7. Curva de degradación, muestra M7.

D. Comparación con curvas teóricas

Proyectos Posterior al análisis de las curvas dinámicas, se da paso al análisis comparativo de las curvas obtenidas, con las curvas de reducción de módulo de corte y la relación de amortiguamiento definidas por [27], en función del índice de plasticidad (IP).

En la Fig. 8, se compara las curvas de la muestra M1, correspondiente a un suelo arcilloso CH con un IP de 45%. Para el caso de G, la curva no tiene un comportamiento definido con respecto a la teoría, ya que avanza entre las curvas de IP entre 15% y 100%. Aun así, se observa que, la curva sigue la tendencia de las curvas teóricas. En el caso de D, la curva si avanza cerca de las curvas de IP entre 30% y 50%.



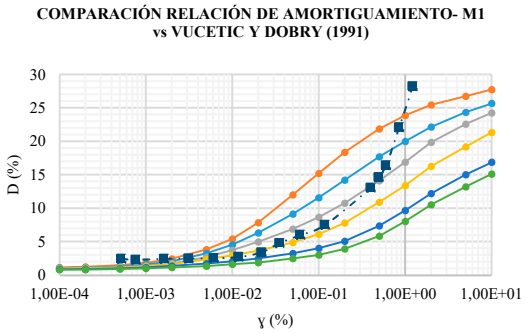
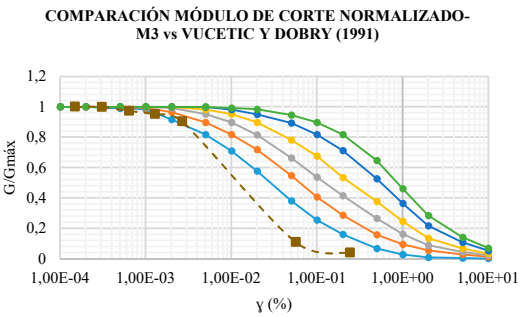


Fig. 8. Comparación de curvas dinámicas, muestra M1.

En la Fig. 9, se muestran los resultados de las curvas de M3, con IP de 18%. Este tipo de suelo se comienza a degradar a menor deformación que en la teoría, por lo que su comportamiento, en ninguna de las dos curvas, coincide con la curva de IP de 15%, sin embargo, no se aleja mucho de la tendencia. Adicionalmente, los valores de amortiguamiento se encuentran dentro del rango teórico.

Adicionalmente, la degradación de M3 comienza alrededor de 3x10-3% y finaliza en 2x10-1% aproximadamente, es decir que se degrada rápido y presenta baja rigidez.



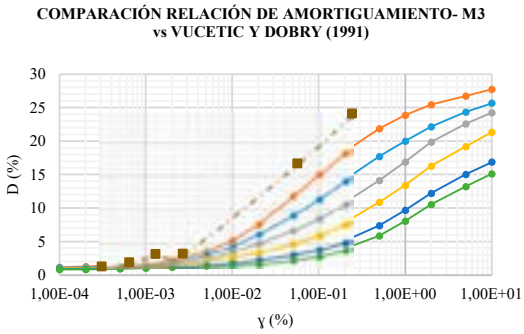
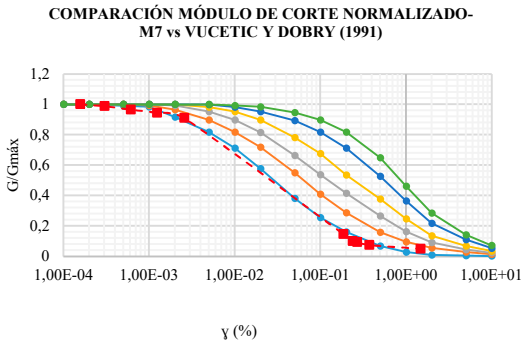


Fig. 9. Comparación de curvas dinámicas, muestra M3.

La muestra M7, presentada en la Fig. 10, corresponde a ML con el IP más bajo de todas las muestras. La curva correspondiente de módulo cortante es hasta ahora la más representativa según este índice, puesto que su tendencia coincide con la curva teórica IP=0%, que es la más cercana.

Por el contrario, la curva de amortiguamiento presenta un comportamiento similar a la curva IP=50%, lo cual está muy alejado del índice de la muestra. Adicionalmente, el punto de falla se encuentra antes que la teoría, en una deformación de 1.5%.



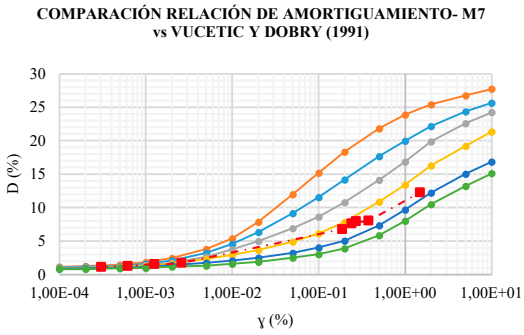


Fig. 10. Comparación de curvas dinámicas, muestra M7.

IV. Conclusiones

Se analizó el efecto de parámetros el índice de plasticidad y el tipo de suelo. De esto se puede concluir que todos los parámetros presentan una correlación de acuerdo a la clasificación de las muestras por valores de menor a mayor módulo de corte. Esto permite comprobar que los suelos de menor a mayor rigidez se definieron así: M1, M3, y M7.

De acuerdo al indicador de G, se establece que la muestra de mayor rigidez es la M7, tipo de suelo ML, con valor de G=82 MPa.

Las diatomeas estudiadas del depósito presente en la ciudad de Tunja, están compuestas principalmente por sílice, según lo establecido en la prueba de fluorescencia de rayos X, donde el contenido de sílice corresponde a un 83.3%, seguido de hierro con 11.3% y Magnesio 4.1%.

Se observa que en las muestras analizadas, la especie predominante de diatomeas es la Aulacoseira granulata; diatomea con una morfología de frústulas cilíndricas, de longitud entre 10 y 21,38 µm y diámetro de areolas de 506 nm; Características que generan propiedades físicas con alta microporosidad efectiva (> 50%) y alta capacidad de absorción (> 100%).

Los suelos de menor a mayor rigidez según el módulo de corte, también se encuentran influenciados por el tipo de suelo, en este caso, los suelos arcillosos tipo CH obtuvieron la menor rigidez y los suelos limosos tipo ML obtuvieron los mejores resultados en este aspecto. Adicionalmente se concluye que los suelos de menor rigidez corresponden a los obtenidos del depósito fluviolacustre de Tunja.

La discrepancia entre las curvas experimentales y las realizadas por Vucetic & Dobry, para ciertos índices de plasticidad, puede deberse a la diferencia en los tipos de suelo y origen de formaciones. Ya que, aunque las curvas teóricas se realizaron con suelos de diversos sitios; los suelos de la ciudad, y de Colombia en general, al ubicarse sobre formaciones geológicas de condiciones especiales y diferentes a las reunidas por los autores, no son plenamente representadas.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento al Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geoambientales (GIISAG) de la UPTC, por su apoyo y colaboración en el desarrollo de la investigación.

REFERENCES

[1] J. Guacaneme, "Zonificación de suelos en superficie de la ciudad de Tunja, Colombia". *Épsilon*, 2006. https://ciencia.lasalle.edu.co/ep

[2] G. Molina, "Evaluación probabilística de la amenaza sísmica regional para Tunja". 120, 2008.

[3] J. Bran, R. González, y H. Ortiz, "Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de El Salvador", 2009.

[4] K. Senetakis, A. Anastasiadis, K. Pitilakis, & M. Coop, "The dynamics of a pumice granular soil in dry state under isotropic resonant column testing". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *45*, 70–79, 2013. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.11.009

[5] C. Candela y H. Clevel, "Guía de laboratorio del ensayo de columna resonante utilizando el equipo TSH-100 de la Universidad Santo Tomás", 2020.

[6] M. Raba, y B. Caicedo, "Caracterización física y geomecánica de suelos lacustres en la ciudad de Bogotá desde el contexto de modelos de comportamiento de suelos blandos", 2012.

[7] P. Ávila, J. Pineda y J. Cruz, "Propiedades Dinámicas de Arcillas Lacustres Sobreconsolidadas a Partir del Ensayo de Columna Resonante: Resultados Preliminares", 2017. http://www.lahistoriaconmapas.com/atlas/colombia-maps/mapa-

[8] K. Senetakis, & H. He, "Dynamic characterization of a biogenic sand with a resonant column of fixed-partly fixed boundary conditions". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *95*, 180–187, 2017. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.01.042

[9] Z. Liu, F. Ning, G. Hu, L. Liu, C. Liu, L. Peng, D. Wang, W. Hu, & Z. Zhang, "Characterization of seismic wave velocity and attenuation and interpretation of tetrahydrofuran hydrate-bearing sand using resonant column testing". *Marine and Petroleum Geology*, *122*, 2020. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104620

[10] Universidad Central de Venezuela. "La microzonificación sísmica para la reducción del riesgo sísmico". *Revista de La Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, *26*(2), 3–6, 2011. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652011000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es

[11] J. Díaz-Rodríguez, Characterization and engineering properties of Mexico City lacustrine soils, *Characterisationand Engeniering Propierties of Natural Soils* (2003), 725–755.

[12] J. Díaz-Rodríguez, Comportamiento Monotónico de suelos diatomáceos, *Revista Internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura Civil* **Vol 12(1)** (2011), 27–34.

[13] J. Díaz-Rodríguez, Los suelos lacustes de la ciudad de México, *Revista Internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura Civil* **Vol 6(2)** (2011), 111–129.

[14] J. Díaz-Rodríguez and J. Santamarina, Mexico City soil behavior at diferent strains: Obsrevations and physical interpretation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **Vol. 127, No 9** (2001), 783–789.

[15] J. Díaz-Rodríguez, R. Lozano-Santa Cruz, V. Dávila-Alcocer, E. Vallejo and P. Girón, Physical, chemical, and mineralogical properties of Mexico City sediments: a geotechnical perspective, *Journal Can. Geotech* **35** (1998), 600–610.

[16] J. Díaz-Rodríguez, R. Gonzalez –Rodriguez, Influence of diatom microfossils on soil compressibility, *Proceedings of the 18th International conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris* (2013), 325–328.

[17] M. Oliva-Martinez, J. Ramírez-Martinez, G. Garduño-Solorzano, J. Cañetas y M. Ortega, Caracterización diatomológica en tres cuerpos de agua de los humedales de Jilotepec-Ixtlahuaca, Estado de México, *Hodrobiológica* **Vol 15(1)** (2005), 1–26.

[18] D. Shiwakoti, H. Tanaka, M. Tanaka and J. Locat, Influences of Diatom microfossils on engineering properties of soils, *Soils and Foundations* **Vol 42, No 3** (2002), 1–17.

[19] B. Caicedo, C. Mendoza, F. López and A. Lizcano, Behavior of diatomaceous soil in lacustrine deposits of Bogotá, Colombia, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engienering* **10** (2018), 367–379.

[20] W. Naranjo-Merchán, S. Gaviria-Melo y S. Manosalva-Sanchez, Mineralogía y Geoquímica de Diatomitas (Boyacá, Colombia), *Geología Colombiana* **32** (2007), 77–88.

[21] S. Manosalva y W. Naranjo, *Diatomitas, Geología, Caracterización y potencial uso industrial (Boyacá, Colombia)*, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso -. Colombia, Primera edición, 2009.

[22] L. Cáceres, J. Quiroga y X. Rodriguez, Caracterización Geotécnica depósito de diatomitas del barrio Patriotas Ubicado en la ciudad de Tunja, *IV Seminario Internacional de Ingeniería Sísmica y Geotécnica, Paipa - Colombia* (2018).

[23] E. Pacheco, L. Prieto y O. Jiménez, Evaluación de correlaciones de parámetros de compresibilidad del depósito lacustre de Tunja, *Ingeniería y Tecnología, Facultad de Ingeniería Benemérita Universidad Autónoma de Puebla* **Año 13, No 26** (2017), 99–105.

[24] L. Guio, F. Reyes, M. Sanchez y O. Jiménez, Proyecto de Caracterización dinámica del subsuelo para la microzonficación sísmica de la ciudad de Tunja, *From Fundamentals to Aplications in Geotechnics IOS Press,* (2015), 2995–3002.

[25] Instituto Nacional de Vías, Sección 100 – Suelos, Colombia, 2013.

[26] B. Das, "Fundamentos de ingeniería geotécnica", Cuarta edición (4th ed.), 2015.

[27] M. Vucetic & R. Dobry, "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", 199

Critical Review of Methodologies for Prioritizing Seismic Vulnerability in Reinforced Concrete Frame University Buildings up to Five Stories through Structural Visual Inspection

Luz Piedad Gallego-Osorio
Military Engineers Research Group
Escuela de Ingenieros Militares (ESING)
Bogotá, Colombia
ORCID: 0009-0006-8253-5800

Arabella Zapata Escobar
Grupo GIS
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Medellín, Colombia
azapata@elpoli.edu.co
ORCID: 0000-0002-6746-3718

***Abstract*—**The early identification of structural vulnerability conditions that may present unfavorable performance under high-intensity seismic events remains one of the main challenges in seismic risk assessment for existing buildings. One of the most significant difficulties when analyzing large groups of buildings in urban contexts occurs when the available information is insufficient, incomplete, or does not incorporate the modifications made during the service life of the structure. Some patterns, such as occupant concentration, continuity of academic activities, and changes in use, may modify the original distribution of loads and spaces and are highly relevant in reinforced concrete frame university buildings with heights not exceeding five stories.

During visual inspection, geometric irregularities, structural discontinuities, visible deterioration, and changes in use that alter structural behavior are usually found. Even with these similarities, the reviewed studies differ both in the selection of variables and in the way their influence on seismic vulnerability is assessed.

For the critical analysis, visual inspection methodologies used in preliminary seismic vulnerability assessment were reviewed, including FEMA 154, RISK-UE, EMS-98, and the Benedetti and Petrini method, taking into account the variables considered by each methodology, their classification criteria, and their application in technical prioritization schemes. The review was supported by indexed scientific publications from 2020 to 2025 on reinforced concrete frame buildings.

The reviewed studies show similarities in variables related to structural aspects, conservation conditions, and functional conditions. Among the most frequent are plan irregularity, vertical irregularity, soft story, structural discontinuities, and visible deterioration. Differences were also observed in the way these conditions are assessed and in the relationship that each methodology establishes with seismic vulnerability levels.

Visual inspection continues to be an important tool for establishing prioritization criteria for interventions in university infrastructure, although its application is conditioned by methodological differences that generate variations in assessment.

Keywords—seismic vulnerability; structural visual inspection; preliminary assessment; building prioritization; university buildings

I. Introduction

In recent decades, seismic events of different magnitudes and intensities have shown that structures subjected to similar demands may present completely different damage levels. This demonstrates that damage does not depend only on the intensity of ground motion, but also on the structural vulnerability conditions present before the event. The possibility of severe damage or loss of stability is associated with aspects such as the resistant configuration, geometric regularity, conservation condition, and modifications made during the service life, all of which directly influence structural response [1]. In existing buildings, many of these conditions remain unevaluated until an extreme event occurs, which continues to represent an important limitation in seismic risk management processes [2].

Structurally characterizing a large building inventory is, in practice, quite difficult. Analytical methods require data that are rarely available: updated drawings, records of interventions, and material tests. In buildings that have been in use for decades and have been modified without sufficient documentary control, this information is simply not available [3], [4].

At this point, structural visual inspection emerges as a viable alternative. It does not replace structural analysis, but it allows field identification of signs that may anticipate problematic seismic behavior. Soft story, short columns, facades that do not correspond to the internal structure, and deterioration that has remained unattended for years are conditions that can be observed without models or tests. These are precisely the

conditions that rapid assessment protocols seek to capture [5], [6].

Even so, not all these methodologies operate in the same way. Differences in the variables they include, how they rate them, and the weight assigned to each condition generate different results for similar structures, making it difficult to compare studies and build homogeneous prioritization criteria [7].

Student concentration in university infrastructure is particularly relevant because occupant concentration, continuity of academic activities, and functional diversity increase the need to identify structural vulnerability. One of the most common building types in university settings corresponds to reinforced concrete frame buildings up to five stories. Distribution changes, partial expansions, and spatial adaptations are frequent in these buildings, even though such modifications alter the initial behavior conditions of the structure and, consequently, the structural response expected in the design [8], [9].

This paper critically analyzes four visual inspection methodologies applied to preliminary seismic vulnerability assessment: FEMA 154, RISK-UE, EMS-98, and the Benedetti and Petrini method. It examines the variables considered by each methodology, how they are classified, and how they have been applied in technical prioritization schemes for reinforced concrete frame university buildings up to five stories.

II. BACKGROUND

A. Structural Visual Inspection

Structural visual inspection remains one of the most widely used approaches for the preliminary assessment of buildings potentially exposed to seismic hazards. Its continued use is not due to methodological simplicity, but to its ability to provide initial information on conditions that may compromise structural response, even before analytical models or more detailed characterization campaigns are developed [10].

In practice, many existing buildings present limitations in their available documentation, including incomplete drawings, unrecorded interventions, functional modifications, or the absence of updated information on the mechanical properties of materials. Under these conditions, direct observation becomes a primary source of diagnosis. Variables such as plan irregularity, structural discontinuities, soft story, geometric alterations, and visible deterioration have repeatedly been associated with damage mechanisms observed after recent earthquakes [11].

The development of visual inspection methodologies has been closely associated with rapid screening procedures. However, their scope has gradually expanded. What initially served as a preliminary screening tool has become part of more structured evaluation schemes, in which observational information supports vulnerability models, performance indices, and technical prioritization matrices [12]. This evolution has strengthened the role of visual inspection within seismic risk reduction strategies.

The challenge lies not in observing buildings, but in determining what should be observed and how the collected information should be assessed. The literature is not uniform in this regard. Some approaches emphasize geometric variables, whereas others assign greater importance to deterioration, structural interaction, or occupancy conditions. These methodological differences influence the results and affect the way intervention priorities are established [13].

From a risk management perspective, structural visual inspection has clear operational value because it allows vulnerabilities to be identified without interrupting the operation of the infrastructure and supports decision-making at early stages. From a sustainability perspective, its contribution is equally important because it promotes conservation, strengthening, and service-life extension strategies for existing buildings, reducing premature replacement and the associated consumption of resources and materials [14].

In university buildings, where functional continuity and high occupant concentration represent critical conditions, structural visual inspection acquires additional importance. Its purpose is not only to identify potential damage but also to establish technical criteria that support the prioritization of interventions under realistic constraints of time, resources, and institutional operation.

B. Seismic Vulnerability

Seismic vulnerability represents the degree of susceptibility of a building to experience damage during a seismic event as a result of its own structural, construction, and functional conditions. Unlike seismic hazard, which corresponds to an external condition, vulnerability depends directly on the internal characteristics of the structural system and on its capacity to respond to the lateral demands imposed by seismic ground motions [15].

Its assessment has been approached from different perspectives. Mechanical methods, based on structural modeling and nonlinear analyses, provide more accurate estimates of structural capacity and performance; however, their application requires detailed information and considerable processing time. In contrast, empirical and observational approaches have led to the development of more practical methodologies based on physical, typological, and deterioration-related variables, particularly useful for large inventories of existing buildings [16].

Among these approaches, vulnerability indices have been widely used because they synthesize multiple structural variables into a single reference value. These models incorporate parameters related to structural configuration, construction quality, geometric regularity, interaction with nonstructural elements, and conservation conditions, making it possible to establish relative levels of damage susceptibility [17]. Their usefulness has been recognized in technical prioritization and preventive risk management processes.

However, seismic vulnerability should not be understood as a static condition. Functional modifications, building extensions, progressive deterioration, and changes in occupancy

conditions alter the expected structural behavior throughout the service life of a building. This is particularly relevant in institutional buildings, where space transformations often respond to operational needs that do not necessarily preserve the original structural configuration [18].

From a sustainability perspective, assessing seismic vulnerability is not limited to reducing physical damage; it also involves preserving functionality, optimizing interventions, and extending the service life of existing infrastructure. In this sense, vulnerability assessment becomes a mechanism for institutional resilience and for reducing the economic, social, and environmental losses associated with structural failures or service interruptions [19].

In university buildings, seismic vulnerability has strategic importance because of the interaction between high occupancy, continuous use, and the concentration of academic and administrative activities. Under these conditions, technical prioritization based on vulnerability criteria provides guidance for intervention processes and strengthens the institutional capacity to respond to emergency scenarios.

C. *Reinforced Concrete Frame Systems*

Reinforced concrete frame systems have been widely used in low- and mid-rise buildings because of their ability to resist both gravity and lateral loads through the interaction between beams and columns. Their seismic performance depends on structural continuity, stiffness distribution, and the capacity to develop inelastic deformations without premature loss of stability [20].

From the perspective of seismic behavior, these systems have been designed according to the principles of ductility and energy dissipation. However, the expected performance rarely depends solely on the original design. Actual operating conditions, subsequent interventions, and spatial modifications introduce changes that may significantly affect the structural response [21].

Evidence from past earthquakes has shown recurring damage patterns in reinforced concrete frame buildings. The presence of soft stories, short columns, abrupt stiffness changes, or vertical irregularities has been associated with failure mechanisms that compromise the overall stability of the structure. These conditions are not only the result of geometric deficiencies but, in many cases, are consequences of functional decisions made after construction [22].

This situation frequently occurs in institutional buildings. Changes in use, partial extensions, or internal space redistribution usually respond to immediate operational requirements, but they may alter load paths or modify stiffness conditions originally considered in the design. In university buildings, where spatial adaptation is common, this issue becomes even more significant.

In buildings up to five stories, these conditions may be particularly critical. Unlike taller structures, where dynamic complexity increases because of other factors, moderate-height buildings are more directly affected by variations in structural configuration, resulting in changes in stress distribution and lateral displacements [23]. This makes the early identification of irregularities technically valuable within preliminary assessment processes.

From a risk management perspective, identifying these conditions before a seismic event allows strengthening and intervention processes to be prioritized more effectively. From a sustainability perspective, improving existing buildings and extending their service life represents a more efficient alternative than structural replacement, both in terms of cost and environmental impact [24].

D. *Structural Modeling*

Structural modeling is one of the most widely used procedures for estimating the structural capacity and seismic performance of existing buildings. Unlike preliminary visual inspection methods, its purpose is not to identify observable vulnerability conditions but to analytically represent the structural response to lateral demands, making it possible to estimate displacements, stress concentrations, and potential failure mechanisms [25].

Its application has evolved from simplified linear models to nonlinear analyses capable of reproducing the inelastic behavior of structural systems with greater accuracy. Procedures such as pushover analysis and performance-based assessment have made it possible to examine the relationship between structural capacity and seismic demand, becoming widely used tools for evaluating structural safety and expected damage levels [26].

However, the reliability of these models depends directly on the quality of the information used to develop them. Structural geometry, material mechanical properties, actual stiffness conditions, and the transformations accumulated throughout the service life of the building are variables that determine how well the model represents reality. When this information is limited or incomplete, uncertainty increases and affects the interpretation of the results [27].

In this context, structural visual inspection and structural modeling should not be regarded as independent procedures. The former provides initial information on physical, geometric, and functional conditions that supports the development of more reliable structural models, whereas the latter allows the preliminary vulnerability conditions identified through visual inspection to be validated, quantified, and examined in greater detail. This complementary relationship strengthens structural assessment and improves the quality of the technical diagnosis [28].

In reinforced concrete frame buildings, particularly those up to five stories, this integration becomes especially relevant because small variations in stiffness, structural configuration, or continuity may significantly modify the overall structural response under seismic loading. From this perspective, structural modeling represents a subsequent validation stage within prioritization processes, where structural visual inspection serves as the initial technical screening tool.

From the perspective of sustainability and risk management, integrating structural visual inspection with structural modeling makes it possible to optimize assessment resources, reduce uncertainty in decision-making, and support more efficient interventions in existing infrastructure, thereby strengthening

institutional resilience and preserving the functionality of strategic buildings [29].

III. METHODOLOGY

This study was structured around the following research question: Which technical variables are employed in visual inspection methodologies for the preliminary assessment of seismic vulnerability, and how are these variables organized within each methodological approach? Based on this question, a critical literature review was conducted to identify, organize, and compare the technical criteria used by each methodology, with the aim of establishing an analytical framework applicable to reinforced concrete frame university buildings up to five stories.

A. Methodological Design

This research was developed through a structured literature review as the methodological approach to identify and organize the technical variables used in the preliminary assessment of seismic vulnerability by means of structural visual inspection [30]. This type of review has been widely applied in studies aimed at systematizing dispersed knowledge, particularly when evaluation criteria, observed variables, and methodological approaches differ across studies [31].

The selection of this approach responded to a condition identified in the recent literature: visual assessment of seismic vulnerability still lacks sufficient consistency in the definition of variables, rating scales, and weighting procedures, even when similar structural typologies are evaluated [32]. This methodological diversity makes it difficult to compare results and limits the development of consistent technical prioritization instruments.

To facilitate the comparative analysis, the variables identified in the literature were organized into three thematic groups: structural configuration, conservation conditions, and functional conditions. This classification made it possible to organize the criteria considered by each methodology and to establish relationships between the frequency of each variable and its influence on the preliminary assessment of seismic vulnerability.

The methodological process was organized according to the principles of traceability, transparency, and reproducibility, which are fundamental criteria in structured and systematic reviews aimed at documentary synthesis [30], [33]. Accordingly, search equations, databases, inclusion and exclusion criteria, and a sequential screening process were defined in advance to reduce bias during document selection and to maintain consistency between the research question and the evidence analyzed.

The review focused on scientific publications published between 2020 and 2025 concerning seismic vulnerability, structural visual inspection, reinforced concrete frame systems, and technical prioritization strategies for existing buildings [34]. The objective was not to experimentally validate structural responses but rather to identify recurring observational variables that could support the development of a baseline matrix for subsequent detailed assessment and intervention prioritization.

B. Literature Search Strategy

The literature search strategy was structured based on the central concepts of the research problem: structural visual inspection, seismic vulnerability, and reinforced concrete frame systems. Search equations were constructed using Boolean combinations and equivalent terms in English, with the purpose of improving document retrieval accuracy and maintaining thematic consistency during the selection process [30], [31].

The search was conducted in three databases with broad scientific coverage and bibliographic traceability: Scopus, Web of Science, and ScienceDirect. These sources were selected because of their recognition in indexed publications related to structural engineering, risk assessment, and seismic performance analysis [32].

As a delimitation criterion, scientific publications published between 2020 and 2025, in English and Spanish, were considered, restricting the search to research articles and scientific reviews. The retrieved records were subsequently organized and screened using the eligibility criteria defined for this research [33].

TABLE I. LITERATURE SEARCH STRATEGY

Database	Search equation	Applied filters	Records identified
Scopus	("visual inspection" OR "rapid visual screening") AND ("seismic vulnerability" OR "seismic assessment") AND ("reinforced concrete frame" OR "RC frame building")	2020–2025; English/Spanish; articles and reviews	n = 38
Web of Science	TS=("visual inspection" OR "rapid visual screening") AND ("seismic vulnerability" OR "seismic assessment") AND ("reinforced concrete frame" OR "RC frame building")	2020–2025; English/Spanish; articles and reviews	n = 31
ScienceDirect	("structural visual inspection") AND ("seismic vulnerability assessment") AND ("reinforced concrete frame buildings")	2020–2025; English/Spanish; research articles	n = 27
Total			**n = 96**

The number of records identified in each database was documented to maintain traceability in the search process. In total, 96 initial records were retrieved from Scopus, Web of Science, and ScienceDirect. Subsequently, these records were subjected to a screening process through duplicate removal, thematic relevance review, and full-text assessment.

C. Selection Criteria

Document screening was carried out using inclusion and exclusion criteria defined in advance, with the purpose of maintaining consistency between the research question and the selected evidence. Their application made it possible to exclude non-relevant documents and to focus the analysis on studies directly related to seismic vulnerability, structural visual inspection, and reinforced concrete frame buildings [30], [31].

TABLE II. INCLUSION AND EXCLUSION CRITERIA

Inclusion Criteria	Exclusion Criteria
Articles published between 2020 and 2025	Publications prior to 2020
Indexed research articles and review papers	Theses, grey literature, and technical reports
Studies related to seismic vulnerability in existing buildings	Studies unrelated to seismic vulnerability
Research on structural visual inspection or preliminary assessment	Studies focused exclusively on structural modeling or experimental validation
Studies on reinforced concrete frame buildings	Research on bridges or industrial infrastructure
Publications in English or Spanish	Publications in other languages

The application of these criteria made it possible to maintain consistency between the research objective and the selected evidence, ensuring that the final analysis was based on studies directly related to the preliminary assessment of seismic vulnerability through structural visual inspection in reinforced concrete frame buildings. . .”

D. Document Screening Process

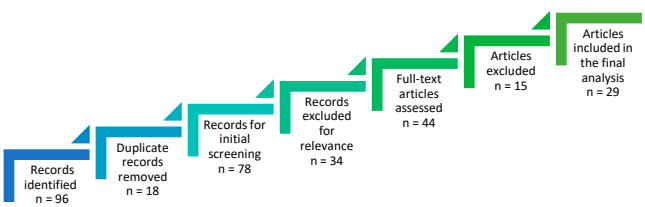
The initial search retrieved 96 records from the selected databases. As the first screening stage, 18 duplicate records were removed, leaving 78 documents for the initial review. This first filtering step made it possible to organize the document database and maintain consistency with the analysis period established for this research [30].

The review then focused on titles, abstracts, and keywords. At this stage, 34 records were excluded because they were not directly related to seismic vulnerability, structural visual inspection, or reinforced concrete frame buildings. As a result, 44 documents proceeded to the full-text assessment stage [31].

The full-text review allowed a more detailed screening process. During this stage, 15 articles were excluded because, although they addressed structural analysis or seismic performance, they did not provide observable variables, classification criteria, or methodologies applicable to the preliminary assessment of seismic vulnerability. This made it possible to concentrate the analysis on studies with greater technical relevance [32].

Finally, the document set consisted of 29 scientific articles. The selection process followed a sequence of identification, screening, eligibility assessment, and final inclusion, maintaining methodological traceability and consistency between the research question and the analyzed evidence [30].

Fig. 1. Document Selection Flow



E. Extraction and Classification of Variables

After the documents had been selected, the review focused on identifying the variables that appeared most frequently in the analyzed studies. The objective was to identify observable elements that could be related to seismic vulnerability conditions in reinforced concrete frame buildings, particularly those associated with structural characteristics, conservation conditions, and functional conditions [33].

Not all the variables identified in the literature were included in the analysis. Priority was given to those that could be recognized through structural visual inspection and that showed a technical relationship with possible changes in the expected seismic behavior [34]. This approach made it possible to distinguish observable variables from those that depend on laboratory testing, structural modeling, or additional characterization.

The collected information was organized into a classification matrix, grouping the variables according to their structural, functional, or conservation nature. This organization made it possible to identify recurring patterns among the reviewed studies and to determine which conditions appeared most frequently in preliminary seismic vulnerability assessment methodologies.

The result of this process is a baseline matrix of technical observational variables, which was used to support the prioritization stage and serves as a reference for subsequent, more detailed structural assessment processes.

TABLE III. MATRIX OF IDENTIFIED VARIABLES

Technical Variable	Category	Type of Observation	Influence on Vulnerability
Plan irregularity	Structural	Direct	High
Vertical irregularity	Structural	Direct	High
Soft story	Structural	Direct	High
Short columns	Structural	Direct	High
Structural discontinuity	Structural	Direct	High
Visible deterioration	Conservation	Direct	Medium
General conservation condition	Conservation	Direct	Medium
Change in use	Functional	Indirect	Medium
Live load density	Functional	Indirect	High

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The review of the 29 selected articles made it possible to identify recurring patterns in the structural visual inspection methodologies used for the preliminary assessment of seismic vulnerability. Based on the document analysis, it was possible to identify recurring variables, differences in classification

criteria, and different technical prioritization approaches according to each methodology [35].

The findings were organized into three main groups: structural variables, variables associated with conservation conditions, and functional variables. This classification made it possible to compare the frequency with which each variable appeared and to analyze its level of influence within methodologies such as FEMA 154, RISK-UE, EMS-98, and the Benedetti and Petrini method [36].

This organization also made it possible to identify important similarities among the methodologies, as well as differences in the way each one interprets and weights the conditions observed during structural visual inspection, a factor that directly influences the prioritization of buildings for detailed assessment or intervention [37].

A. *Structural Variables*

Among the variables grouped within the structural category, plan irregularity, vertical irregularity, soft story, short columns, and structural discontinuities were the most frequently identified in the reviewed studies [35]. Their presence was associated with changes in the distribution of stiffness, mass, and structural capacity, factors that may modify the expected structural response under seismic loading [36].

Although methodologies such as FEMA 154, RISK-UE, EMS-98, and the Benedetti and Petrini method all consider these variables in the preliminary assessment process, differences were identified in the way they classify them and in the importance assigned to each one, resulting in variations in the final vulnerability assessment [37].

B. *Conservation Variables*

Among the variables associated with conservation conditions, visible deterioration and the general conservation condition were consistently identified in the reviewed studies [38]. These conditions were associated with degradation processes that may affect the structural capacity of certain structural elements and modify their performance during seismic events.

Unlike structural variables, the assessment of conservation conditions showed greater variation among methodologies. Some approaches consider them complementary indicators, whereas others incorporate them directly into the preliminary seismic vulnerability assessment [39].

C. *Functional Variables*

The functional variables identified were mainly related to changes in use and live load density, conditions that may modify the structural demands originally considered in the design [40]. Although these variables are not always directly observable from a strictly structural perspective, several studies recognize their importance because of their influence on occupancy patterns and load redistribution.

Their treatment within the reviewed methodologies was not uniform. In some cases, they are considered complementary factors, whereas in others they form part of the initial vulnerability assessment, particularly when significant modifications have been made to the original function of the building [41].

D. *Comparison of Methodologies (FEMA 154, RISK-UE, EMS-98, and Benedetti-Petrini)*

The review identified common aspects among FEMA 154, RISK-UE, EMS-98, and the Benedetti and Petrini method regarding the consideration of structural variables as the basis for the preliminary assessment of seismic vulnerability [42]. In all four methodologies, aspects such as geometric irregularities, structural discontinuities, and deterioration conditions are consistently considered as key observation criteria.

The main differences were found in the way each methodology classifies these variables and in the relative importance assigned to them. While some methodologies place greater emphasis on structural configuration, others give more weight to conservation conditions or functional changes, resulting in differences in the final assessment and in the prioritization of interventions [43].

These findings indicate that, although the methodologies share a common observational basis, their practical application still depends on specific assessment criteria and on the context in which each methodology is applied [44].

E. *Discussion*

The review showed that, although the analyzed methodologies are based on similar observational principles, they do not all prioritize the same conditions or assess them in the same way [45]. In most of the reviewed studies, structural variables constitute the core of the preliminary assessment, particularly those related to geometric irregularities and changes in the continuity of the structural system [46].

Variables associated with conservation conditions and functional changes appeared less frequently, although they still play an important role in some methodological approaches. This indicates that visual assessment does not depend exclusively on the geometry of the structure but also on conditions that have developed over time as a result of use and aging [47].

The comparison of FEMA 154, RISK-UE, EMS-98, and the Benedetti and Petrini method revealed common features, as well as differences in the way observed conditions are classified and assessed. As a result, the same building may receive different vulnerability assessments depending on the methodology applied [48].

In university buildings, where high occupancy levels and changes in use are common, these differences become particularly relevant because they influence the way future assessments and interventions are prioritized. In this context, organizing the variables into thematic groups provides a clearer analytical framework and facilitates their application to this type of infrastructure.

V. CONCLUSIONS

The review showed that FEMA 154, RISK-UE, EMS-98, and the Benedetti and Petrini method share a common objective: to identify, through an initial inspection, conditions that may indicate unfavorable seismic performance. However, they do not reach this assessment in the same way. FEMA 154 is

primarily intended for rapid and practical building screening; RISK-UE adopts a broader territorial and comparative approach to seismic risk; EMS-98 provides a framework for classifying damage and vulnerability based on macroseismic intensity scales; and the Benedetti and Petrini method follows an index-based approach in which the variables are assigned weighted scores.

Among the reviewed methodologies, structural variables were the most frequently considered. Plan irregularity, vertical irregularity, soft story, short columns, and structural discontinuities consistently appear as key conditions because they affect stiffness distribution, load paths, and the lateral response of buildings. However, these variables are treated differently among the methodologies. Some use them as rapid screening criteria, whereas others incorporate them into more detailed assessment scales.

Conservation and functional conditions receive less emphasis than structural variables, but they should not be regarded as secondary in university infrastructure. Visible deterioration, changes in use, space redistribution, and increased occupancy may modify the expected behavior of reinforced concrete frame buildings, particularly when they have been adapted throughout their service life without a comprehensive structural assessment.

The main contribution of this review lies in organizing the identified variables into three analytical groups: structural configuration, conservation conditions, and functional conditions. This classification facilitates the comparison of methodologies that were originally developed for different objectives and scales, while providing a clearer basis for prioritizing buildings that require detailed structural assessment.

It is concluded that structural visual inspection does not replace structural modeling or specialized studies, but it plays an important role as an initial screening tool. Its usefulness increases when the observed variables are organized according to technical criteria, when the assessment does not rely solely on the evaluator's judgment, and when the analysis is adapted to the specific context of the building. In the case of university infrastructure, this adaptation is particularly important because of continuous occupancy, ongoing academic activities, and the functional modifications that tend to accumulate over time.

REFERENCES

[1] Federal Emergency Management Agency, *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*, 3rd ed., FEMA P-154. Washington, DC, USA: FEMA, 2015.

[2] D. Benedetti and V. Petrini, "Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposta di un metodo di valutazione," *L'Industria delle Costruzioni*, no. 149, pp. 66–74, 1984.

[3] G. Grünthal, Ed., *European Macroseismic Scale 1998*. Luxembourg: European Centre for Geodynamics and Seismology, 1998.

[4] P. Mouroux and B. Le Brun, "Presentation of RISK-UE Project," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 323–339, 2006, doi: 10.1007/s10518-006-9020-3.

[5] S. Lagomarsino and S. Giovinazzi, "Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 415–443, 2006, doi: 10.1007/s10518-006-9024-z.

[6] G. M. Calvi, R. Pinho, G. Magenes, J. J. Bommer, L. F. Restrepo-Vélez, and H. Crowley, "Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years," *ISET Journal of Earthquake Technology*, vol. 43, no. 3, pp. 75–104, 2006.

[7] M. J. Page et al., "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, Art. no. n71, 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.

[8] H. Snyder, "Literature review as a research methodology: An overview and guidelines," *Journal of Business Research*, vol. 104, pp. 333–339, 2019, doi: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

[9] C. Okoli, "A guide to conducting a standalone systematic literature review," *Communications of the Association for Information Systems*, vol. 37, Art. no. 43, pp. 879–910, 2015, doi: 10.17705/1CAIS.03743.

[10] T. M. Ferreira, H. Rodrigues, and R. Vicente, "Seismic vulnerability assessment of existing reinforced concrete buildings in urban centers," *Sustainability*, vol. 12, no. 5, Art. no. 1996, 2020, doi: 10.3390/su12051996.

[11] E. Harirchian, T. Lahmer, S. Buddhiraju, K. Mohammad, and A. Mosavi, "Earthquake safety assessment of buildings through rapid visual screening," *Buildings*, vol. 10, no. 3, Art. no. 51, 2020, doi: 10.3390/buildings10030051.

[12] O. Coskun, A. Aldemir, and M. Sahmaran, "Rapid screening method for the determination of seismic vulnerability assessment of RC building stocks," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 18, pp. 1401–1416, 2020, doi: 10.1007/s10518-019-00751-9.

[13] A. Bhalkikar and R. P. Kumar, "A comparative study of different rapid visual survey methods used for seismic assessment of existing buildings," *Structures*, vol. 29, pp. 1847–1860, 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2020.12.026.

[14] M. A. Samuel, E. Xiong, M. Haris, B. C. Lekeufack, Y. Xie, and Y. Han, "Assessing seismic vulnerability methods for RC-frame buildings pre- and post-earthquake," *Sustainability*, vol. 16, no. 23, Art. no. 10392, 2024, doi: 10.3390/su162310392.

[15] S. Tesfamariam and M. Saatcioglu, "Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete buildings using hierarchical fuzzy rule base modeling," *Earthquake Spectra*, vol. 26, no. 1, pp. 235–256, 2010, doi: 10.1193/1.3280115.

[16] N. Bektaş and O. Kegyes-Brassai, "Development in fuzzy logic-based rapid visual screening method for seismic vulnerability assessment of buildings," *Geosciences*, vol. 13, no. 1, Art. no. 6, **2022**, doi: 10.3390/geosciences13010006.

[17] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, D. G. Altman, and The PRISMA Group, "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement," *PLoS Medicine*, vol. 6, no. 7, Art. no. e1000097, 2009, doi: 10.1371/journal.pmed.1000097.

[18] M. Petticrew and H. Roberts, *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide*. Oxford, U.K.: Blackwell Publishing, 2006.

[19] B. Kitchenham and S. Charters, "Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering," Keele University and Durham University, EBSE Technical Report EBSE-2007-01, 2007.

[20] J. Webster and R. T. Watson, "Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review," *MIS Quarterly*, vol. 26, no. 2, pp. xiii–xxiii, 2002.

[21] S. Ruggieri, D. Perrone, M. Leone, G. Uva, and M. A. Aiello, "A prioritization RVS methodology for the seismic risk assessment of RC school buildings," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 51, Art. no. 101807, 2020, doi: 10.1016/j.ijdrr.2020.101807.

[22] D. Perrone, M. A. Aiello, M. Pecce, and F. Rossi, "Rapid visual screening for seismic evaluation of RC hospital buildings," *Structures*, vol. 3, pp. 57–70, 2015, doi: 10.1016/j.istruc.2015.03.002.

[23] R. P. Nanda and D. R. Majhi, "Review on rapid seismic vulnerability assessment for bulk of buildings," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, vol. 94, no. 3, pp. 187–197, 2013, doi: 10.1007/s40030-013-0048-5.

[24] G. J. O'Reilly, D. Perrone, M. Fox, R. Monteiro, and A. Filiatrault, "Seismic assessment and loss estimation of existing school buildings in Italy," *Engineering Structures*, vol. 168, pp. 142–162, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.04.056.

[25] A. Yakut, "Preliminary seismic performance assessment procedure for existing RC buildings," *Engineering Structures*, vol. 26, no. 10, pp. 1447–1461, 2004, doi: 10.1016/j.engstruct.2004.05.011.

[26] American Society of Civil Engineers, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, ASCE/SEI 41-17. Reston, VA, USA: ASCE, 2017.

[27] Applied Technology Council, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40. Redwood City, CA, USA: ATC, 1996.

[28] Federal Emergency Management Agency, *Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1: Methodology*, 2nd ed., FEMA P-58-1. Washington, DC, USA: FEMA, 2018.
[29] European Committee for Standardization, *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings*, EN 1998-3. Brussels, Belgium: CEN, 2005.
[30] Y. Xiao and M. Watson, "Guidance on conducting a systematic literature review," *Journal of Planning Education and Research*, vol. 39, no. 1, pp. 93–112, 2019, doi: 10.1177/0739456X17723971.
[31] D. Tranfield, D. Denyer, and P. Smart, "Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review," *British Journal of Management*, vol. 14, no. 3, pp. 207–222, 2003, doi: 10.1111/1467-8551.00375.
[32] A. Booth, A. Sutton, and D. Papaioannou, *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*, 2nd ed. London, U.K.: SAGE Publications, 2016.
[33] C. Wohlin, "Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering," in *Proc. 18th Int. Conf. Evaluation and Assessment in Software Engineering*, London, U.K., 2014, pp. 1–10, doi: 10.1145/2601248.2601268.
[34] M. J. Page et al., "PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, Art. no. n160, 2021, doi: 10.1136/bmj.n160.
[35] S. K. Jain, K. Mitra, M. Kumar, and M. Shah, "A proposed rapid visual screening procedure for seismic evaluation of RC-frame buildings in India," *Earthquake Spectra*, vol. 26, no. 3, pp. 709–729, 2010, doi: 10.1193/1.3456711.
[36] T. Rossetto and A. Elnashai, "A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures," *Engineering Structures*, vol. 27, no. 3, pp. 397–409, 2005, doi: 10.1016/j.engstruct.2004.11.002.
[37] H. Crowley, R. Pinho, and J. J. Bommer, "A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 173–219, 2004, doi: 10.1023/B:BEEE.0000038948.56081.c3.
[38] K. Lang, *Seismic Vulnerability of Existing Buildings*. Zürich, Switzerland: vdf Hochschulverlag AG, 2002.
[39] S. Yadollahi, A. Adnan, and R. M. Zin, "Seismic vulnerability functional method for rapid visual screening of existing buildings," *Archives of Civil Engineering*, vol. 58, no. 3, pp. 363–377, 2012, doi: 10.2478/v.10169-012-0020-1.
[40] D. Dolce, A. Kappos, A. Masi, G. Penelis, and M. Vona, "Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza, Southern Italy, using Italian and Greek methodologies," *Engineering Structures*, vol. 28, no. 3, pp. 357–371, 2006, doi: 10.1016/j.engstruct.2005.08.009.
[41] S. K. Jain, "Indian earthquakes: An overview," *Indian Concrete Journal*, vol. 72, no. 11, pp. 555–562, 1998.
[42] Federal Emergency Management Agency, *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation*, 3rd ed., FEMA P-155. Washington, DC, USA: FEMA, 2015.
[43] Z. V. Milutinovic and G. S. Trendafiloski, *WP4: Vulnerability of Current Buildings*, RISK-UE Project: An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns, Contract EVK4-CT-2000-00014. Skopje, North Macedonia: Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, 2003.
[44] European Seismological Commission, *European Macroseismic Scale 1998: Guidelines and Background Material*. Luxembourg: European Centre for Geodynamics and Seismology, 1998.
[45] D. D'Ayala, "Assessing the seismic vulnerability of masonry buildings," in *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*, S. Tesfamariam and K. Goda, Eds. Cambridge, U.K.: Woodhead Publishing, 2013, pp. 334–365.
[46] M. Erberik, "Generation of fragility curves for Turkish masonry buildings considering in-plane failure modes," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 37, no. 3, pp. 387–405, 2008, doi: 10.1002/eqe.760.
[47] K. Pitilakis, H. Crowley, and A. M. Kaynia, Eds., *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2014, doi: 10.1007/978-94-007-7872-6.
[48] H. Crowley, S. Özcebe, R. Spence, R. Foulser-Piggott, M. Erdik, and K. Alten, "Development of a European building inventory database," in *Proc. 15th World Conf. Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, 2012, Paper no. 4126.

Infraestructura de transporte y desigualdad territorial: evaluación de la movilidad en márgenes urbanos no planificados en Santiago de Cali

Leidy Viviana Alturo Jiménez
Facultad de Ingenierias
Universidad del Valle
Cali, Colombia
leidy.alturo@correounivalle.edu.co 0009-0008-6072-0137

Ciro Jaramillo Molina
Facultad de Ingenierias
Universidad del Valle
Cali, Colombia
ciro.jaramillo@correounivalle.edu.co 0000-0002-8820-2314

Resumen*— El desarrollo de infraestructuras de transporte en América Latina ha estado históricamente orientado por enfoques tecnocráticos que privilegian la eficiencia operacional y la cobertura funcional, frecuentemente desvinculados de las dinámicas territoriales y sociales que configuran las ciudades. En este contexto, los sistemas Bus Rapid Transit (BRT) han sido implementados como soluciones estandarizadas para mejorar la movilidad urbana, sin responder de manera efectiva a las condiciones de los territorios periféricos e informales. Este artículo evalúa la accesibilidad social al transporte público en los márgenes urbanos no planificados del Distrito de Santiago de Cali, Colombia, mediante el desarrollo del Índice de Accesibilidad Social al Transporte Público (IASTP), una propuesta metodológica basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis multicriterio y lógica difusa. El modelo integra accesibilidad peatonal, vulnerabilidad socioeconómica y condición estructural de acceso utilizando análisis de redes peatonales a 2.5 km/h, normalización del Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) y lógica difusa. Los resultados evidencian que la accesibilidad al transporte público presenta importantes desigualdades intraurbanas, concentrándose las mayores condiciones de exclusión territorial en periferias occidentales, orientales y zonas de expansión informal. Asimismo, se demuestra que la proximidad física al sistema MIO no garantiza condiciones homogéneas de acceso efectivo, debido a que variables como pobreza multidimensional, fragmentación urbana y conectividad peatonal condicionan significativamente la movilidad cotidiana de la población vulnerable. La investigación aporta un modelo metodológico replicable para ciudades latinoamericanas y contribuye a fortalecer los enfoques de justicia espacial en estudios de movilidad urbana.

Palabras clave*— *accesibilidad social, movilidad urbana, justicia espacial, lógica difusa, análisis multicriterio, SIG, transporte público.

I. Introducción

En América Latina, la movilidad urbana constituye uno de los principales mecanismos de acceso a oportunidades económicas, sociales y territoriales. Sin embargo, las dinámicas contemporáneas de expansión urbana han producido ciudades fragmentadas, caracterizadas por fuertes desigualdades socioespaciales y patrones diferenciados de acceso a infraestructura y servicios urbanos. Estas condiciones son particularmente visibles en periferias urbanas y asentamientos informales, donde convergen precariedad habitacional, baja conectividad territorial y limitaciones estructurales de acceso al transporte público.

En ciudades latinoamericanas como Bogotá, Santiago, São Paulo o Lima, diferentes investigaciones han demostrado que las poblaciones de menores ingresos enfrentan desventajas sistemáticas en tiempos de viaje, cobertura de transporte y accesibilidad a oportunidades urbanas [1] [2] [3]. En este contexto, los sistemas BRT han sido promovidos como estrategias de movilidad urbana sostenible debido a sus menores costos de implementación y capacidad de cobertura. No obstante, diversos estudios han evidenciado que la expansión de infraestructura no necesariamente se traduce en condiciones equitativas de acceso para las poblaciones vulnerables, especialmente en territorios periféricos y de urbanización informal [4] [5] [6] [7] [8].

El Distrito Especial de Santiago de Cali representa un caso paradigmático de estas dinámicas. Aunque su sistema BRT llamado MIO [9] ha consolidado corredores estructurantes de transporte masivo, persisten importantes brechas territoriales de accesibilidad en los márgenes urbanos occidentales y orientales, donde la expansión informal, la fragmentación territorial y la precariedad urbana limitan las capacidades efectivas de movilidad cotidiana [10]. Estas condiciones evidencian que la accesibilidad al transporte no depende exclusivamente de la proximidad física a la infraestructura, sino de una combinación estructural entre vulnerabilidad socioespacial, conectividad peatonal y configuración territorial urbana [11].

La literatura sobre accesibilidad urbana ha estado dominada históricamente por enfoques centrados en distancia, tiempo de viaje y cobertura física [12] [13] [14]. Sin embargo, dichas aproximaciones presentan limitaciones importantes para representar las dinámicas complejas de exclusión y vulnerabilidad presentes en las ciudades latinoamericanas. Entre las principales limitaciones identificadas se encuentran: i) el uso de unidades espaciales agregadas que ocultan desigualdades

intraurbanas; ii) la dependencia de métricas euclidianas o buffers rígidos; iii) la ausencia de variables socioeconómicas estructurales; y iv) la limitada incorporación de incertidumbre espacial y gradientes territoriales [15].

En respuesta a estas limitaciones, esta investigación propone el desarrollo del Índice de Accesibilidad Social al Transporte Público (IASTP), una metodología de análisis espacial multicriterio que integra accesibilidad peatonal, pobreza multidimensional y lógica difusa para evaluar la accesibilidad social efectiva al transporte público en Santiago de Cali.

La investigación parte de la siguiente hipótesis: "La accesibilidad al transporte público en Santiago de Cali no depende exclusivamente de la proximidad física a la infraestructura, sino de una combinación estructural entre vulnerabilidad socioespacial, conectividad peatonal y configuración territorial urbana, particularmente en los márgenes urbanos no planificados".

El objetivo del estudio es evaluar la accesibilidad social al transporte público en los márgenes urbanos no planificados de Santiago de Cali mediante un modelo multicriterio espacial basado en SIG y lógica difusa. La principal contribución del artículo consiste en operacionalizar la accesibilidad social efectiva mediante un modelo metodológico capaz de integrar dimensiones físicas y sociales de movilidad urbana, superando las limitaciones de los enfoques clásicos de cobertura peatonal y accesibilidad euclidiana.

II. MARCO TEÓRICO

A. *Accesibilidad y justicia espacial*

Los estudios contemporáneos de movilidad urbana han evolucionado desde enfoques centrados exclusivamente en transporte hacia perspectivas integrales de accesibilidad y justicia espacial. Geurs y van Wee (2004) definen la accesibilidad como la facilidad con la que las personas pueden alcanzar actividades y oportunidades urbanas mediante diferentes modos de transporte. Bajo esta perspectiva, la accesibilidad no constituye únicamente una condición física de desplazamiento, sino una relación entre infraestructura, territorio y capacidades sociales.

Martens (2016) profundiza esta discusión desde una perspectiva normativa, argumentando que la planificación del transporte debe orientarse hacia la justicia distributiva y no únicamente hacia la eficiencia operacional. En consecuencia, la accesibilidad se convierte en un mecanismo de inclusión o exclusión social, particularmente en contextos urbanos caracterizados por fuertes desigualdades socioespaciales [16].

Lucas (2004) por su parte, ya había introducido el concepto de exclusión social relacionada con el transporte, señalando que las limitaciones de movilidad afectan directamente las oportunidades laborales, educativas y de participación social de la población vulnerable. Estos planteamientos resultan especialmente relevantes para ciudades latinoamericanas, donde la urbanización periférica y la informalidad territorial han producido importantes desigualdades de acceso urbano [17] [18].

B. *Estudios de accesibilidad en América Latina*

En Colombia y América Latina, diversos estudios han evaluado la relación entre accesibilidad y desigualdad urbana. Bocarejo y Oviedo (2010) demostraron que los hogares de menores ingresos en Bogotá destinan una proporción significativamente mayor de sus ingresos y tiempo al transporte cotidiano. Delmelle y Casas (2012), utilizando modelos gravitacionales en Cali, evidenciaron que los estratos bajos presentan las peores condiciones de accesibilidad a servicios esenciales, a pesar de la implementación del sistema BRT [19].

Por su parte, Jaramillo, Lizárraga y Grindlay (2012) desarrollaron indicadores de necesidades sociales y provisión de transporte para Cali, identificando importantes brechas entre oferta de transporte y vulnerabilidad territorial en periferias urbanas. Sin embargo, estos estudios presentan limitaciones relacionadas con agregación espacial, ausencia de análisis peatonal detallado y limitada incorporación de incertidumbre territorial [20].

Recientemente, Vecchio, Tiznado-Aitken, Castillo y Steiniger (2024) incorporaron la dimensión de asequibilidad al análisis de accesibilidad en Santiago de Chile, demostrando que los subsidios focalizados pueden generar mayores impactos distributivos que la expansión física de infraestructura. Estos aportes evidencian una transición hacia enfoques más integrales de justicia espacial y movilidad urbana.

C. *Lógica difusa y movilidad urbana*

La lógica difusa constituye una herramienta metodológica relevante para representar fenómenos urbanos complejos caracterizados por incertidumbre espacial y transiciones graduales. A diferencia de los modelos clásicos basados en clasificaciones binarias, la lógica difusa permite representar diferentes niveles de pertenencia espacial y relaciones no lineales entre variables territoriales [21].

En estudios de movilidad urbana, la incorporación de lógica difusa permite superar las limitaciones de los buffers rígidos y representar la accesibilidad como un fenómeno gradual condicionado por variables físicas y sociales [22]. Esta aproximación resulta especialmente pertinente en ciudades latinoamericanas, donde la informalidad urbana, la fragmentación territorial y la desigualdad socioespacial generan escenarios complejos de accesibilidad.

III. METODOLOGÍA

A. *Area de Estudio*

La investigación se desarrolla en el Distrito Especial de Santiago de Cali, Colombia, ciudad con aproximadamente 2.4 millones de habitantes y uno de los principales sistemas de transporte BRT del país, cuenta con corredores troncales, pretroncales y alimentadores y responde al nombre del Sistema Integrado de Transporte Masivo – SITM MIO [23]. El estudio centra especial atención en los márgenes urbanos no planificados, localizados en periferias orientales y occidentales caracterizadas por urbanización informal, vulnerabilidad socioeconómica y déficits de infraestructura urbana [24] [25].

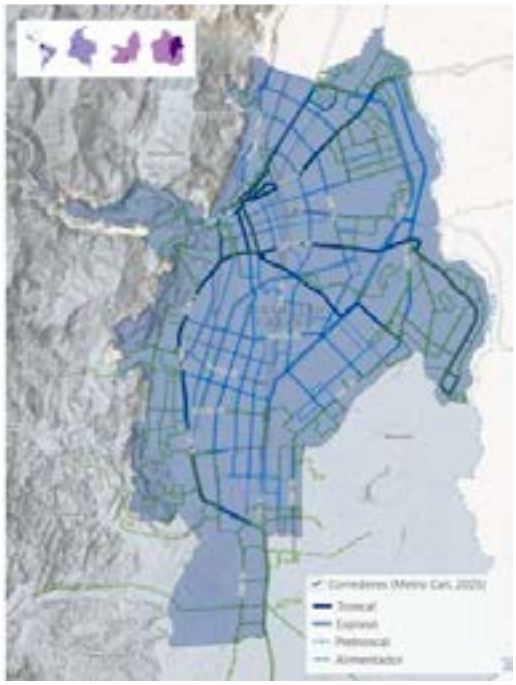


Fig. 1. Distribución espacial de rutas del sistema troncoalimentado del SITM MIO. Fuente de Elaboración Propia con Datos Abiertos de Distrito de Santiago de Cali (2025).

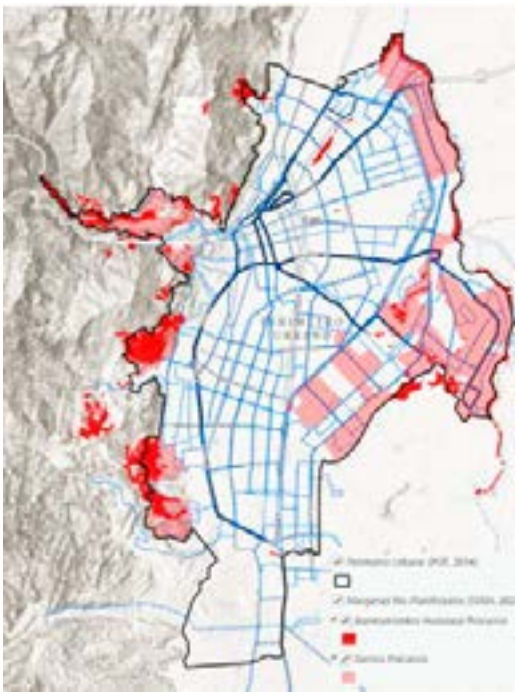


Fig. 2. Localización de los Asentamientos Humanos de Desarrollo Incompletos y/o Precarios en el Distrito de Santiago de Cali. Fuente de Elaboración Propia con Datos Abiertos de LATAM, Colombia y Distrito de Santiago de Cali (2025).

B. Diseño metodológico

La investigación adopta un enfoque cuantitativo correlacional basado en análisis espacial multicriterio y lógica difusa. La metodología integra: (i) análisis de redes peatonales, (ii) normalización de vulnerabilidad socioeconómica, (iii) construcción de índice multicriterio y (iv) modelación espacial mediante lógica difusa.

La unidad geográfica de análisis corresponde a la manzana urbana, seleccionada por su capacidad para representar desigualdades intraurbanas y micro territoriales, esta escala permite capturar desigualdades intraurbanas invisibilizadas en análisis agregados a nivel comunal o zonal.

El modelo se construyó a partir de tres componentes principales:

- Red vial caminable urbana (caminata 2,5km/h) del usuario más vulnerable con cartografía distrital [26].
- Paradas y estaciones del sistema de transporte público del portal de datos abiertos [27].
- Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) georreferenciado por manzana [28].

Todos los datos fueron procesados en ArcGIS Pro 3.X utilizando sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS / Colombia Oeste .

C. Normalización del IPM

La incorporación del Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) constituye uno de los principales aportes metodológicos del estudio, debido a que permite integrar dimensiones estructurales de vulnerabilidad social dentro del análisis de accesibilidad urbana. A diferencia de enfoques tradicionales basados únicamente en proximidad física, el IPM introduce variables relacionadas con educación, empleo, salud, vivienda y acceso a servicios públicos, representando de manera más integral las capacidades reales de movilidad cotidiana de la población [29].

El IPM fue normalizado mediante una función inversa de escalamiento lineal, debido a que valores altos representan mayores niveles de pobreza y, por tanto, menores condiciones estructurales de acceso:

$$IPM_{norm} = 1 - \frac{IPM_i - IPM_{min}}{IPM_{max} - IPM_{min}} \quad (1)$$

Donde:

IPM_i corresponde al valor del índice en la manzana i, IPM_{min} y IPM_{max} representan los valores extremos observados.

La normalización genera valores entre 0 y 1, donde: 1 representa menor pobreza y mejores condiciones sociales y 0 representa mayor vulnerabilidad multidimensional.

D. Análisis de accesibilidad peatonal

La accesibilidad peatonal fue modelada utilizando la red vial caminable urbana. El análisis consideró una velocidad de desplazamiento de 2.5 km/h, ajustada para representar

condiciones de movilidad de población vulnerable, incluyendo adultos mayores, personas con movilidad reducida y población en condiciones de fragilidad socioeconómica [30]. Se generaron áreas de servicio o isócronas de caminata de 5 y 10 minutos alrededor de estaciones y paradas del sistema MIO.

Posteriormente, las isócronas fueron asociadas espacialmente con las manzanas urbanas. El Índice de Accesibilidad Peatonal (AP) fue definido mediante la siguiente ponderación:

TABLE I. TABLA DE PONDERACIÓN EQUIVALENTE

Tiempo	Ponderación Equivalente
≤ 5 min	1.00
5–10 min	0.70
>10 min	0.30
Sin cobertura	0.00

E. *Construcción del IASTP*

El Índice de Accesibilidad Social al Transporte Público (IASTP) fue desarrollado mediante análisis multicriterio ponderado, integrando accesibilidad física y vulnerabilidad social como dimensiones complementarias de la accesibilidad urbana efectiva.

La formulación general del índice se define como:

$$IASTP_i = (0.6 \times AP_i) + (0.4 \times IPM_{norm,i}) \quad (2)$$

Donde:

AP_i representa el índice de accesibilidad peatonal,
$IPM_{norm,i}$ corresponde al IPM normalizado,

La ponderación prioriza la accesibilidad física debido al carácter transportista del análisis, aunque incorpora explícitamente condiciones distributivas y estructurales asociadas a pobreza y vulnerabilidad territorial [31]. Esta aproximación es consistente con enfoques contemporáneos de justicia en el transporte , los cuales reconocen que la proximidad a infraestructura no garantiza necesariamente acceso efectivo a oportunidades urbanas [32] [33] [34].

TABLE II. TABLA DE RECLASIFICACIÓN IASTP

Valor	Interpretación
0.80 – 1.00	Alta accesibilidad social
0.60 – 0.79	Accesibilidad media
0.40 – 0.59	Vulnerabilidad moderada
0.20 – 0.39	Baja accesibilidad
0.00 – 0.19	Exclusión territorial

F. *Integración de lógica difusa*

Con el propósito de representar la naturaleza gradual e incierta de la accesibilidad urbana en territorios vulnerables, el modelo incorpora lógica difusa gamma (γ=0.7). Esta técnica constituye uno de los principales aportes metodológicos del estudio, debido a que permite modelar relaciones espaciales no lineales y transiciones territoriales complejas características de las periferias urbanas latinoamericanas.

A diferencia de los enfoques clásicos de clasificación rígida, la lógica difusa representa niveles graduales de pertenencia espacial, permitiendo modelar situaciones intermedias donde coexisten ventajas y desventajas territoriales simultáneamente.

El operador gamma combina lógica difusa tipo restrictiva y flexible, mediante la siguiente formulación:

$$\mu_{Gamma} = (\mu_{SUM})^{\gamma} \times (\mu_{PRODUCT})^{(1-\gamma)} \quad (3)$$

Donde:

μ_{SUM} representa la tendencia inclusiva,
$\mu_{PRODUCT}$ representa la tendencia restrictiva,
γ corresponde al parámetro de compensación.

El valor γ=0.7 implica una condición moderadamente flexible, permitiendo compensación parcial entre variables sin perder sensibilidad frente a condiciones críticas de exclusión territorial. Esta configuración resulta particularmente adecuada para contextos urbanos heterogéneos donde pueden coexistir buena cobertura de transporte y alta pobreza, baja cobertura y condiciones socioeconómicas favorables, y accesibilidad parcial condicionada por inseguridad, topografía o informalidad urbana.

Los insumos utilizados en el modelo difuso fueron:

- Difuso del Tiempo: Ráster AP_i representa el índice de accesibilidad peatonal,
- Difuso IPMNorm: Ráster $IPM_{norm,i}$ corresponde al IPM normalizado,

La interpretación de los valores resultantes corresponde con la reclasificación IASTP dispuesta en la TABLA II.

G. *Validación espacial*

Con el propósito de fortalecer la robustez del modelo, se aplicó análisis exploratorio espacial mediante evaluación de patrones territoriales y contraste con zonas históricamente identificadas como vulnerables en estudios previos de movilidad urbana en Cali.

IV. RESULTADOS

A. *Cobertura caminable al transporte público*

Los resultados del análisis de redes evidencian una distribución desigual de la cobertura caminable del sistema MIO en Santiago de Cali. Los mayores niveles de accesibilidad peatonal se concentran en corredores centrales y sectores urbanos consolidados, donde existe continuidad de la malla vial y mayor densidad de infraestructura de transporte.

Por el contrario, las periferias occidentales y orientales presentan discontinuidades espaciales y menores niveles de cobertura caminable, especialmente en asentamientos informales y territorios de expansión urbana.

Estos resultados muestran que la presencia física de infraestructura no garantiza condiciones homogéneas de acceso efectivo al transporte público.

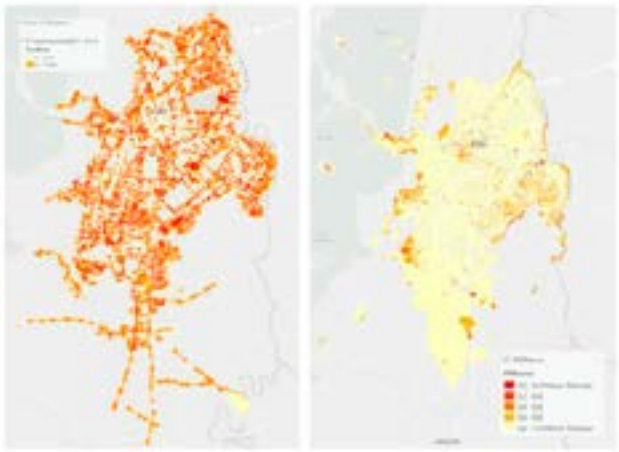


Fig. 3. Mapas de Cobertura caminable 5–10 min (izquierda) e IPM Normalizado. Fuente de Elaboración Propia (2026).

B. Distribución espacial del IASTP

El análisis espacial del IASTP evidencia una estructura territorial diferenciada de accesibilidad social. Las mayores condiciones de accesibilidad se concentran en corredores estructurantes y centralidades urbanas, mientras que las condiciones de exclusión territorial se localizan principalmente en periferias occidentales, laderas y bordes orientales.

La clasificación del índice mostró la siguiente distribución:

TABLE III. TABLA DE RESULTADOS DEL IASTP

Valor	Interpretación	%
0.80 – 1.00	Alta accesibilidad social	60,58%
0.60 – 0.79	Accesibilidad media	18,41%
0.40 – 0.59	Vulnerabilidad moderada	16,76%
0.20 – 0.39	Baja accesibilidad	4,02%
0.00 – 0.19	Exclusión territorial	0,23%

Aunque el 60,58% de las manzanas presentan condiciones de alta accesibilidad social y el 18,41% registran accesibilidad media, los resultados evidencian una distribución territorial profundamente desigual del acceso al transporte público. Aproximadamente el 21,01% del territorio analizado se concentra en categorías de vulnerabilidad moderada, baja accesibilidad y exclusión territorial, reflejando la persistencia de importantes brechas socioespaciales en los márgenes urbanos de Santiago de Cali. Estas condiciones se localizan principalmente en sectores periféricos caracterizados por procesos de urbanización informal, baja consolidación urbana y fragmentación de la conectividad territorial, donde la accesibilidad efectiva al transporte se ve limitada por la combinación entre pobreza multidimensional, discontinuidad de la infraestructura peatonal y menor integración funcional con el sistema MIO.

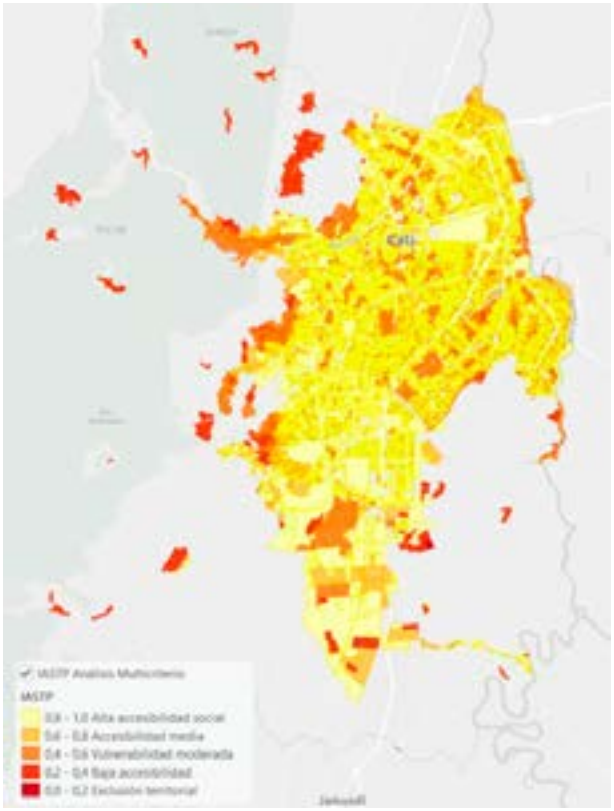


Fig. 4. Mapa del IASTP resultado del análisis multicriterio. Fuente de Elaboración Propia (2026).

C. Resultados de lógica difusa

La incorporación de lógica difusa permitió representar gradientes territoriales de accesibilidad social efectiva, evitando clasificaciones rígidas de cobertura. El ráster continuo generado mediante lógica difusa gamma identificó micro territorios de exclusión y transición urbana que no eran visibles mediante metodologías tradicionales.

Los valores más bajos del índice se concentran en laderas occidentales, periferias orientales y sectores de expansión informal, donde convergen pobreza multidimensional, baja conectividad peatonal y menor oferta estructural de transporte.

V. DISCUSIÓN

Los resultados confirman que la accesibilidad al transporte público en Santiago de Cali no depende exclusivamente de la proximidad física a estaciones, paradas o corredores del sistema MIO, sino de una combinación estructural entre vulnerabilidad social, conectividad territorial y configuración urbana.

Estos hallazgos son consistentes con los planteamientos de Jaramillo, Lizárraga y Grindlay (2012), quienes identificaron importantes brechas entre necesidades sociales y provisión de transporte en las periferias de Cali. Sin embargo, la presente investigación avanza sobre dichos enfoques al incorporar análisis peatonal detallado, unidad de análisis por manzana y lógica difusa para representar accesibilidad gradual.

De igual manera, los resultados dialogan con Delmelle y Casas (2012), quienes demostraron que los estratos bajos presentan menores niveles de accesibilidad a oportunidades urbanas. No obstante, el modelo propuesto supera las limitaciones de los análisis gravitacionales agregados mediante la incorporación explícita de vulnerabilidad multidimensional y análisis multicriterio espacial.

La investigación también contribuye a ampliar los enfoques de justicia espacial propuestos por Martens (2016) y Lucas (2012), al operacionalizar la accesibilidad social efectiva mediante integración de variables físicas y sociales de movilidad urbana.

Desde el punto de vista metodológico, la incorporación de lógica difusa representa uno de los principales aportes del estudio. El uso de lógica difusa gamma permitió modelar la accesibilidad como un fenómeno gradual, superando las limitaciones de los buffers tradicionales y de los análisis binarios de cobertura.

Esta aproximación resulta particularmente pertinente para ciudades latinoamericanas caracterizadas por urbanización desigual, informalidad y movilidad fragmentada.

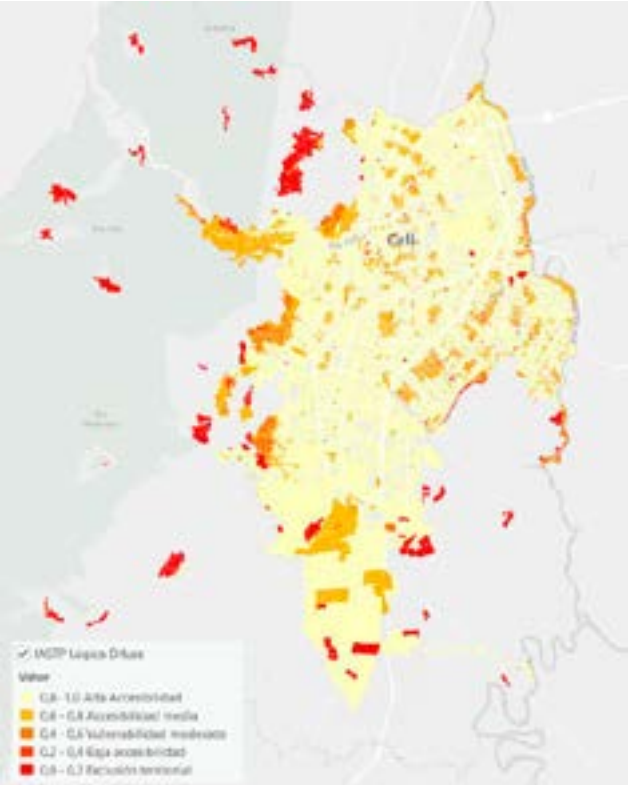


Fig. 5. Mapa del Índice Integrado IASTP resultado de lógica difusa (gamma). Fuente de Elaboración Propia (2026).

En términos de política pública, los resultados sugieren que las estrategias de movilidad urbana deben trascender la expansión física de infraestructura y avanzar hacia enfoques integrales de accesibilidad social. Esto implica fortalecer conectividad peatonal, priorizar inversiones en periferias vulnerables y reconocer las dinámicas territoriales de movilidad cotidiana.

VI. CONCLUSIONES

La investigación permitió demostrar que la accesibilidad al transporte público en Santiago de Cali presenta importantes desigualdades territoriales asociadas a pobreza multidimensional, fragmentación urbana y urbanización informal.

La implementación del Índice de Accesibilidad Social al Transporte Público (IASTP) permitió integrar accesibilidad peatonal y vulnerabilidad social dentro de un mismo modelo multicriterio espacial, superando las aproximaciones tradicionales basadas exclusivamente en proximidad física o cobertura operacional.

La incorporación de lógica difusa gamma fortaleció significativamente la sensibilidad espacial del análisis, permitiendo modelar la accesibilidad como un fenómeno gradual y no binario.

Los resultados evidencian que la presencia física de infraestructura no garantiza condiciones homogéneas de acceso urbano, debido a que variables sociales y territoriales condicionan las capacidades efectivas de movilidad cotidiana.

Finalmente, el estudio aporta una metodología replicable para ciudades latinoamericanas interesadas en incorporar enfoques de justicia espacial y vulnerabilidad social en estudios de movilidad urbana.

REFERENCES

[1] Bocarejo, J., & Oviedo, D. (2010). Transport accessibility and social exclusion: a better way to evaluate public transport investment?

[2] Vecchio, G., Tiznado-aitken, I., Guzman, L. A., Muñoz, J. C., Arellana, J., & Guimaraes, T. (2022). Transporte y equidad: abordando la accesibilidad en los márgenes urbanos. 57(1), 43. https://cods.uniandes.edu.co/transporte-y-equidad-en-margenes-urbanos/

[3] Vecchio, G., Tiznado-Aitken, I., Castillo, B., & Steiniger, S. (2024). Fair transport policies for older people: accessibility and affordability of public transport in Santiago, Chile. Transportation, 51(2), 689–715. https://doi.org/10.1007/s11116-022-10346-0

[4] Castillo-Valencia, M., & Vivas Pacheco, H. (2023). Segregación y estructura urbana. In M. Castillo-Valencia & H. Vivas Pacheco (Eds.), 2023 (Vol. 1). https://doi.org/10.12804/urosario9789585001565.

[5] Cuervo, L. G., Martinez-Herrera, E., Osorio, L., Hatcher-Roberts, J., Cuervo, D., Bula, M. O., Pinilla, L. F., Piquero, F., & Jaramillo, C. (2022). Dynamic accessibility by car to tertiary care emergency services in Cali, Colombia, in 2020: Cross-sectional equity analyses using travel time big data from a Google API. BMJ Open, 12(9). https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-062178.

[6] Delmelle, E. C., & Casas, I. (2012). Evaluating the spatial equity of bus rapid transit-based accessibility patterns in a developing country: The case of Cali, Colombia. Transport Policy, 20, 36–46. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.12.001

[7] Gallego Méndez, J., García-Moreno, L. M., Murillo-Hoyos, J., & Jaramillo Molina, C. (2023). Social Inequality in Popular Neighborhoods: A Pre- and Post-Pandemic Perspective from Joint Accessibility. Sustainability (Switzerland), 15(13). https://doi.org/10.3390/su151310587

[8] Jaramillo, C., Lizárraga, C., & Grindlay, A. L. (2012). Spatial disparity in transport social needs and public transport provision in Santiago de Cali (Colombia). Journal of Transport Geography, 24, 340–357. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.04.014

[9] Córdoba Zuloaga, J. (2005). MIO Una obra para la historia de Cali (Umberto Valverde, Ed.; Umberto Va). Impresora Feriva S.A.

[10] Guzmán, L. A., Oviedo, D., & Rivera, C. (2015). ESTIMACIÓN DE LOS MOVILIDAD DE ACUERDO EL MOTIVO DE VIAJE Y EL MODO DE TRANSPORTE. 1–16.

[11] Alcaldía de Santiago de Cali. (2018). Observatorio MOVIS: Cobertura Espacial del Sistema Integrado de Transporte Masivo – SITM-MIO. 30/08/2017.

[12] Geurs, K. T., Krizek, K. J., & Reggiani, Aura. (2012). Accessibility analysis and transport planning : challenges for Europe and North America. Edward Elgar.

[13] Geurs, K. T., Patuelli, R., & Dentinho, T. P. (2016). Accessibility, equity and efficiency : challenges for transport and public services.

[14] Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. Journal of Transport Geography, 12(2), 127–140. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005

[15] Martens, K., & Golub, A. (2012). A justice-theoretic exploration of accessibility measures Geurs Cap 11. In Accessibility Analysis and Transport Planning (pp. 1–295). Edward Elgar.

[16] Martens, K. (2016). *Transport Justice Designing fair transportation systems*. Routledge; 1er edición. http://lccn.loc.gov/2016001298

[17] Lucas, K. (2012). A critical assessment of accessibility planning for social inclusion. In *Accessibility Analysis and Transport Planning* (pp. 1–295). Edward Elgar.

[18] Lucas, K. (2004). Running on empty : transport, social exclusion and environmental justice. Policy Press.

[19] Rodriguez, D. A., & Vergel Tovar, Erik. (2013). Sistemas de transporte público masivo tipo BRT (Bus Rapid Transit) y desarrollo urbano en América Latina. *LINCON INSTITUTE OF POLICY Land Lines*. www.brtdata.org.

[20] Astudillo, C. A. W., Jaramillo, C., & Murillo-Hoyos, J. (2021). Public transport accessibility and spatial equity for patients with neurodegenerative disease in Santiago de Cali, Colombia. *Investigaciones Geograficas*, (76), 179–193. https://doi.org/10.14198/INGEO.17589

[21] Polanco, C. (2023). LÓGICA DIFUSA CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y CASOS DE ESTUDIO.

[22] Arroyo, B. (2015). La Lógica Difusa como herramienta de evaluación en el Sector Universitario. Alteridad, 10(2), 132. https://doi.org/10.17163/alt.v10n2.2015.01

[23] Departamento Nacional de Planeación. (2023). TerriData Ficha 76001 Cali, Valle del Cauca. https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/perfiles/76001

[24] Departamento Administrativo Nacional de Estadistica - DANE. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. 2018. https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018

[25] Departamento Administrativo Nacional de Estadistica DANE. (2018). Indices de Pobreza en Colombia por Departamentos. 2018. https://geoportal.dane.gov.co/visipm/

[26] Alcaldia de Santiago de Cali. (2016). Revision y Ajuste POT Cali 2014.

[27] Metrocali S.A. (2025). Plataforma de Datos Abiertos del Sistema de Transporte Público del Distrito de Santiago de Cali. https://indicadores-y-metas-del-pdm-2020-2023-metrocali.hub.arcgis.com/

[28] DANE. (2018). Geoportal DANE - Marco Geoestadístico Nacional (MGN). 2018. https://geoportal.dane.gov.co/?descarga-marco-geoestadistico-nacional

[29] Delgado, E. F., Carolina, D., Laverde, N., Esperanza, S., Moncada, B., Estrada, L., Luz, A., & Piñeros López, A. (2014). METODOLOGÍA ÍNDICE DE POBREZA MULTIDIMENSIONAL (IPM).

[30] Tiznado-Aitken, I., Vecchio, G., Astroza, S., Carrasco, J. A., & Smith Piel, M. C. (2025). Profiling caregivers: Caregiving workload, mobility, stress, and remote work difficulties. Urban Studies. https://doi.org/10.1177/00420980251361626

[31] Adli, S. N., & Chowdhury, S. (2021). A critical review of social justice theories in public transit planning. In Sustainability (Switzerland) (Vol. 13, Number 8). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/su13084289

[32] Nazari Adli, S., Chowdhury, S., & Shiftan, Y. (2019). Justice in public transport systems: A comparative study of Auckland, Brisbane, Perth and Vancouver. Cities, 90, 88–99. https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.031

[33] Pereira, R. H. M., Schwanen, T., & Banister, D. (2017). Distributive justice and equity in transportation. Transport Reviews, 37(2), 170–191. https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1257660

[34] Pereira, R. H. M. (2018). Distributive Justice and Transportation Equity:inequality in accessibility in Rio de Janeiro. (June), 271.

Explicabilidad multidimensional para el análisis de teleconexiones climáticas en sistemas agro-productivos bajo un enfoque de ciencia de datos

Claudia Janeth Dagua Paz
Departamento de Ingeniería Telemática
Universidad del Cauca
Popayán – Cauca, Colombia
https://orcid.org/0000-0003-2865-6119

Gustavo Adolfo Ramírez González
Departamento de Ingeniería Telemática
Universidad del Cauca
Popayán – Cauca, Colombia
https://orcid.org/0000-0002-1338-8820

Resumen*— Este trabajo presenta una metodología de ingeniería de datos orientada a identificar la complejidad de las teleconexiones climáticas, como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), y su impacto en la productividad agrícola del departamento del Cauca. El núcleo de la investigación plantea superar las limitaciones de los modelos de "caja negra" mediante un framework de Inteligencia Artificial Explicable (XAI) que integra el análisis de características de alta dimensionalidad con una perspectiva de visualización avanzada. Se utiliza el pipeline multi-fuente UniCrop para la armonización y limpieza de grandes volúmenes de datos: series horarias de ERA5-Land, productos satelitales Sentinel, datos de suelo y topografía y registros de rendimiento de caña de azúcar obtenidos de la plataforma Agronet del Ministerio de Agricultura. Los datos del modelo climático fueron validados utilizando datos de estaciones de Cenicafé. El procesamiento emplea algoritmos de aprendizaje supervisado, destacando la Máquina de Potenciación de Gradiente Ligera (LightGBM), la cual demostró un desempeño superior con un R^2 = 0.9518 y un MAE de 6475.03 Kg/Ha, permitiendo capturar interacciones no lineales y efectos de umbral en la fisiología del cultivo de caña de azúcar, en la región norte del departamento. La interpretación mediante valores SHAP permitió identificar que, factores edafológicos como el pH del suelo y el carbono orgánico, junto con señales climáticas rezagadas de hasta 12 meses, son los principales determinantes de la variabilidad del rendimiento. Estos hallazgos constituyen la base informativa para el desarrollo futuro de un framework de visualización multidimensional. Este enfoque establece los requisitos de interpretabilidad necesarios para que, en etapas posteriores, el sistema dote a los actores locales de la transparencia necesaria para la toma de decisiones informada en entornos de agricultura de precisión y alerta temprana.

Palabras clave — Ingeniería de datos, explicabilidad, visualización multidimensional

INTRODUCCIÓN.

El Departamento del Cauca, en ubicado al sur occidente de Colombia y debido a sus características geomorfológicas, presenta una alta diversidad de pisos térmicos y condiciones climáticas. De acuerdo con el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia (2024), la agricultura, la ganadería y la pesca aportan un 17.1% a la composición sectorial del Producto Interno Bruto (PIB) del departamento [1]. Adicionalmente, el Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Territorial del Cauca 2040 señala que, con excepción de la subregión centro, la población rural con vocación agrícola supera el 63% en el resto del territorio [2]. Dado que los sistemas productivos son altamente vulnerables a las anomalías meteorológicas, prever y mitigar el estrés agroclimático es una prioridad regional.

A nivel global, el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) actúa como uno de los principales forzamientos climáticos [3]. Sus efectos en diferentes regiones del mundo, conocidos como teleconexiones climáticas, consisten en vínculos atmosféricos y oceánicos de largo alcance que inducen alteraciones severas en los patrones de temperatura y precipitación, impactando directamente la agricultura [4]–[6] de forma diferente en cada zona. El comportamiento habitual de las variables atmosféricas se ve distorsionado por estas fluctuaciones de naturaleza aperiódica, provocando mermas significativas en el rendimiento de los cultivos [7]. La magnitud de estos impactos varía en función de la latitud, la especie vegetal y la fase específica del ENSO [8]–[10].

Estudios recientes han integrado diversas fuentes de datos, tales como índices oceánicos [3], [10]; variables hidrometeorológicas de superficie (precipitación, humedad del suelo) [4], [11]; productos derivados de percepción remota satelital [3]; registros históricos de rendimiento agrícola [11], [12] y variables socioeconómicas que incluyen patrones de uso de la tierra y encuestas agrícolas [6], [13]. El procesamiento de estos grandes volúmenes de datos requiere herramientas analíticas avanzadas.

En este contexto, la comunidad científica ha transitado del uso de modelos tradicionales de simulación de cultivos (e.g., ORYZA-v3) [6] y análisis de correlación simple [3], [14], hacia la adopción de algoritmos de Aprendizaje Automático (*Machine Learning*, ML) y Aprendizaje Profundo (*Deep Learning*, *DL*) [5], [10], [12]. Técnicas como los Bosques Aleatorios (*Random Forest*), Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) y Redes Neuronales Artificiales (*ANN*) han demostrado un desempeño superior en la predicción de rendimientos y la clasificación de series climáticas [5].

A pesar de que los algoritmos de *DL* han establecido nuevos hitos en la habilidad predictiva (*skill*) de fenómenos atmosféricos, su adopción en la toma de decisiones agrícolas sigue siendo escasa. La principal objeción de la comunidad científica radica en la opacidad o naturaleza de "caja negra" inherente a estas arquitecturas. Esta falta de transparencia representa una barrera crítica, ya que los actores del sector agroproductivo no pueden justificar las predicciones basándose en principios geofísicos o agronómicos [15]-[17]. Así, las soluciones computacionales enfrentan resistencia o rechazo, limitando su valor en un sector donde las decisiones implican un alto riesgo socioeconómico [18], [19].

En respuesta a esta problemática, la investigación actual ha evolucionado hacia la Inteligencia Artificial Explicable (XAI) [20]. Por ejemplo, la aplicación de técnicas como la propagación de relevancia por capas (*LRP*) permitió visualizar qué patrones espaciales utilizaban las *CNN* para predecir el ENSO, revelando la influencia subestimada de teleconexiones secundarias en las cuencas del Océano Índico y el Atlántico [21]. En el ámbito agrícola, enfoques recientes han utilizado IA interpretable para descubrir que el fallo en las cosechas no siempre obedece a extremos aislados, sino a la conjunción de "factores moderados" (*compound drivers*), como déficits transitorios de presión de vapor acoplados a anegamientos en fases fenológicas tempranas [22].

Este estudio implementa el *framework UniCrop* [23], un *pipeline* de ingeniería de datos universal y reutilizable que permite automatizar la adquisición y armonización de datos multi-fuente, integrando series horarias de *ERA5-Land,* productos satelitales *Sentinel* e información de suelos y topografía, para superar el cuello de botella técnico en el modelado agrícola. El aporte de este trabajo radica en la aplicación de dicho *pipeline* al contexto agroclimático del norte del departamento del Cauca y al cultivo de caña de azúcar, que servirá de insumo para articularlo a un esquema de visualización multidimensional para proveer transparencia y dotar al usuario no experto con herramientas que aporten a su comprensión del impacto de estos eventos climáticos en los cultivos.

METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La investigación emplea el pipeline de ingeniería de datos *UniCrop* para la construcción de un *dataset* multivariado orientado al análisis de teleconexiones climáticas y modelado con Inteligencia Artificial Explicable (XAI). El sistema opera sobre una malla maestra de 5 km, para los municipios del norte del departamento del Cauca (Fig 1), en una ventana temporal de enero de 2018 a diciembre de 2024. El cultivo piloto fue el de caña azucarera por ser uno de los cultivos más representativos de esta región del departamento. El flujo de trabajo del Unicrop, que se describe en las siguientes secciones, se muestra esquemáticamente en la Fig 2.



Fig 1. Ubicación de la región de estudio. En verde la zona del Cauca utilizada como piloto

A. *Ingesta, armonización y validación de datos*

El núcleo computacional sigue un paradigma ETL (extracción, transformación y carga) para convertir flujos heterogéneos en un arreglo mensual continuo:

- Datos Meteorológicos: Se procesaron series horarias de *ERA5-Land* mediante agregación estadística mensual. El Déficit de Presión de Vapor (*VPD*) se estimó mediante la aproximación de Magnus-Tetens, calculando la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión de vapor actual, tal como se describe en (1) y (2):

$$e(x) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27x}{x+237.3}\right) \quad (1)$$

$$VPD = e(T) - e(T_{dew}) \quad (2)$$

donde $e(x)$ es la función de presión de vapor expresada en kilopascales (kPa) para una temperatura x en grados Celsius (°C). En la ecuación (2), T representa la temperatura media del aire y T_{dew} corresponde a la temperatura del punto de rocío, permitiendo cuantificar la demanda evaporativa de la atmósfera.

- Percepción Remota: Se integraron imágenes de *Sentinel-1* (retrodispersión) y *Sentinel-2* (óptico) mediante *Google Earth Engine*. Se aplicó un umbral de nubosidad del 20% y una composición basada en la mediana mensual de píxeles válidos.



Fig 2. Arquitectura funcional del pipeline UniCrop. En cada bloque se muestan las Fases del flujo de trabajo, desde la ingesta de datos multi-fuente (*Sentinel, ERA5, SoilGrids*) hasta la generación de *insights* agronómicos mediante la capa de IA Explicable (XAI). Este diseño modular permite la trazabilidad de procedencia y la armonización automatizada de datos heterogéneos.

- Edafológicos y Topográficos: Se utilizaron capas de SoilGrids (0-5 cm) para variables como pH y carbono orgánico, y datos del *SRTM* para pendiente y elevación.
- Variable Objetivo: Corresponde al rendimiento de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) derivado de la plataforma Agronet, para los municipios del norte del Cauca, que producen caña de azúcar.

La integración final se realizó con la biblioteca *xarray,* generando una tabla maestra de "instantáneas de características" indexadas por tiempo y geolocalización.

B. Modelado predictivo e interpretabilidad (XAI)

El procesamiento se gestionó a través de la clase *UniCropModeler* bajo las siguientes etapas:

1. Preprocesamiento: se aplicó *winsorización* (percentiles 1-99) e imputación diferenciada: *IterativeImputer* para meteorología y *KNNImputer* para índices de vegetación. El escalado se realizó mediante *RobustScaler*.
2. Ingeniería y selección de características: se generaron indicadores de estrés como Grados Día de Crecimiento (*GDD*) y métricas de textura de radar. Para evitar el sobreajuste, el algoritmo *mRMR* redujo el espacio dimensional a 15 predictores clave.
3. Entrenamiento y validación: se evaluaron modelos *LightGBM*, *Random Forest*, *SVM* y *ElasticNet* mediante validación cruzada de 5 pliegues (*5-fold CV*) agrupados por municipio y temporada. Se fijó la semilla 10000291 para garantizar la reproducibilidad.
4. Capa de explicabilidad: se usó la biblioteca *SHAP* para calcular los valores de atribución de características sobre el modelo con mejor desempeño, permitiendo identificar la dirección y magnitud del impacto de las teleconexiones en la fisiología del cultivo.

RESULTALDOS Y DISCUSIÓN

A. Evaluación de la Calidad de los Insumos Climáticos.

Antes del entrenamiento del modelo predictivo, se verificó la coherencia de los datos climáticos a partir de dos estaciones en tierra pertenecientes a Cenicafé, ubicados en el departamento del Cauca: estación de La Trinidad de Piendamó y Estación Manuel Mejía de El Tambo. Los resultados de la validación *in-situ* muestran una alta capacidad del modelo numérico para capturar la variabilidad térmica regional, especialmente en la temperatura promedio.

- Consistencia Térmica: En la estación La Trinidad, se obtuvo una correlación crítica de $R^2 = 0.91$ para la temperatura media, mientras que la estación Manuel Mejía presentó un $R^2 = 0.90$.
- Temperatura Máxima: Las correlaciones se mantuvieron robustas con valores de $R^2 = 0.78$ (Piendamó) y $R^2 = 0.68$ (El Tambo), con sesgos controlados inferiores a 2.2 °C.
- Limitaciones Identificadas: Se observó una baja correlación en la temperatura mínima (R^2 \approx -0.07), un fenómeno recurrente en modelos de reanálisis global sobre topografía andina debido a los efectos locales de inversión térmica y drenaje de aire frío que la resolución de 9 km de *ERA5-Land* no logra capturar plenamente.

Para complementar la validación puntual, se generaron mapas de correlación espacial para el periodo 2007-2019 sobre todo el departamento del Cauca. Estos mapas, derivados de la integración de datos satelitales y numéricos, confirman una consistencia espacial superior al 85% en las zonas de mayor producción agrícola, respaldando la extensión del análisis desde los puntos de estación hacia la malla maestra (master grid) de 5 km definida en la metodología. Los resultados de la validación *in-situ* muestran una alta capacidad del modelo numérico para capturar la variabilidad térmica regional, especialmente en la temperatura promedio, como se evidencia en la Fig 3.

Teniendo en cuenta que la validación realizada con las estaciones de Cenicafé e información satelital confirman que *ERA5-Land* mantiene una alta correlación con la temperatura promedio en diferentes pisos térmicos del departamento, se decide usar la información del reanálisis en la zona específica de este estudio, centrado en los municipios del norte del Cauca y modelar específicamente el rendimiento de la caña de azúcar, donde las anomalías térmicas e hídricas detectadas por el modelo son fundamentales para entender el estrés del cultivo.

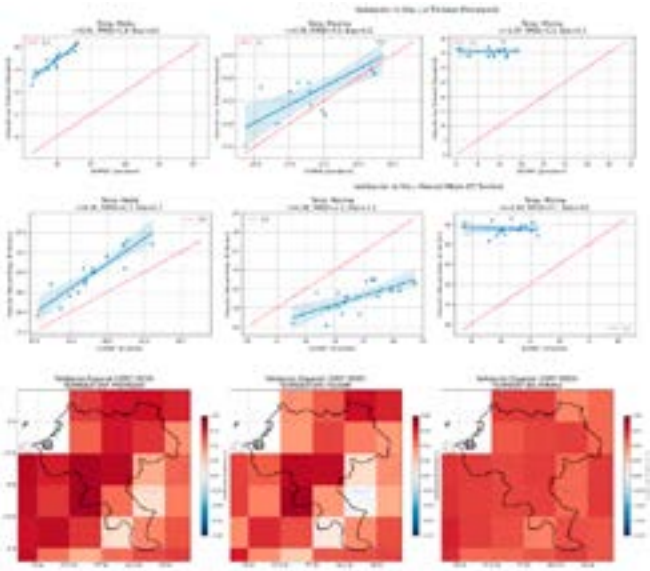


Fig 3.Validación física del modelo ECMWF (ERA5-Land) frente a estaciones Cenicafé y datos satelitales. Los paneles superiores e intermedios muestran la alta correlación (R^2 = 0.90) en temperatura media y máxima para las estaciones La Trinidad y Manuel Mejía. Los paneles inferiores presentan los mapas de correlación espacial sobre el Cauca, confirmando la consistencia del reanálisis para su extrapolación hacia las zonas de cultivo de caña de azúcar en el norte del departamento.

B. *Desempeño y validación de modelos*

El modelo predictivo basado en *LightGBM* demostró una habilidad superior para capturar la variabilidad del rendimiento agrícola en el Cauca, alcanzando un coeficiente de determinación R^2 = 0.9518 y un error absoluto medio (*MAE*) de 6475.03 kg/ha. En comparación, los modelos de Bosques Aleatorios obtuvieron un R^2 = 0.9373, mientras que los modelos lineales como *ElasticNe*t mostraron un desempeño significativamente inferior (R^2 = 0.3662), sugiriendo la presencia de relaciones no lineales complejas entre las teleconexiones y el rendimiento.

La superioridad predictiva de *LightGBM* no solo se manifiesta en métricas globales, sino que se valida mediante un análisis riguroso de la distribución de sus residuales. Al contrastar este algoritmo con arquitecturas lineales como *ElasticNet*, se observa que *LightGBM* logra una concentración de errores significativamente mayor en torno al valor cero, mitigando la dispersión en los extremos de la curva de rendimiento. Esta reducción en la varianza del error confirma que el modelo captura eficazmente las interacciones no lineales, permitiendo una base sólida para la interpretación mediante valores *SHAP* (Fig 4)

C. *Análisis del Espacio de Características*

La aplicación del algoritmo *mRMR* permitió reducir el espacio dimensional a un conjunto estable de 15 predictores clave, jerarquizados por su relevancia técnica en la Fig 5. Estos se categorizan en tres dimensiones críticas:

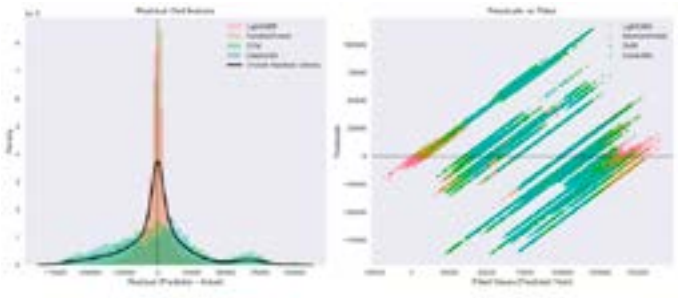


Fig 4. Análisis de diagnóstico de residuales del modelo UniCrop. A la izquierda se observa la distribución de errores (Residual Distributions), donde la curva rosa de LightGBM muestra la mayor precisión centrada en cero. A la derecha (Residuals vs Fitted), el gráfico de dispersión confirma la estabilidad del modelo a través de los diferentes rangos de rendimiento proyectados para la caña de azúca

- Propiedades Edafológicas: El pH del suelo (phh2o) y el contenido de carbono orgánico (ocd) emergieron como los factores de mayor relevancia técnica y física.
- Teleconexiones y Clima: Se identificaron señales de impacto de largo plazo mediante variables rezagadas, específicamente la temperatura del punto de rocío con 6 y 12 meses de retraso (*DEW POINT TEMPERATURE_lag_6/12*) y la temperatura máxima rezagada un año (*T2M_MAX_lag_12*).

- Dinámica de Vegetación y Radar: Índices como el *CIredge* y la desviación estándar de la retrodispersión de radar (*VV_stdDev*) aportaron información crucial sobre la estructura del dosel y el vigor del cultivo durante la campaña.

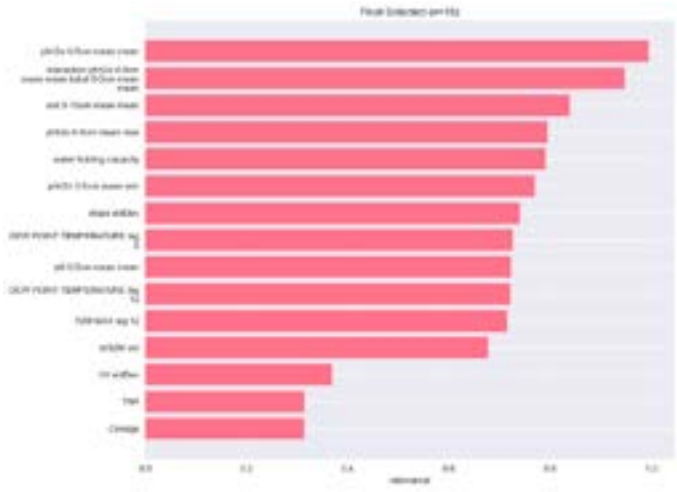


Fig 5. Selección estadística de características mediante relevancia *mRMR*. Se presentan las 15 variables que alimentan el modelo, destacando el predominio del pH del suelo (phh2o) y el carbono orgánico (ocd) como factores físicos determinantes, junto con la influencia de variables climáticas rezagadas ligadas a Teleconexiones climáticas.

D. *Interpretabilidad con IA Explicable (XAI).*

El uso de valores de atribución de características permitió trascender la métrica de importancia global para entender la dirección y magnitud del impacto de cada variable, constituyéndose en el insumo principal de la herramienta de visualización para el entendimiento y toma de decisiones, que es el trabajo futuro de esta investigación. Se destaca la importancia de la temperatura del punto de rocío con 12 meses de retraso, evidenciando la persistencia de las señales climáticas del ENSO, tal como se visualiza en el gráfico de resumen de la Fig 6.

- Impacto de las propiedades del suelo: La media del pH del suelo (phh2o_0-5cm_mean_mean) es el factor con mayor impacto positivo en la predicción del rendimiento; valores altos de pH desplazan significativamente la predicción hacia rendimientos superiores.
- Efecto de la materia orgánica: El gráfico de resumen de atribución de características revela que concentraciones bajas de carbono orgánico (ocd_5-15cm) penalizan el rendimiento, actuando como un limitante biológico claro.
- Influencia de teleconexiones: Las variables climáticas rezagadas muestran una distribución de impacto bimodal. Por ejemplo, anomalías en la temperatura máxima de hace 12 meses influyen directamente en la ventana de decisión actual, lo que respalda la hipótesis de que las fases del ENSO tienen efectos residuales en la fertilidad y humedad acumulada del suelo.

E. *Análisis de caso: Respuesta del modelo ante el evento El Niño 2023-2024*

Para evaluar la sensibilidad del modelo ante extremos climáticos, se analizó el comportamiento de las predicciones durante el evento El Niño 2023-2024. En este periodo, el modelo identificó una caída en el rendimiento de la caña de azúcar asociada a valores críticos de déficit de presión de vapor (*VPD*) y anomalías en las temperaturas máximas rezagadas (*T2M_MAX_lag_12*). Los valores *SHAP* revelaron que, durante los meses de mayor estrés hídrico, la importancia de las variables de suelo (pH y Carbono Orgánico) actuó como un factor de amortiguación o agravamiento de la pérdida, demostrando que la resiliencia del cultivo en el norte del Cauca depende de la interacción no lineal entre la calidad del suelo y el forzamiento climático de gran escala.

CONCLUSIONES

La presente investigación permitió validar la eficacia de una arquitectura de ingeniería de datos integrada para el modelado de la productividad agrícola del cultivo de la caña de azúcar para los municipios del norte del departamento del Cauca, bajo la influencia de teleconexiones climáticas. A continuación, se detallan los hallazgos fundamentales:

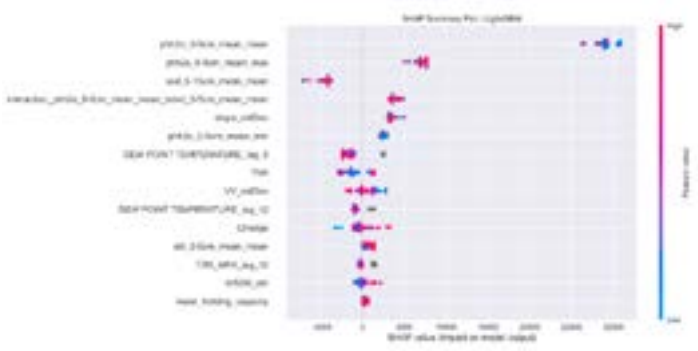


Fig 6. Atribución de variables mediante Explicaciones Aditivas de Shapley (SHAP). El gráfico de resumen (Summary Plot) descompone la contribución individual de cada característica. Los puntos rojos hacia la derecha indican que valores altos de la variable (ej. pH o carbono orgánico) incrementan la predicción de rendimiento, permitiendo una comprensión intuitiva de la física del modelo.

- Eficacia de la armonización multi-fuente: La implementación del pipeline *UniCrop* demostró ser una solución robusta para superar el cuello de botella técnico asociado a la ingesta de datos heterogéneos. La integración exitosa de series climáticas horarias de *ERA5-Land,* productos satelitales *Sentinel* y datos edafológicos de *SoilGrids* permitió construir un espacio de características de alta dimensionalidad (177 variables iniciales) capaz de capturar la complejidad biofísica del territorio.
- Superioridad del modelado no lineal: Los resultados experimentales confirman que los algoritmos de aprendizaje supervisado, específicamente *LightGBM*, poseen una habilidad predictiva significativamente superior (R^2 = 0.9518; MAE = 6475.03 kg/ha) en comparación con modelos lineales tradicionales como *ElasticNet* (R^2 = 0.3662). Esto sugiere que el impacto de teleconexiones climáticas en el cultivo de caña de azúcar en el norte del Cauca, no sigue patrones de correlación simple, sino que está mediado por interacciones no lineales y efectos de umbral que solo arquitecturas de gradiente aumentado pueden capturar con precisión.
- Transparencia Algorítmica mediante *XAI:* el uso de explicaciones aditivas de Shapley (*SHAP*), permitió desmitificar la naturaleza de "caja negra" del modelo. Se identificó que la acidez del suelo (phh2o) y el contenido de carbono orgánico (ocd) son los predictores con mayor impacto positivo en el rendimiento del cultivo de caña de azúcar, mientras que variables climáticas rezagadas, como la temperatura del punto de rocío con 12 meses de retraso (*DEW POINT TEMPERATURE_lag_12*), actúan como indicadores tempranos de anomalías térmicas residuales ligadas al ciclo ENSO.
- Identificación de teleconexiones críticas: la investigación reveló que el rendimiento de la caña de azúcar en la región del norte del Cauca es altamente

sensible a factores de estrés "compuestos" (*compound drivers*). La relevancia de índices como el *CIredge* y el radar *VV_stdDev* demuestra que la variabilidad estructural del cultivo de caña de azúcar, detectada mediante percepción remota, es un integrador clave del estrés hídrico y térmico inducido por fenómenos de tele conexión global.

Tras la obtención y validación de estos resultados, la fase subsiguiente de esta investigación consiste en la integración de estos valores de atribución (*SHAP*) en un *framework* de visualización multidimensional. Este enfoque busca traducir las contribuciones matemáticas de cada variable climática y edafológica en interfaces visuales comprensibles para tomadores de decisiones y actores del sector agropecuario. El objetivo final es dotar al sistema de la transparencia necesaria para que las predicciones de IA no solo sean precisas, sino que aporten al descubrimiento de nuevas hipótesis agronómicas y mejoren la resiliencia climática regional mediante una comprensión intuitiva de los factores de riesgo identificados.

Para garantizar que el framework de visualización multidimensional trascienda la evaluación técnica algorítmica y sea adoptado de manera efectiva por los actores del sector agropecuario, la validación final del sistema incorporará métricas estructuradas de interacción humano-computadora (HCI). Específicamente, se ejecutarán pruebas de usabilidad y sesiones de diseño iterativo centrado en el usuario, empleando herramientas estandarizadas como la Escala de Usabilidad del Sistema (SUS) y cuestionarios de interpretabilidad percibida. Este enfoque permitirá cuantificar la carga cognitiva del usuario final al interpretar las atribuciones espaciotemporales de los valores SHAP, asegurando que la transparencia matemática del modelo se traduzca en una herramienta de alerta temprana intuitiva y aplicable para la toma de decisiones agronómicas frente a las teleconexiones del ENSO.

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa su agradecimiento al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación del Gobierno de Colombia por el apoyo recibido a través de la Convocatoria 933: Formación en doctorados Nacionales con enfoque territorial, étnico y de género en el marco de la Política Orientada por Misiones (2023). De igual forma, agradece el apoyo financiero recibido por parte de la Universidad del Cauca para la participación en el evento.

REFERENCIAS

[1] Gobernación del departamento del Cauca, "Plan departamental de extensión agropecuaria del Cauca: PDEA Cauca 2020-2023," 2020.

[2] Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, "Informe de composición sectorial del PIB - departamento del Cauca," 2024.

[3] V. Lizcano and O. Bedoya, "ENSO-teleconnections associated with soil, plant, rainfall and temperature dynamics and their impacts on rice crops detected by remote sensing and machine learning techniques," Preprint, ResearchGate, 2023.

[4] C. Barrios-Perez et al., "How does El Niño Southern Oscillation affect rice-producing environments in central Colombia?" Agric. Forest Meteorol., vol. 306, p. 108443, 2021.

[5] N. Sazib, L. E. Mladenova, and J. D. Bolten, "Assessing the impact of ENSO on agriculture over Africa using earth observation data," Front. Sustain. Food Syst., vol. 4, p. 509914, 2020.

[6] A. Dikshit, B. Pradhan, and M. Santosh, "Artificial neural networks in drought prediction in the 21st century–A scientometric analysis," Appl. Soft Comput., vol. 114, p. 108080, 2022.

[7] A. del C. Ruiz Cabarcas, "Análisis del impacto de los fenómenos El Niño y La Niña en la producción agrícola del departamento del Atlántico," Tesis de maestría, Univ. Nacional de Colombia, 2012.

[8] U. H. Wannasingha, M. Waqas, S. Ahmad, A. Wangwongchai, and P. Dechpichai, "Quantification and prediction of the impact of ENSO on rainfed rice yields in Thailand," Environ. Challenges, vol. 19, p. 101123, 2025.

[9] B. Wang, P. Feng, C. Waters, and J. Cleverly, "Quantifying the impacts of pre-occurred ENSO signals on wheat yield variation using machine learning in Australia," Agric. Forest Meteorol., vol. 291, p. 108043, 2020.

[10] T. Hu et al., "Crop yield prediction via explainable AI and interpretable machine learning: Dangers of black box models for evaluating climate change impacts on crop yield," Agric. Forest Meteorol., vol. 336, p. 109458, 2023.

[11] M. von Bloh et al., "Machine learning for soybean yield forecasting in Brazil," Agric. Forest Meteorol., vol. 341, p. 109670, 2023.

[12] R. Chapman et al., "Crop response to El Niño-Southern Oscillation related weather variation to help farmers manage their crops," Sci. Rep., vol. 11, no. 1, p. 8292, 2021.

[13] J. Cock, D. Jiménez, H. Dorado, and T. Oberthür, "Operations research and machine learning to manage risk and optimize production practices in agriculture: Good and bad experience," Curr. Opin. Environ. Sustain., vol. 62, p. 101278, 2023.

[14] M. Ryo, "Explainable artificial intelligence and interpretable machine learning for agricultural data analysis," Artif. Intell. Agric., vol. 6, pp. 257-265, 2022.

[15] Y.-G. Ham, J.-H. Kim, and J.-J. Luo, "Deep learning for multi-year ENSO forecasts," Nature, vol. 573, no. 7775, pp. 568–572, 2019.

[16] V. Hassija, V. Chamola, A. Mahapatra, and B. Goyal, "Interpreting black-box models: A review on explainable artificial intelligence," Cognit. Comput., vol. 16, pp. 45–74, 2024.

[17] D. E. Mathew, D. U. Ebem, A. C. Ikegwu, P. E. Ukeoma, and N. F. Dibiaezue, "Recent emerging techniques in explainable artificial intelligence to enhance the interpretable and understanding of AI models for human," Neural Process. Lett., vol. 57, no. 1, p. 16, 2025.

[18] R. P. Porfirio, P. A. Santos, and R. N. Madeira, "Enhancing digital agriculture with XAI: Case studies on tabular data and future directions," in Companion Proc. 26th Int. Conf. Multimodal Interaction, 2024, pp. 211-217.

[19] M. B. Girmay, J. Droste, H. Deters, and J. Doerr, "Explainability needs in agriculture: Exploring dairy farmers' user personas," in Proc. 2025 IEEE 33rd Int. Requirements Eng. Conf. Workshops (REW), 2025, pp. 432-438.

[20] C. J. Dagua-Paz and G. Ramirez-Gonzalez, "Uso de inteligencia artificial explicable (XAI) en estudios del impacto del ENSO en la agricultura: una revisión de alcance," 2025 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), Popayan, Colombia, 2025, pp. 1–6.

[21] B. A. Toms, E. A. Barnes, and I. Ebert-Uphoff, "Physically interpretable neural networks for the geosciences: Applications to Earth system variability," J. Adv. Model. Earth Syst., vol. 12, no. 9, p. e2019MS002002, 2020.

[22] J. Mardian, C. Champagne, B. Bonsal, and A. Berg, "Understanding the drivers of drought onset and intensification in the Canadian Prairies: Insights from explainable artificial intelligence (XAI)," J. Hydrometeorol., vol. 24, no. 8, pp. 2035–2055, 2023.

[23] E. Khidirova and O. Karakuş, "UniCrop: A Universal, Multi-Source Data Engineering Pipeline for Scalable Crop Yield Prediction"..Applied Sciences, 16 (10), 4724, 2026.

Causas raíz de las fallas de interoperabilidad en la gestión de proyectos de construcción: Un análisis temático bajo el marco PMBOK®

1st Oscar Portilla-Carreño
Estudiante de Doctorado en Ingeniería Civil
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia
oscar2228074@correo.uis.edu.co

2nd Laura Muñoz
Estudiante de pregrado en Ingeniería Civil
Universidad Industrial de Santander
laura2220202@correo.uis.edu.co

3nd *Guillermo Mejía*
Profesor
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Santander
gmejia@uis.edu.co

***Resumen*— El sector de la construcción representa un pilar económico fundamental, cuya complejidad operativa exige una coordinación precisa entre diversos sistemas y agentes. En dicho contexto, el uso de modelos BIM y de tecnologías de automatización resulta esencial para la estandarización de la información. Sin embargo, la aplicación desarticulada de estas herramientas suele derivar en una degradación de la calidad de los datos a lo largo del ciclo de vida del proyecto. En este escenario, la interoperabilidad se posiciona como un factor determinante para un flujo informativo continuo y sin pérdidas. Hasta ahora, investigaciones previas han priorizado soluciones de carácter técnico, tales como los esquemas IFC, y han desatendido la relación sistémica con la gestión de proyectos, en particular, la interoperabilidad organizacional. Por tanto, resulta indispensable un análisis exhaustivo de los sistemas de gestión para comprender las causas raíz de sus ineficiencias en la interacción. Considerando lo anterior, el propósito de este artículo es identificar las causas raíz de las fallas de interoperabilidad en los sistemas de gestión de proyectos, tomando como referencia los procesos establecidos en el PMBOK para la construcción. Para ello, se aplicó la metodología de análisis temático de Braun y Clarke a 342 artículos validados provenientes de SCOPUS. El proceso de codificación permitió estructurar los temas fundamentales que originan las fallas de interoperabilidad. Los resultados arrojan ocho causas primordiales, entre las cuales la falta de reglas de gobernanza y la fragmentación del almacenamiento de datos se consolidan como grandes obstáculos. Factores adicionales, como la resistencia cultural y la dependencia de software comercial, también merman la capacidad de integración. La persistencia de estos problemas se traduce en una pobre coordinación y en un incumplimiento sistemático de los indicadores de desempeño de los proyectos. En conclusión, el fortalecimiento de la interoperabilidad organizacional es vital para garantizar la trazabilidad de la información en la Industria 4.0. Académicamente, el estudio aborda la desatención del eje de la interoperabilidad organizacional en la literatura científica; en el ámbito práctico, subraya que la mejora de la interoperabilidad exige un enfoque integral que armonice procesos, roles y personas más allá de la mera implementación tecnológica.**

Keywords*—*Interoperabilidad, Transformación Digital, Análisis temático

I. INTRODUCCIÓN

El sector de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC), caracterizado por su complejidad operativa, constituye un pilar fundamental para la economía de un país, pues exige una adecuada coordinación entre diversos sistemas, procesos y actores [1], [2]. En el contexto actual de dicho sector, la transformación digital y la adopción de metodologías como el Building Information Modeling (BIM) han surgido como soluciones esenciales para la estandarización de la información y la mejora de la productividad [3], [4]. Sin embargo, la implementación fragmentada de estas tecnologías suele derivar en una falta de articulación de los procesos y en una disminución progresiva de la calidad de los datos a lo largo de

todo el ciclo de vida de los proyectos [5], [6]. Esta falta de articulación constituye una falla de interoperabilidad.

La interoperabilidad es la capacidad de diversos sistemas para operar, intercambiar y utilizar información de manera fluida y coherente, garantizando un flujo informativo continuo a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto [5], [6]. No obstante, pese a los avances tecnológicos actuales, el sector AEC aún enfrenta barreras críticas que obstaculizan dicha continuidad. Tradicionalmente, las investigaciones sobre interoperabilidad en construcción han priorizado soluciones de carácter técnico, centradas en sistemas de intercambio como el estándar IFC (*Industry Foundation Classes*) [7], [8] desatendiendo la relación sistémica con los diversos procesos de gestión de proyectos [1], [2]. La literatura reciente muestra avances en el plano técnico [3], [9], [10], pero desatiende el aspecto organizacional de la interoperabilidad, en el que convergen los procesos empresariales, los factores humanos y las reglas de gobernanza [4], [5], una carencia que limita cualquier solución puramente técnica y exige un análisis integrador.

Esta falta de interoperabilidad entre los procesos organizacionales afecta directamente el desempeño de los proyectos [2], [11]. Por ejemplo, el almacenamiento aislado de información y la pérdida de integridad en la transferencia de datos reflejan una falla sistémica en la integración de los procesos de gestión de proyectos [12], [13]. De acuerdo con el marco de gerencia de proyectos PMBoK[14], la gestión exige unificar, consolidar y coordinar los procesos para asegurar el éxito. No obstante, la falta de una gobernanza formalmente definida [1], [15] y la dependencia de software comercial [6], [16] fragmentan los procesos de gestión de costos, cronogramas y recursos, entre otros aspectos. Esta fragmentación dificulta la toma de decisiones fundamentadas en evidencias y datos unificados, requiriendo enfoques que consideren la dimensión organizacional en la interoperabilidad, más allá de solo soluciones técnicas [2], [4].

La escasa investigación que vincule las causas raíz de las fallas de interoperabilidad con las áreas de conocimiento o con los procesos de gestión de proyectos representa un vacío tanto académico como práctico. Académicamente, los estudios existentes abordan la interoperabilidad desde perspectivas técnicas o semánticas desconectadas [17], [18] sin integrar la dimensión organizacional. En la práctica, los equipos de gerencia no cuentan con una hoja de ruta que les permita diagnosticar y resolver las ineficiencias de integración desde una perspectiva de gestión [2], [4]. El presente estudio aborda este vacío proponiendo un marco conceptual que vincula las causas raíz de la interoperabilidad con los procesos de gestión de proyectos.

Ante este vacío, este estudio adopta un enfoque de revisión sistemática para identificar las causas raíz predominantes de las fallas de interoperabilidad en los sistemas de gestión del sector AEC. Para ello, se toma como referencia la guía de gerencia de proyectos del PMI para la construcción, específicamente sus 12 Áreas de Conocimiento (6ª edición del PMBoK). A pesar de la publicación de ediciones posteriores, esta referencia se seleccionó porque trata explícitamente las áreas de conocimiento como categorías operativas promoviendo la integración de sistemas y procesos directamente aplicables a la gestión de proyectos de construcción [19].

Al abordar la interoperabilidad desde su dimensión organizacional y analizar la integración de los procesos de gestión [2], [5], se busca trascender la mera implementación de la interoperabilidad tecnológica para proponer un enfoque sistémico e integral que equilibre procesos, roles y personas en el marco de la Industria 4.0 [1], [4]. Si bien el análisis se circunscribe a las publicaciones científicas indexadas en Scopus y excluye la literatura gris y las conferencias, el estudio garantiza un corpus homogéneo y de alto rigor para su análisis.

II. METODOLOGÍA

Para lograr el propósito del estudio, se realizó un análisis temático siguiendo los lineamientos de Braun y Clarke [20] sobre un corpus de artículos indexados en Scopus [14]. La metodología se estructuró en tres fases principales. Estas fases permitieron: a) obtener un corpus de documentos validados; b) identificar las principales causas raíz de los problemas de interoperabilidad en la gestión de proyectos de construcción; y c) alinearlos con las 12 áreas de conocimiento y sus procesos, según la 6ª edición del PMBoK para la construcción.

A. Estrategia de búsqueda y consolidación.

La interoperabilidad se abordó desde una perspectiva integral y transdisciplinaria que vincula los principios de la ingeniería de sistemas y de software [18]. Con este fin, se construyó una ecuación de búsqueda booleana [19] mediante un

proceso iterativo que incluyó: la identificación de conceptos clave y términos afines; la formulación de ecuaciones piloto; y su refinamiento progresivo. La ecuación resultante se aplicó en Scopus, como se expone a continuación.

La siguiente ecuación de búsqueda fue realizada el 1 de marzo de 2026 en la base de datos SCOPUS: ((KEY ("construction industry" OR "construction engineering" OR "construction management" OR "Construction project management" OR "project management" OR "portfolio management" OR "Building project management" OR "Architectural, Engineering, and Construction" OR "Engineering, Procurement, and Construction")) OR (TITLE ("construction industry" OR "Construction engineering" OR "Construction management" OR "Construction project management" OR "project management" OR "portfolio management" OR "Building project management" OR "Architectural, Engineering, and Construction" OR "Engineering, Procurement, and Construction"))AND ((KEY (interoperab* OR inter-operab*)) OR (TITLE (interoperab* OR inter-operab*)))

Con el objetivo de capturar las investigaciones más recientes, se estableció un rango de fechas de publicación entre 2003 y 2026. Los resultados se filtraron por las áreas temáticas de Ingeniería, Ciencias de la Computación, Negocios y Gestión, y Ciencias de la Decisión. Asimismo, la búsqueda se restringió a artículos de revista y actas de conferencias en inglés. Se obtuvo una muestra inicial de 615 documentos. A esta muestra se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión detallados en la siguiente fase.

B. Criterios de exclusión y ajuste.

Sobre la muestra inicial de 615 documentos, se aplicaron criterios de exclusión para descartar investigaciones que no abordaran la disciplina ni el propósito del estudio, tales como documentos relacionados con la medicina, la aeronáutica, el análisis estructural o el diseño arquitectónico. En su lugar, se seleccionaron artículos que abordaran la gestión de proyectos y los procesos de gestión de costos, cronogramas, seguridad y construcción, así como temas de sostenibilidad y BIM aplicados a la gestión de la construcción [4], [16], [21]. Tras esta primera selección temática, se descartaron 191 documentos, quedando una muestra de 424. Posteriormente, se eliminaron los estudios redundantes o duplicados, ya que, según estudios previos, estos afectan la consistencia de los análisis sistemáticos. A continuación, los autores realizaron una validación manual para excluir a quienes presentaban metadatos incompletos (ausencia de autores o de resumen). Tras este proceso, se obtuvo una muestra final depurada de 342 documentos, que sirvió de base para el análisis temático descrito en la siguiente subsección.

C. Fase del análisis temático

Complementariamente, se utilizó la herramienta de inteligencia artificial NotebookLM [22] como apoyo al proceso de análisis temático, extrayendo secciones esenciales (objetivo, metodología y resultados) de cada artículo del corpus final. Con base en el objetivo, la metodología y los resultados de cada uno de los 342 artículos seleccionados, se realizó la codificación descriptiva y conceptual para identificar los temas y subtemas que permitieran determinar las causas predominantes de las fallas de interoperabilidad, siguiendo los lineamientos de Braun y Clarke [20]. Este procedimiento evitó incluir información redundante en los resúmenes sintéticos elaborados por los autores, lo que agilizó la identificación de patrones temáticos.

Para el proceso de codificación, se utilizó NotebookLM para extraer 10 códigos descriptivos (centrados en la tecnología y los métodos) y generar 10 códigos conceptuales (enfocados en el razonamiento y la teoría) a partir del objetivo, la metodología y los resultados de los artículos. Con base en estos códigos, se identificaron temas y patrones recurrentes y se relacionaron con las 12 áreas de conocimiento del PMBoK. Este mapeo permitió identificar qué áreas concentran la mayor cantidad de fallas de interoperabilidad.

Para validar los resultados, los autores verificaron aleatoriamente la relación entre los temas, los extractos codificados y el conjunto total de datos [20]. Se aplicaron los criterios de homogeneidad interna, es decir, la coherencia de los datos dentro de cada tema, como criterios de heterogeneidad externa, es decir diferencias evidentes entre temas. La comprobación de que los problemas de interoperabilidad eran consistentes en todos los artículos asignados a cada tema confirmó el cumplimiento de ambos criterios, garantizando la validez del análisis [5], [13].

III. RESULTADOS

Los resultados de la codificación y la consolidación temática de la muestra final de 342 artículos del corpus permitieron caracterizar ocho causas raíz de fallas de interoperabilidad en el intercambio de

información en proyectos del sector AEC, así como establecer su correspondencia con los doce procesos del PMBoK. Estas causas raíz constituyen los principales problemas a intervenir. A continuación, los resultados se presentan organizados por causa raíz. Este esquema de organización permite examinar cómo cada una contribuye a la fragmentación del flujo de información entre actores, sistemas y etapas del ciclo de vida del proyecto, sentando las bases para intervenciones orientadas a la interoperabilidad.

A. Causa 01: Fragmentación en el almacenamiento de datos.

Entre las causas identificadas, esta primera causa constituye una barrera estructural en la que la información técnica y administrativa se almacena en sistemas desarticulados, lo que impide unificar información técnica y administrativa, como cronogramas, costos y recursos, en un entorno coherente [1], [2], [4]. La falta de interoperabilidad, derivada de repositorios cerrados sin vocabulario compartido, obliga a los equipos de gestión a tomar decisiones con datos fragmentados y desactualizados [5]. En el marco del PMBoK, esta desarticulación limita la gestión de la integración y la capacidad del gerente para coordinar áreas de conocimiento [14]. Asimismo, esta causa afecta otros sistemas de gestión, como la gestión del valor ganado, al imposibilitar la integración de las líneas base para medir el desempeño del proyecto [1]. En conjunto, la fragmentación estructural de la información debilita la cohesión del proyecto, restringe las herramientas analíticas y compromete el monitoreo y control del trabajo [4].

B. Causa 02: Inconsistencia técnica en los flujos BIM para la gestión del proyecto.

A diferencia de la fragmentación estructural de la información, esta causa afecta las dimensiones semánticas y geométricas del intercambio. Surge de discrepancias técnicas durante la transferencia de datos entre modelos paramétricos BIM e interfaces digitales [23], [24]. La falta de sincronización bidireccional hace que la representación digital no refleje la realidad física, comprometiendo simulaciones y seguimiento [3], [25]. En el contexto del PMBoK, esta incompatibilidad afecta la gestión del alcance y la calidad, particularmente la validación del alcance [7], [14]. Sin correspondencia exacta entre el modelo y lo construido, el equipo de gestión no puede asegurar formalmente que los entregables cumplan los requisitos [11]. En síntesis, la incoherencia técnica reduce la precisión del control, provoca desviaciones no detectadas y genera trabajos adicionales costosos que impiden una validación formal del alcance.

C. Causa 03: Complejidad técnica y costo de sensores IoT

A diferencia de las causas anteriores, esta causa relaciona obstáculos económicos y tecnológicos. Se relaciona con el alto costo de instalación y la complejidad técnica para integrar tecnologías de captura de datos que alimenten los modelos digitales [3], [9]. Esta combinación dificulta la interoperabilidad del monitoreo en tiempo real e impide que los datos del entorno físico fluyan hacia sistemas centralizados [10]. En el marco del PMBoK, esta causa afecta a gestión de recursos y la HSSE al dificultar el monitoreo proactivo de personal y equipos [3], [9]. Además, impacta la gestión financiera, pues las inversiones no planificadas en la instrumentalización para la gestión del mantenimiento alteran los flujos de caja previstos [4], [25]. En conjunto, el costo y la complejidad técnica limitan el monitoreo durante la ejecución del proyecto y generan desviaciones financieras que pueden persistir hasta la etapa de operación del activo.

D. Causa 04: Conflictos semánticos en la extracción de datos de documentos no estructurados

Mientras que las causas previas eran barreras físicas, técnicas y económicas, esta cuarta causa aborda los conflictos semánticos y terminológicos. Esta causa se define por la falta de consenso terminológico en contratos, especificaciones y textos legales, y relación problemática con la parametrización BIM y la inteligencia artificial [17]. Esta falta genera fallas de interoperabilidad en la gestión de contratos, pues la variedad semántica en el sector AEC dificulta la transferencia de información contractual [24], [26]. Según el PMBoK, esta causa compromete la integridad de las actas de constitución y formalización del proyecto, así como del plan de dirección, ya que la información extraída mediante el procesamiento del lenguaje natural puede distorsionar las necesidades reales de los interesados [14]. En gestión de la calidad, dificulta establecer criterios de aceptación claros y afecta la validación de entregables [27]. En conjunto, los conflictos semánticos obstaculizan la planificación y socavan la validez de los procesos de calidad al introducir ambigüedad en los criterios de aceptación.

E. *Causa 05: Barreras de brecha digital*

Por su parte, esta causa se refiere a barreras de acceso, de capacidades y de adopción tecnológica. Esta causa se manifiesta en dificultades para visualizar y reportar información, lo que genera fallas de interoperabilidad en la gestión de interesados y de comunicaciones [23], [28]. En el marco del PMBoK, esta brecha digital obstaculiza la transferencia de información y genera ruido que afecta el involucramiento de las partes interesadas [2], [15]. La generación e interpretación inadecuadas de modelos visuales integrados o de tableros de control inmersivos impiden tomar decisiones informadas en entornos dinámicos [23], [24]. La brecha digital no solo responde a limitaciones de acceso, sino también a la falta de conocimiento y dominio de los procesos y del uso de la tecnología. En síntesis, estas condiciones convergen para reducir la calidad del intercambio de información, retrasar la toma de decisiones y debilitar la coordinación multidisciplinaria exigida por la Industria 4.0 [5].

F. *Causa 06: Falta de gobernanza y mandatos gubernamentales*

Esta causa se refiere a la ausencia de marcos normativos y estratégicos. La falta de gobernanza y mandatos gubernamentales impacta negativamente el intercambio masivo de información al carecer de políticas organizacionales y de estándares que exijan protocolos abiertos como OpenBIM [16], [29]. En el marco del PMBoK, esta ausencia actúa como un factor ambiental externo negativo, afectando la gestión de la integración, la contratación y los proveedores [14]. Sin un mandato estratégico claro que normalice los procesos colaborativos, la coordinación de compras y la distribución de datos técnicos permanecen fragmentadas, perpetuando ineficiencias contractuales [16]. Algunos autores subrayan que la falta de políticas regulatorias impide incluso la medición sistemática del impacto ambiental mediante el análisis de ciclo de vida integrado con BIM, limitando la inclusión de la sostenibilidad en proyectos [30], [31]. En conjunto, la ausencia de gobernanza fragmenta la coordinación contractual, compromete la gestión de proveedores y obstaculiza la integración entre BIM y la sostenibilidad.

G. *Causa 07: Pérdida de información As-Built*

Esta causa afecta la continuidad de la información a lo largo de las fases del ciclo de vida. La pérdida crítica de información as-built ocurre durante la transición de la construcción a la operación y al mantenimiento del activo. La transferencia de datos incompletos o inconsistentes desde la construcción hacia la operación anula su utilidad práctica para el mantenimiento preventivo de activos de infraestructura [12], [13]. Cada transferencia representa un punto de vulnerabilidad en el que los modelos digitales del activo o infraestructura pierde riqueza informacional, comprometiendo la fase de operación [32]. En el marco del PMBoK, esta causa afecta el proceso de cierre del proyecto o de una fase y la gestión financiera, pues la baja confiabilidad impide gestionar adecuadamente los beneficios económicos durante la vida de servicio del proyecto [4], [13]. La falla en la transferencia de conocimiento técnico al finalizar la construcción del proyecto degrada la rentabilidad esperada por el propietario [12].

H. *Causa 08: Dependencia crítica de software comercial*

Esta causa restringe la interoperabilidad mediante esquemas rígidos que impiden la legibilidad en múltiples plataformas y la transferencia transparente de información entre aplicaciones [7], [8]. Ecosistemas de información cerrados subordinan la soberanía del dato y de la información a intereses comerciales, lo que limita la colaboración abierta [16]. En el marco de la gestión de proyectos del PMBoK, esta causa afecta la gestión de la integración, las comunicaciones y la gestión del cambio del proyecto, al limitar la capacidad del equipo para unificar resultados sin depender de un proveedor de software o plataforma digital específico [2], [14]. Esta dependencia tecnológica reduce la agilidad necesaria para realizar el control integrado de cambios, dejando la información crítica del proyecto atrapada en formatos no interoperables que dificultan el flujo óptimo entre especialidades técnicas y aumentan la fragmentación del sector [5], [6].

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

A partir de los resultados del estudio, esta sección interpreta la relevancia relativa de las ocho causas raíz y su efecto en las áreas de conocimiento y en los procesos del PMBoK. Para ello, se comparan sistemáticamente dichas causas mediante tres indicadores: frecuencia normalizada de artículos asociados, número de procesos afectados y una métrica de impacto compuesta (ver Ilustración 01). La discusión no solo jerarquiza las causas, sino que también revela patrones diferenciales de vulnerabilidad en la gestión de proyectos. En conjunto, los hallazgos aquí discutidos permiten

orientar acciones correctivas prioritarias y proponer futuros estudios que contribuyan a la interoperabilidad en la industria AEC.

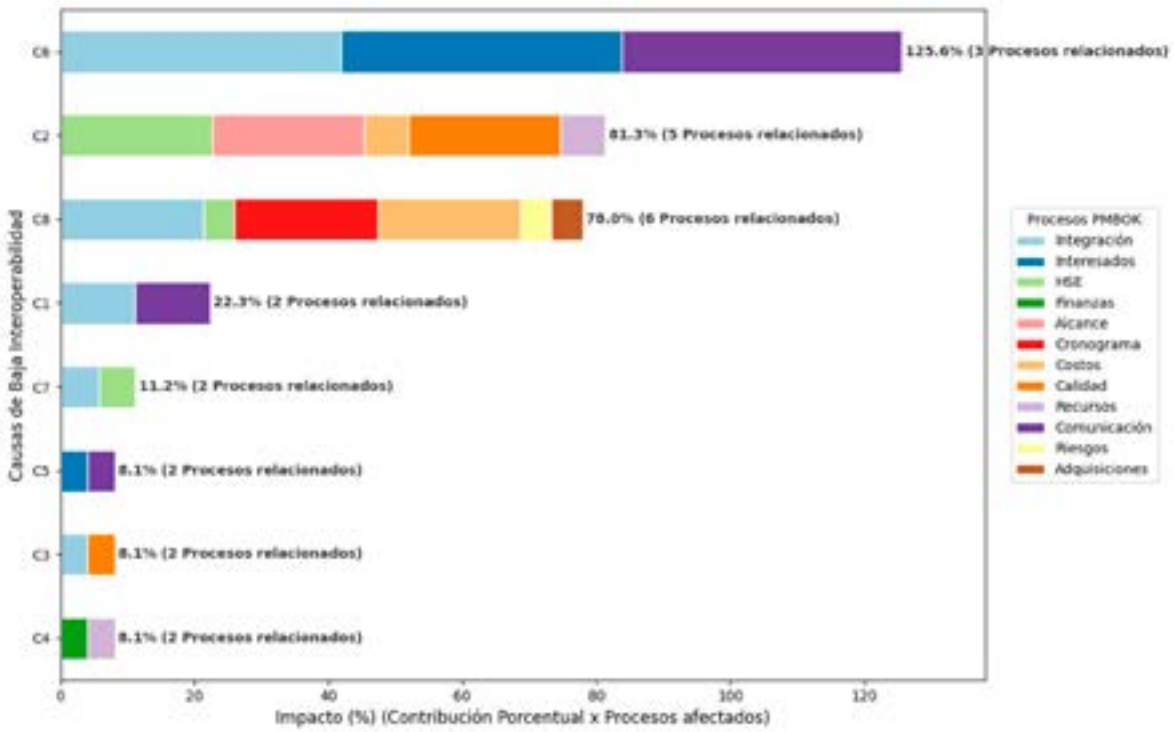


Ilustración 1: Distribución de impacto de causas raíz por proceso asociado del PMBoK

La discusión de los resultados enfatiza que la efectividad de la gestión de proyectos en entornos asistidos tecnológicamente (por ejemplo, con herramientas BIM) no depende exclusivamente de resolver limitaciones técnicas de interoperabilidad, sino de establecer primero una gobernanza que permita la interoperabilidad de los procesos de gestión. Bajo este enfoque, las dos causas de mayor impacto encontradas en este estudio presentan naturalezas complementarias pero jerarquizadas. La falta de gobernanza y de mandatos gubernamentales (Causa 6) actúa como una barrera sistémica a la interoperabilidad, anula el rol integrador del gerente de proyecto e impide la articulación adecuada de procesos entre las áreas de conocimiento de Integración, de Interesados y de Comunicación, en detrimento de la eficiencia en la gestión del proyecto. Por su parte, la inconsistencia técnica en los flujos BIM (Causa 2) impacta en áreas operativas como Alcance, Calidad y Costos, generando desalineaciones críticas que incrementan el retrabajo. Resolver la causa técnica C2 sin abordar la causa organizacional C6 resulta insuficiente: la interoperabilidad técnica solo es efectiva cuando la interoperabilidad de los procesos de gestión ha sido previamente garantizada mediante un marco de gobernanza claro.

Tal como se plantea en esta discusión, la interoperabilidad de los procesos de gestión constituye un prerrequisito ineludible que debe preceder y enmarcar cualquier solución de carácter técnico o comercial. Otro hallazgo del estudio indica que la dependencia crítica de software comercial (Causa 8) es multidimensional y afecta seis áreas del PMBoK: riesgos, financiera, adquisiciones, cambios, colaboración entre especialidades e integración. Por consiguiente, constituye el mayor obstáculo para la autonomía de los datos. La naturaleza comercial-estructural de esta Causa 8 evidencia cómo la dependencia de un proveedor específico convierte la interoperabilidad en un instrumento de captura de mercado, no en una herramienta de eficiencia colectiva. La incapacidad para consolidar información de distintos dominios, sin restricciones de formato, limita la agilidad en la gestión de cambios y en la colaboración abierta. Resolver la interoperabilidad de los procesos de gestión mediante estándares abiertos y gobernanza de datos es condición sine qua non para que cualquier mejora técnica o comercial no quede atrapada en la lógica del proveedor.

En síntesis, la interoperabilidad de los procesos de gestión debe preceder a cualquier solución técnica o comercial para garantizar la efectividad de la toma de decisiones y de la gestión en proyectos de construcción. Esto implica que los gestores de proyectos en entornos BIM no pueden limitarse a resolver inconsistencias técnicas puntuales (Causa 2 y Causa 4) ni a atender dependencias de software comercial (Causa 8). Deben priorizar, en primer lugar, el fortalecimiento de la gobernanza (Causa 6) y la estandarización de los procesos de integración que resuelvan la fragmentación estructural de los datos (Causa 1), la pérdida de información as-built (Causa 7) y las brechas digitales (Causa 5). Asimismo, el análisis que causas como la complejidad técnica y el costo de la tecnología (Causa 3) exigen una planificación financiera transversal desde fases tempranas de gestión del proyecto. En consecuencia, el equipo de gerencia de proyectos debe implementar políticas organizacionales que exijan estándares abiertos, formación continua en competencias digitales y mecanismos de transferencia de información que aseguren la continuidad operativa. Solo así se garantiza que las inversiones tecnológicas se traduzcan en eficiencia colectiva y no en mayor fragmentación

V. CONCLUSION

La presente investigación ha permitido identificar y jerarquizar las causas raíz de las fallas de interoperabilidad en la gestión de proyectos de construcción mediante un análisis temático de 342 artículos científicos.

El estudio revela que las fallas más críticas de la interoperabilidad en el sector AEC no residen en las limitaciones de los esquemas de datos (como IFC), sino en la ausencia de gobernanza y de mandatos gubernamentales. Esta causa presenta el mayor impacto general y afecta transversalmente los procesos de integración, de gestión de interesados y de comunicaciones. Sin un marco regulatorio claro, la interoperabilidad técnica queda subordinada a intereses comerciales individuales. En consecuencia, cualquier estrategia de transformación digital en el sector AEC debe priorizar el diseño de políticas organizacionales y de estándares abiertos obligatorios antes que las inversiones exclusivamente tecnológicas.

En segundo lugar, el estudio revela que la inconsistencia técnica en los flujos BIM constituye una causa de gran impacto en la interoperabilidad del sector AEC, afectando los procesos de gestión del alcance, la calidad, los recursos y los costos. Esta inconsistencia entre el modelo digital y la realidad física del proyecto inhibe la capacidad del equipo de gestión para validar los entregables en tiempo real, lo que afecta la gestión de la calidad por retrabajo y errores no detectados. Por consiguiente, resolver esta causa exige no solo mejores estándares de intercambio de datos, sino también su adopción obligatoria en un marco de gobernanza que garantice la sincronización bidireccional y la verificación continua del desempeño.

En tercer lugar, el estudio confirma que la pérdida de información as-built constituye el punto de mayor impacto adverso sobre el valor informativo de la gestión del proyecto y del activo. La pérdida de datos durante la transferencia entre la construcción y la operación impide una gestión eficiente de los activos y compromete la gestión del costo total del ciclo de vida y el mantenimiento predictivo. Por consiguiente, resolver esta causa de transferencia de información exige estándares obligatorios para la entrega de modelos as-built y políticas de gobernanza que aseguren la continuidad semántica desde la ejecución hasta la operación, condición sine qua non para capitalizar la inversión tecnológica del proyecto.

Por último, en la parte práctica, el estudio encuentra que la dependencia de software comercial y de formatos cerrados, aunque con un impacto porcentual menor, afecta a una mayor diversidad de procesos —seis en total—, incluidos Riesgos, Finanzas y Adquisiciones. Esta dependencia desarticula la información, restringe la autonomía de los datos y limita la agilidad necesaria en el marco de la Industria 4.0. Por lo tanto, mitigar la causa exige ir más allá de soluciones técnicas puntuales: se requiere una política de estándares abiertos obligatorios y una gobernanza de datos que garantice la portabilidad y la neutralidad tecnológica, condición indispensable para que la interoperabilidad no quede subordinada a intereses comerciales.

El presente estudio también aborda un vacío académico relevante: la falta de integración entre la interoperabilidad técnica y la gestión de proyectos, al vincular sistemáticamente las causas raíz de la desintegración informacional con las Áreas de Conocimiento del PMBoK. Desde esta perspectiva, se subraya que analizar la eficiencia del sector AEC no debe limitarse a las nuevas herramientas TIC, se requiere, además, abordar la transformación

cultural y organizacional que armonice procesos, roles y personas, para que el equipo de gerencia del proyecto ejerza su función integradora de manera efectiva. Por tanto, la interoperabilidad de los procesos de gestión constituye el prerrequisito ineludible sin el cual cualquier inversión tecnológica seguirá fragmentada y subordinada a intereses particulares no sistémicamente integradores.

REFERENCIAS

[1] R. J. Scherer and S. E. Schapke, "A distributed multi-model-based Management Information System for simulation and decision-making on construction projects," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 25, no. 4, pp. 582–599, Oct. 2011, doi: 10.1016/J.AEI.2011.08.007.

[2] E. Atencio, M. Mancini, and G. Bustos, "Ontology-Based Integration of Enterprise Architecture and Project Management: A Systems Thinking Approach for Project-Based Organizations in the Architecture, Engineering, and Construction Sector," *Systems 2025, Vol. 13, Page 477*, vol. 13, no. 6, p. 477, Jun. 2025, doi: 10.3390/SYSTEMS13060477.

[3] S. Kookalani *et al.*, "Mapping digital twin applications in infrastructure and the built environment across research types, methods, sectors, phases, and scales," *Autom. Constr.*, vol. 182, p. 106778, Feb. 2026, doi: 10.1016/J.AUTCON.2026.106778.

[4] S. Latreille and P. Marcombe, "Time, Cost and Quantity Interoperability: A New Common Language for General Contractors," *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 628 LNCE, pp. 674–685, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-84208-5_50.

[5] Ž. Turk, "Interoperability in construction – Mission impossible?," *Developments in the Built Environment*, vol. 4, p. 100018, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.DIBE.2020.100018.

[6] S. Shirowzhan, S. M. E. Sepasgozar, D. J. Edwards, H. Li, and C. Wang, "BIM compatibility and its differentiation with interoperability challenges as an innovation factor," *Autom. Constr.*, vol. 112, p. 103086, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.AUTCON.2020.103086.

[7] M. L. R. Antunes, K. M. L. César, J. C. L. Ribeiro, D. S. de Oliveira, and J. M. F. de Carvalho, "Analysis of IFC interoperability data schema for project representation," *Autom. Constr.*, vol. 166, p. 105650, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.AUTCON.2024.105650.

[8] M. Q. Huang, H. M. Zhu, J. Ninić, and Q. B. Zhang, "Multi-LOD BIM for underground metro station: Interoperability and design-to-design enhancement," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 119, p. 104232, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.TUST.2021.104232.

[9] R. Liu and M. Fischer, "Ontology-Based Modeling and Reasoning for Construction Field Context," *Journal of Management in Engineering*, vol. 42, no. 1, p. 04025059, Jan. 2026, doi: 10.1061/JMENEA.MEENG-6778;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER.

[10] V. Muppavarapu and G. Ramesh, "Synergy of Building Information Models and Semantic Web of Things for Next-Generation Building Intelligence," *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, vol. 750 IFIPAICT, pp. 29–42, 2026, doi: 10.1007/978-3-031-98364-1_3.

[11] N. Minh Nguyen, "Advancing Clash Resolution in Digital Construction Models: A Practice-Oriented Analytical Perspective," *Civil and Environmental Engineering*, 2026, doi: 10.2478/CEE-2026-0063.

[12] A. Celoza, "Contractor Perspectives of Digital Project Deliverables: An Exploratory Study," *Computing In Civil Engineering 2024: Building Information Modeling, Digital Twins, and Simulation and Visualization - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2024*, pp. 263–267, 2024, doi: 10.1061/9780784486122.028.

[13] L. Zhu, M. Shan, and Z. Xu, "Critical review of building handover-related research in construction and facility management journals," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 28, no. 1, pp. 154–173, Feb. 2021, doi: 10.1108/ECAM-10-2018-0442.

[14] *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK)*. Project Management Institute, 2017.

[15] F. J. B. Díaz, A. L. Vega, A. A. Cepeda, and F. B. Aparicio, "Introducing BIM into ACCIONA, an international construction company: Actual real-case examples," Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering, 2013.

[16] F. Jalaei, S. Davari, Y. Sultan, C. Cozzitorto, E. Poirier, and A. Shahi, "Analysis of openBIM Adoptions and Implementations: Global Perspectives and Canadian Industry Adoption," *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in*

Construction, pp. 1323–1327, 2024, doi: 10.22260/ISARC2024/0174.

[17] H. Asadollahi, R. El Meouche, Z. Zheng, M. Eslahi, and E. Farazdaghi, "Bridging building information systems: A parameter-efficient semantic approach to construction data interoperability," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 155, p. 110680, Sep. 2025, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2025.110680.

[18] A. Adibfar and A. M. Costin, "Evaluation of IFC for the Augmentation of Intelligent Transportation Systems (ITS) into Bridge Information Models (BrIM)," *Computing in Civil Engineering 2019: Visualization, Information Modeling, and Simulation - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2019*, pp. 177–184, 2019, doi: 10.1061/9780784482421.023.

[19] *Construction extension to the PMBOK guide*. Project Management Institute, Inc., 2016.

[20] V. Braun and V. Clarke, "Using thematic analysis in psychology," *Qual. Res. Psychol.*, vol. 3, no. 2, pp. 77–101, 2006, doi: 10.1191/1478088706qp063oa.

[21] S. M. Soliman, H. Hegazy, J. Zhang, I. M. Mahdi, A. K. Dessouki, and I. A. Rashid, "Integrated BIM Framework for the Implementation of Steel Structure Projects," *Journal of Architectural Engineering*, vol. 31, no. 2, p. 04025006, Jun. 2025, doi: 10.1061/JAEIED.AEENG-1771;WGROUP:STRING:PUBLICATION.

[22] "NotebookLM." Accessed: Apr. 27, 2026. [Online]. Available: https://notebooklm.google.com/

[23] J. G. Lee, "Investigation of Extended Reality Application for Model-Based Collaboration," *Computing in Civil Engineering 2023: Visualization, Information Modeling, and Simulation - Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2023*, pp. 326–331, 2024, doi: 10.1061/9780784485231.039;JOURNAL:JOURNAL:CONFERENCE_PROCEEDINGS;WGROUP:STRING:PUBLICATION.

[24] S. U. Rehman, K. E. Hwang, and I. Kim, "Semantic-enriched framework for asynchronous bidirectional BIM data exchange with immersive visualization platform," *Autom. Constr.*, vol. 178, p. 106409, Oct. 2025, doi: 10.1016/J.AUTCON.2025.106409.

[25] R. M. Pavón, O. Galao, M. A. Pardo, and M. G. Alberti, "Digital Twin development and implementation for the management of irrigation networks," *Expert Syst. Appl.*, vol. 297, p. 129330, Feb. 2026, doi: 10.1016/J.ESWA.2025.129330.

[26] S. You, H. W. Ji, H. Kwak, T. Chung, and M. Bae, "Schema-Agnostic Data Type Inference and Validation for Exchanging JSON-Encoded Construction Engineering Information," *Buildings 2025, Vol. 15, Page 3159*, vol. 15, no. 17, p. 3159, Sep. 2025, doi: 10.3390/BUILDINGS15173159.

[27] K. Farghaly, R. Soman, and J. Whyte, "cSite ontology for production control of construction sites," *Autom. Constr.*, vol. 158, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.AUTCON.2023.105224.

[28] J. Marinho, F. Sá, J. Durães, I. Fonseca, and N. C. Martins, "A Systematic Literature Review of Augmented Reality's Development in Construction," *Electronics (Switzerland)*, vol. 15, no. 1, p. 225, Jan. 2026, doi: 10.3390/ELECTRONICS15010225/S1.

[29] D. Mzyece, I. E. Ndekugri, and N. A. Ankrah, "Building information modelling (BIM) and the CDM regulations interoperability framework," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 26, no. 11, pp. 2682–2704, Jun. 2019, doi: 10.1108/ECAM-10-2018-0429.

[30] A. Aragón, P. Spudys, D. Pupeikis, Ó. Nieto, and M. Garcia Alberti, "Bridging Interoperability Gaps Between LCA and BIM: Analysis of Limitations for the Integration of EPD Data in IFC," *Buildings 2025, Vol. 15, Page 2760*, vol. 15, no. 15, p. 2760, Aug. 2025, doi: 10.3390/BUILDINGS15152760.

[31] E. F. Y. Liew, D. E. L. Ong, and M. I. Peerun, "Mapping the future of sustainable construction: Review on digitalisation and life cycle assessment trends in Asia-pacific," *Energy Build.*, vol. 350, p. 116547, Jan. 2026, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2025.116547.

[32] J. N. Jiang, T. F. P. Henning, and Y. Zou, "Digital Transformation in Asset Management-A Case of BIM Adoption in New Zealand Local government".

Financiarización del café arábica y distribución desigual del valor para los pequeños productores

Carlos Hernán Suárez-Rodríguez
Escuela de Ingeniería Industrial
Universidad del Valle
Cali, Colombia
https://orcid.org/0000-0002-1304-3646

Diego Fernando Manotas-Duque
Escuela de Ingeniería Industrial
Universidad del Valle
Cali, Colombia
https://orcid.org/0000-0003-0148-9840

Esteban Largo-Avila
Vicerrectoría de Regionalización
Universidad del Valle
Caicedonia, Colombia
https://orcid.org/0000-0001-6047-1523

***Abstract*— Este estudio analiza la formación y transmisión del precio del café en Colombia en el contexto de mercados de commodities crecientemente financiarizados. En particular, examina la evolución del diferencial entre precios de futuros y spot, así como su asociación con la participación de actores financieros y su comportamiento en relación con la transmisión del precio internacional hacia el mercado interno. Aunque el precio interno del café arábica se encuentra estructuralmente anclado al precio internacional y a la tasa de cambio, la evidencia empírica sugiere la presencia de divergencias persistentes entre ambos mercados y posibles desacoples en su dinámica conjunta. A partir de un enfoque empírico basado en dos décadas de datos históricos (2004/05 a 2024/25), el análisis integra precios internacionales, indicadores de posicionamiento especulativo y series de precios locales para identificar patrones y cambios en la dinámica reciente del mercado. Los resultados muestran un ensanchamiento persistente del diferencial, particularmente a partir de 2020, acompañado de una mayor variabilidad del spread y de señales consistentes con transformaciones en la dinámica del mercado. Asimismo, se observa una asociación positiva entre la participación de actores financieros y la magnitud del spread. Finalmente, se documenta que la transmisión del precio internacional al mercado interno no es completa, en la medida en que una proporción del diferencial entre mercados no se refleja plenamente en el precio recibido por los productores. En conjunto, los resultados son consistentes con un mayor desacople entre la dinámica de formación de precios en los mercados financieros y su expresión en el mercado físico.**

Keywords*— *café de Colombia, financiarización del café, mercado de futuros, precio del café, riesgo financiero,

I. INTRODUCCIÓN

La formación del precio del café en Colombia refleja la influencia de los mercados internacionales de commodities, donde los precios domésticos dependen principalmente de señales externas. Para el café arábica, el precio de referencia se fija en Nueva York (contrato C), que actúa como un mecanismo clave de descubrimiento de precios al incorporar expectativas sobre oferta, demanda, inventarios y condiciones macroeconómicas globales [1]. En este contexto, el precio interno se configura a partir de una estructura predominantemente exógena, anclada al precio internacional y mediada por la tasa de cambio, lo que sitúa a los productores, en términos estructurales, como agentes precio-aceptantes en la cadena de valor [2].

Desde la economía de commodities, los mercados de futuros facilitan la gestión de riesgos mediante instrumentos de cobertura y contribuyen al proceso de descubrimiento de precios [3]. Sin embargo, la evidencia señala que esta función no siempre se materializa de manera estable, ya que la relación entre precios spot y futuros es dinámica y sensible a factores como la especulación y las condiciones del mercado, lo que genera desviaciones respecto de los fundamentos físicos [4]. Por ello, los precios que reciben los productores pueden variar respecto de los internacionales, debido a condiciones tanto coyunturales como estructurales.

La literatura sobre mercados agrícolas señala que los precios se forman a partir de la interacción entre oferta y demanda, incorporando variables como condiciones climáticas, tecnología, costos de producción, niveles de ingreso y precios de bienes sustitutos y complementarios [5]. En este contexto, los shocks de corto plazo, como variaciones en la producción o eventos climáticos adversos, generan fluctuaciones transitorias, mientras que los factores estructurales configuran las tendencias de largo plazo, particularmente en economías abiertas expuestas a dinámicas globales.

La liberalización del mercado cafetero tras la disolución del Acuerdo Internacional del Café en 1989 marcó un punto de inflexión en los mecanismos de fijación de precios, al eliminar los esquemas de cuotas y consolidar la referencia del mercado internacional [6]. Este proceso se ha asociado con un aumento de la volatilidad y una mayor participación de actores financieros, lo que ha reconfigurado la cadena de valor y otorgado mayor protagonismo a traders, tostadores e inversionistas.

En América Latina, y particularmente en Colombia, esta reconfiguración ha ampliado los determinantes del precio interno más allá de las condiciones productivas locales, incorporando de manera creciente factores macroeconómicos y financieros. En este contexto, la literatura ha documentado que la volatilidad del precio internacional y de la tasa de cambio se asocia con variaciones en los ingresos de los pequeños caficultores, con implicaciones para la estabilidad del sector [7].

Estudios recientes destacan que los mercados de futuros introducen dinámicas mediante comportamientos especulativos que influyen en precios internacionales y diferenciales entre orígenes, ocasionando desviaciones temporales respecto a los

fundamentos físicos [8]. Este fenómeno se vincula a la financiarización de los mercados de commodities, donde inversionistas financieros aumentan la liquidez, al tiempo que pueden intensificar la volatilidad y afectar los mecanismos de transmisión de precios [1].

En consecuencia, la formación del precio del café en Colombia se debe a la interacción entre mercados físicos y financieros, donde la transmisión internacional de precios no es mecánica, sino que está mediada por factores cambiarios, condiciones del mercado y dinámicas especulativas. Aunque esta estructura facilita la integración del país en los mercados globales, también genera fricciones en la transmisión de precios, que pueden derivar en divergencias entre el valor internacional del café y los ingresos de los productores, afectando la eficiencia, equidad y sostenibilidad del sector.

A diferencia de estudios previos centrados exclusivamente en volatilidad, transmisión de precios o especulación financiera, este trabajo analiza de manera integrada la evolución del diferencial entre precios de futuros y spot, la participación de actores financieros y los mecanismos de transmisión hacia el mercado interno colombiano. El análisis se basa en dos décadas de información histórica de los ciclos cafeteros (2004/05 a 2024/25), lo que permite evaluar la evolución del diferencial de precios y su relación con los cambios recientes en la dinámica financiera del mercado. Además, el estudio incorpora una aproximación distributiva mediante la estimación del valor no transmitido al productor, con el fin de evaluar posibles desacoples entre la dinámica financiera del mercado del café y los ingresos percibidos en el mercado interno.

En este contexto, persiste un vacío en la literatura sobre cómo la interacción entre mercados financieros y físicos influye en la formación del diferencial entre los precios de futuros y spot, así como en su transmisión al precio interno en países productores como Colombia. Aunque se reconoce que la determinación de precios es predominantemente exógena y que los mercados de futuros desempeñan un papel central en el descubrimiento de precios, existe evidencia limitada sobre la magnitud, persistencia y posibles determinantes de los desacoples entre precios internacionales e internos, así como sobre el papel de la participación financiera en estos procesos.

Frente a esta brecha, el estudio busca responder las siguientes preguntas de investigación:

RQ1. ¿Cómo ha evolucionado el diferencial entre los precios de futuros y spot en el mercado del café arábica?

RQ2. ¿Cuál es la relación entre la participación de los actores financieros en los mercados de futuros y la magnitud del diferencial de precios?

RQ3. ¿Cómo se asocia el diferencial entre los precios de futuros y spot con la transmisión del precio internacional al mercado interno del café en Colombia?

RQ4. ¿La dinámica reciente del mercado es consistente con procesos de financiarización asociados a cambios en la formación y transmisión de precios?

En línea con estas preguntas, el estudio analiza de manera integrada la evolución del diferencial de precios, la participación financiera y los mecanismos de transmisión hacia el mercado interno, con el objetivo de identificar posibles desacoples entre la dinámica financiera del mercado del café y los ingresos percibidos por los productores.

II. Metodología

A. Intensidad financiera del mercado vs. producción física

Se construyó un panel a nivel de ciclo cafetero, integrando dos décadas de información histórica sobre el volumen negociado en mercados de futuros [9] y sobre la producción mundial [10]. El volumen se convirtió a unidades físicas homogéneas (millones de sacos de 60 kg). Se definió un indicador de intensidad financiera como:

$$\mathrm{IF}_t = \frac{\mathrm{Volumen}_t^{\mathrm{futuros}}}{\mathrm{Producción}_t^{\mathrm{mundial}}} \tag{1}$$

Este indicador permite caracterizar la evolución relativa entre la profundidad financiera del mercado y la oferta física.

B. Brecha futuros-spot y transmisión de precios

Se construyó una serie diaria alineando los precios de futuros (contrato ICE Coffee C nearby) con los precios spot. A partir de estas series se definió el diferencial de precios:

$$\mathrm{Spread}_t = \mathrm{F}_t - \mathrm{P}_t^{\mathrm{spot}} \tag{2}$$

Para analizar la transmisión al mercado interno colombiano, se transformaron los precios internos a USD/lb mediante la tasa de cambio diaria (TRM) y la equivalencia física de la carga (125 kg). Se definió el indicador de transmisión como:

$$\mathrm{Transmisión}_t = \frac{\mathrm{P}_t^{\mathrm{int}}}{\mathrm{P}_t^{\mathrm{ICE}}} \times 100 \tag{3}$$

y su complemento:

$$\mathrm{N\text{-}transmisión}_t = 100 - \mathrm{Transmisión}_t \tag{4}$$

C. Ajuste por inflación y construcción de precios reales

Con el fin de evaluar el desacople en términos económicos, los precios se deflactaron con el índice de precios al consumidor (IPC), obteniendo series en términos reales (COP por libra, base = 100). Adicionalmente, el diferencial de precios se expresó en unidades monetarias directamente interpretables para el productor mediante:

$$\mathrm{VNT}_t = \mathrm{S}_t^{\mathrm{real}} \phi \tag{5}$$

Donde VNT_t representa el valor no transmitido en el periodo t, expresado en USD por carga; $\mathrm{S}_t^{\mathrm{real}}$ es la brecha real entre el precio de futuros y el precio spot (USD/lb); y ϕ es el factor de conversión a carga, definido como el número de libras por carga de 125 kg ($\phi = 275.58$ lb/carga). Lo que permite traducir el desacople en una medida de ingreso no percibido.

D. *Posicionamiento especulativo*

Los datos de posicionamiento se obtuvieron de los reportes Disaggregated Commitments of Traders (COT) para el contrato Coffee C [11]. Se utilizaron las posiciones de money managers (MM) como proxy de actividad especulativa y se construyeron las siguientes métricas: (i) Participación en posiciones largas (%) y (ii) Posición neta:

$$\mathrm{MM}_t^{\mathrm{net}} = \mathrm{MM}_t^{\mathrm{long}} - \mathrm{MM}_t^{\mathrm{short}} \quad (6)$$

Estas variables se integraron con las series de precios mediante alineación temporal.

E. *Dinámica de mercado y presión direccional*

Para capturar la dinámica del mercado, se calcularon retornos semanales del contrato de futuros:

$$r_t = \ln\left(\frac{F_t}{F_{t-1}}\right) \quad (7)$$

Adicionalmente, se utilizó el indicador detailed netting measure (DNM) para caracterizar la presión compradora o vendedora de los distintos tipos de agentes [12].

F. *Regímenes de especulación*

Los regímenes de especulación se definen mediante una discretización no paramétrica de la distribución de $\mathrm{MM}_t^{\mathrm{long}}$, utilizando los percentiles 25 (P25) y 75 (P75) como umbrales [13]. Este enfoque permite capturar la heterogeneidad sin imponer supuestos distribucionales, en línea con los enfoques de segmentación de regímenes en econometría [14]. La estabilidad de los resultados se evaluó mediante umbrales alternativos de discretización (P20-P80 y P30-P70), a fin de verificar que los hallazgos no dependieran de la especificación base P25-P75.

G. *Estrategia econométrica*

Se estimó el siguiente modelo mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) con errores robustos HAC (Newey-West), como:

$$\mathrm{Spread}_t = \beta_0 + \beta_1 \Delta \ln(\mathrm{TRM}_t) + \beta_2 \mathrm{MM\_l⍰ng}_t + \varepsilon_t \quad (8)$$

Donde Spread_t representa el diferencial de precios en términos reales, $\Delta \ln(\mathrm{TRM}_t)$ es la variación del tipo de cambio, y $\mathrm{MM\_long}_t$ representa la participación especulativa. El modelo permite evaluar la asociación entre el diferencial de precios y los factores financieros, controlando por las condiciones macroeconómicas.

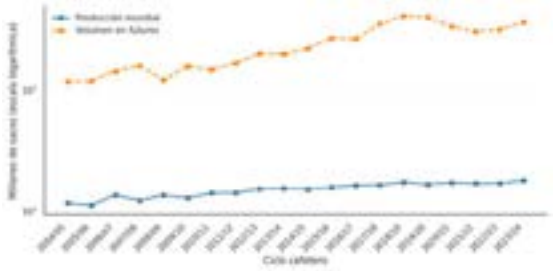
III. Resultados

A. *Intensificación de la financiarización del mercado del café*

La comparación entre la producción física mundial y el volumen negociado en mercados de futuros, ambos expresados en millones de sacos de 60 kg, sugiere una brecha estructural persistente. Como se observa en la Fig. 1, representada en escala logarítmica, mientras que la producción mundial presenta una trayectoria relativamente estable, el volumen negociado en mercados de futuros exhibe una expansión significativamente más acelerada, particularmente a partir de la década de 2010, alcanzando máximos en los ciclos cafeteros 2018/19-2019/20.

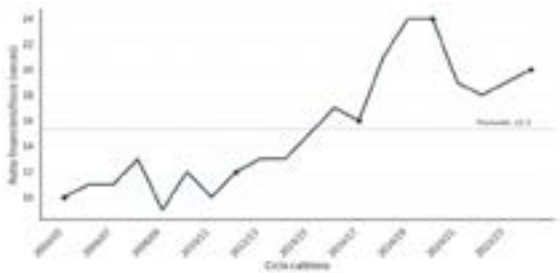
Esta divergencia refleja un crecimiento desproporcionado del componente financiero frente al mercado físico.

FIGURA 1. EVOLUCIÓN COMPARADA DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CAFÉ Y EL VOLUMEN NEGOCIADO EN MERCADOS DE FUTUROS



Este comportamiento también se respalda al analizar la relación entre el volumen negociado en futuros y la producción mundial (intensidad financiera), cuya evolución apunta a un proceso de cambio estructural en la profundidad del mercado (ver Fig. 2).

FIGURA 2. EVOLUCIÓN DEL RATIO ENTRE VOLUMEN NEGOCIADO EN MERCADOS DE FUTUROS Y PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CAFÉ



Durante el periodo 2004/05-2011/12, la razón se mantiene relativamente estable entre 10 y 13 veces, con un mínimo cercano a 9 en 2008/09. A partir de 2012/13 se identifica un cambio de régimen, caracterizado por una expansión sostenida del mercado financiero que culmina en niveles cercanos a 24 veces la producción física en 2018/19-2019/20.

Posteriormente, el indicador se estabiliza en niveles elevados (≈18-20), lo que sugiere la persistencia de una brecha entre los mercados financiero y físico. Este patrón es consistente con un mayor peso relativo del mercado de futuros frente a la producción global y podría interpretarse como coherente con procesos de financiarización documentados en los mercados de commodities [15].

B. *Reconfiguración del mercado (interés abierto)*

Como se muestra en la Fig. 3, el análisis de la composición del interés abierto, elaborado a partir de los reportes Commitments of Traders de la Commodity Futures Trading Commission, sugiere una reconfiguración progresiva en la estructura del mercado de futuros.

FIGURA 3. PARTICIPACIÓN DEL INTERÉS ABIERTO LARGO POR TIPO DE AGENTE (%)

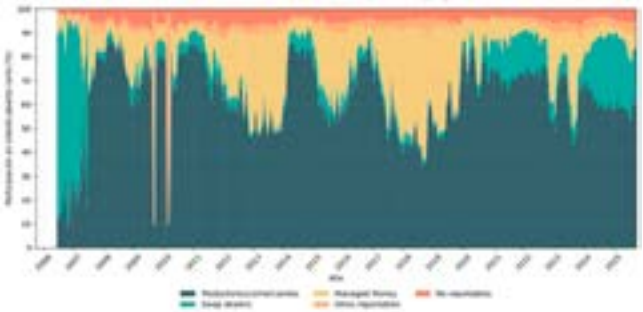


La participación de MM; que agrupa inversionistas institucionales con estrategias especulativas, muestra un incremento sostenido, pasando de 11.57% en los primeros registros a 36.65% en la fase más reciente (aumento de 25.08 p.p.). En términos generales, este comportamiento evidencia una relativa estabilidad durante 2006-2019 (≈21.7%), seguida de un aumento en el período 2020-2025 (≈26.37%).

En contraste, los swap dealers; intermediarios financieros que canalizan la exposición de inversionistas institucionales hacia el mercado de futuros, presentan una trayectoria descendente, reduciendo su participación de 25.43% a 15.58% (−9.85 p.p.), con una tendencia negativa estadísticamente significativa ($R^2 \approx 0.39$; $p < 0.01$), más consistente que la observada para MM ($R^2 \approx 0.05$; $p < 0.01$).

Por su parte, como se observa en la Fig. 4, las posiciones cortas están altamente concentradas en el grupo de productores/comerciantes; agentes que utilizan los contratos de futuros principalmente con fines de cobertura.

FIGURA 4. PARTICIPACIÓN DEL INTERÉS ABIERTO CORTO POR TIPO DE AGENTE (%)



Estos actores dominan persistentemente este segmento, con participaciones entre 50% y 90%, aunque se identifican episodios de reducción (≈40-55%) que coinciden con aumentos en la participación de MM.

En términos dinámicos, se distinguen tres fases: (i) alta volatilidad (2006-2010), (ii) estabilidad relativa (2011-2016) y (iii) mayor rotación y heterogeneidad (2017-2025).

La comparación entre las Fig. 3 y 4 sugiere una asimetría en la participación de los MM según posición. Las posiciones largas muestran un aumento progresivo en años recientes, mientras que las cortas siguen siendo limitadas frente al dominio de productores/comerciantes.

Este patrón es consistente con una mayor inclinación de los MM hacia estrategias direccionales, mientras actores comerciales siguen centrados en cobertura. Estos resultados sugieren una asimetría en el mercado; mientras actores financieros toman más posiciones largas, los comerciales mantienen su enfoque en cobertura.

C. *Presión especulativa y brecha futuro-spot*

La actividad especulativa se asocia positivamente con la brecha futuro-spot tanto al considerar la proporción de posiciones largas como la posición neta. La relación es consistentemente más fuerte para la proporción de posiciones largas y permanece estable bajo medidas de correlación paramétricas y no paramétricas. En particular, el porcentaje de posiciones largas alcanza correlaciones de $\rho \approx 0.57$ (Pearson) y $\rho \approx 0.56$ (Spearman), mientras que la posición neta presenta valores de $\rho \approx 0.45$ y $\rho \approx 0.46$, respectivamente.

En términos dinámicos, los retornos semanales; definidos como la variación porcentual del precio, muestran un comportamiento consistente con la dirección del posicionamiento financiero. Tienden a ser positivos bajo la presión compradora de los MM y negativos cuando predomina la presión vendedora. Este efecto se intensifica cuando los participantes comerciales (PMPU) adoptan posiciones opuestas. En particular, los retornos promedio alcanzan 2.40% cuando los MM mantienen posiciones compradoras y los PMPU mantienen posiciones vendedoras, mientras que descienden a −2.34% bajo la configuración inversa.

Cuando los MM adoptan posiciones vendedoras, se intensifica la presión de venta en el mercado de futuros, ejerciendo presión bajista sobre los precios. Este mecanismo no refleja un exceso de oferta física, sino un desbalance en el flujo de órdenes, coherente con la literatura de microestructura que identifica el order imbalance como un determinante clave de la dinámica de precios [16]. De forma consistente, la evidencia en mercados de futuros muestra que la liquidación de posiciones puede amplificar los movimientos descendentes del mercado [17].

D. *Dinámica del desacople en términos reales*

La Tabla I resume los indicadores de transmisión, diferencial futuro-spot y participación de los MM en términos reales (COP por libra ajustados por IPC, base = 100) para los períodos 2017-2019, 2020-2022 y 2023-2025. El spread se define como la diferencia entre el precio de futuros y el precio spot (USD/lb). Su equivalente real corresponde a dicho diferencial expresado en COP por libra constantes y ajustado por inflación.

TABLA I. INDICADORES DE TRANSMISIÓN Y DIFERENCIAL DE PRECIOS

Periodo	TRM (COP/USD)	Spread	Spread real	Transm.	No transm.	MM long
2017/19	3,063.74	0.23	695.98	80.93	19.07	11.62
2020/22	3,898.18	0.20	694.03	88.96	11.04	10.22
2023/25	4,188.91	0.66	1,914.49	73.66	26.34	19.39

El diferencial entre el precio internacional y el interno se mantiene prácticamente estable entre 2017-2019 y 2020-2022 (≈694 a 696 COP/lb), a pesar de la depreciación cambiaria

observada en el segundo periodo. Este patrón sugiere que las variaciones en el tipo de cambio no se traducen en un mayor desacople. Durante el periodo de pandemia se observa, además, un mayor nivel de transmisión (88.96%), consistente con un mecanismo de formación de precios que no presenta deterioros evidentes bajo condiciones macroeconómicas adversas.

Este comportamiento contrasta con la dinámica observada a partir de 2023, donde se identifica un quiebre en la trayectoria reciente; el spread real se eleva hasta ≈1,914 COP/lb, la transmisión se reduce a 73.66% y la participación de los MM aumenta a ≈19.39%.

Esta transición también se refleja en la dinámica temporal de los precios. Como se muestra en la Fig. 5, las series presentan un alto grado de co-movimiento hasta 2022, seguido de una divergencia persistente desde 2023, en la que el precio internacional crece a un ritmo superior al interno, consistente con un debilitamiento en la transmisión.

FIGURA 5. EVOLUCIÓN DEL PRECIO DE REFERENCIA INTERNACIONAL Y DEL PRECIO INTERNO



La Fig. 6 permite contextualizar este resultado al comparar el diferencial con la tasa de cambio. Mientras que en 2020-2022 el aumento de la TRM no se traduce en un mayor spread, a partir de 2023 el diferencial se amplía significativamente, incluyendo episodios superiores a 1.4 USD/lb, sin cambios proporcionales en la tasa de cambio. Así, la evidencia es consistente con la hipótesis de que el desacople reciente no responde principalmente a la dinámica cambiaria, sino a transformaciones en la estructura del mercado asociadas con un mayor peso del componente financiero en la formación de precios.

FIGURA 6. SPREAD (USD/LB) Y TASA DE CAMBIO (TRM)



Esta interpretación se refuerza al analizar los regímenes de especulación. Como muestra la Tabla II, se observa un patrón monotónico; a medida que aumenta la participación de los MM, el diferencial futuro-spot tiende a ampliarse, mientras que la transmisión de precios se reduce.

E. Regímenes de especulación

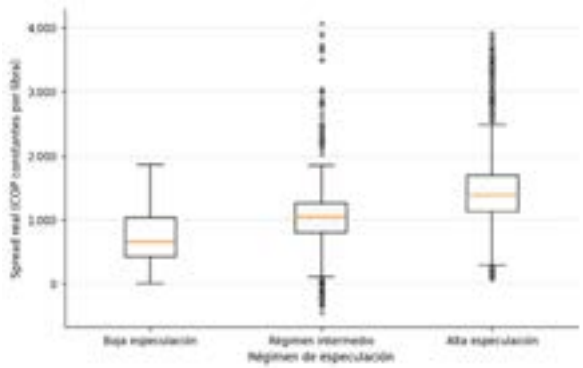
TABLA II. INDICADORES POR RÉGIMEN DE ESPECULACIÓN

Régimen	MM long (%)	MM net	Transm. (%)	No transm. (%)	Spread (USD/lb)	Spread real (COP/lb)
Baja	7.80	-5.54	83.11	16.89	0.23	718.93
Intermedio	14.91	3.70	77.43	22.57	0.34	1013.16
Alta	22.53	38.48	73.28	26.72	0.53	1507.21

Este comportamiento se refleja en magnitudes económicamente relevantes. El spread real aumenta de ≈719 COP/lb en escenarios de baja especulación a ≈1507 COP/lb bajo alta participación de MM, mientras que la transmisión se reduce del 83.11% al 73.28%. Paralelamente, la posición neta de los MM pasa de valores negativos a niveles marcadamente positivos, lo cual es consistente con una mayor exposición neta larga por parte de estos actores.

La evidencia distributiva (Fig. 7) es coherente con estos patrones. La distribución del spread real se desplaza progresivamente hacia valores más altos a medida que aumenta la participación especulativa, acompañado de una mayor dispersión y una mayor frecuencia de valores extremos. En conjunto, estos resultados sugieren una mayor variabilidad e inestabilidad del diferencial bajo regímenes de elevada actividad financiera. Las diferencias entre las distribuciones son estadísticamente significativas según el test de Kruskal-Wallis ($H(2) = 1195.61$; $p < 0.001$).

FIGURA 7. DISTRIBUCIÓN DEL SPREAD REAL POR RÉGIMEN DE ESPECULACIÓN



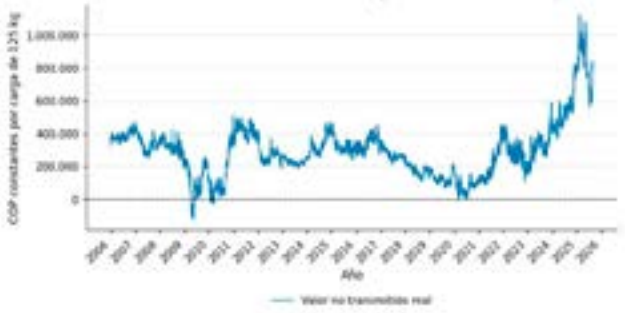
Los resultados se mantienen cualitativamente estables bajo especificaciones alternativas de umbrales (P20-P80 y P30-P70). En todos los casos, los escenarios de mayor participación de los MM presentan mayores diferenciales futuro-spot y menores niveles de transmisión real. Por ejemplo, el spread real promedio aumenta de ≈704-747 COP/lb en regímenes de baja especulación a ≈1476-1573 COP/lb en regímenes de alta especulación, mientras que la transmisión real se reduce de ≈82.3-83.6% a ≈72.8-74.0%. De manera consistente, el valor no transmitido por carga aumenta de ≈194-206 mil COP/carga en escenarios de baja participación financiera a ≈407-433 mil COP/carga en escenarios de alta participación. Asimismo, las diferencias entre regímenes permanecen estadísticamente significativas según el test de Kruskal-Wallis en todas las especificaciones ($H \approx 1141 - 1234; p < 0.001$). En conjunto, la evidencia es consistente con una relación robusta entre la

participación financiera y el desacople de precios, así como con un mayor grado de desacople entre los precios internacionales y los internos asociado a cambios en la composición del mercado.

F. *Impacto económico: Valor no transmitido*

La Fig. 8 muestra la evolución del valor no transmitido al productor en términos reales. Con el fin de aproximar el análisis a las condiciones efectivas de formación de ingresos, los resultados se expresan en precios por carga de 125 kg, unidad que sirve de referencia estándar de negociación en el mercado cafetero colombiano.

FIGURA 8. VALOR NO TRANSMITIDO (COP REALES/CARGA, 125 KG)



Hasta 2022, el valor no transmitido se mantiene en rangos moderados (≈100-400 mil COP por carga). A partir de 2023 se observa un incremento pronunciado, con valores que alcanzan niveles cercanos al millón de pesos por carga. Este cambio es consistente con la ampliación del diferencial futuro-spot documentada en secciones previas y sugiere un impacto económico directo sobre el ingreso de los productores. Para facilitar la interpretación, la Tabla III articula los distintos indicadores del desacople según su dimensión analítica.

TABLA III. MARCO INTERPRETATIVO DE LOS INDICADORES DE DESACOPLE

Variable	Unidad	Dimensión	Lectura
Spread	USD/lb	Financiera	Prima en futuros
Spread real	COP/lb	Económica	Ajustado por IPC
Valor no transmitido	COP/carga	Distributiva	Ingreso no recibido

El spread en USD/lb captura el desacople financiero; su equivalente en COP/lb refleja el desacople económico en términos reales; y el valor no transmitido traduce este diferencial en un impacto distributivo, expresado como ingreso no percibido por el productor.

G. *Evidencia econométrica*

TABLA IV. RESULTADOS DEL MODELO OLS CON ERRORES HAC (NEWEY–WEST)

Variable	Coeficiente β	Error estándar HAC	Estadístico (t)	p-valor
Constante	306.22	49.68	6.16	<0.001
$\Delta \ln(TRM_t)$	-224.23	934.08	-0.24	0.810
MM_t^{long}	49.85	3.57	13.96	<0.001

Estadísticos del modelo: $N = 4895$, $R^2 = 0.245$, R^2ajustado $= 0.245$, estadístico de Durbin–Watson $= 0.049$ y errores robustos HAC (Newey–West).

La estimación econométrica muestra una asociación positiva y estadísticamente significativa entre la participación de los MM y el diferencial futuro-spot. En particular, niveles más altos de participación financiera se asocian con spreads más elevados, incluso al controlar por las variaciones del tipo de cambio. En contraste, la variación de la TRM no muestra una asociación estadísticamente significativa en la especificación estimada.

El modelo presenta un ajuste moderado ($R^2 = 0.245$), consistente con la naturaleza multicausal del proceso de formación de precios en mercados de commodities. Asimismo, el estadístico de Durbin–Watson sugiere una fuerte persistencia temporal en la serie, lo que justifica el uso de errores robustos HAC (Newey–West).

Los resultados son coherentes con la evidencia descriptiva y con los análisis de robustez por regímenes de especulación. En particular, la asociación positiva entre participación financiera y diferencial de precios se mantiene bajo especificaciones alternativas de discretización (P20–P80 y P30–P70), donde los escenarios de mayor participación de MM continúan mostrando spreads reales más elevados, menores niveles de transmisión y mayores valores no transmitidos por carga.

No obstante, los resultados deben interpretarse como asociaciones condicionales y no como evidencia causal, dado que la dinámica de precios en mercados de futuros responde simultáneamente a múltiples factores financieros, comerciales y macroeconómicos.

IV. DISCUSIÓN

A. *Financiarización y transformación estructural del mercado del café*

Los resultados sugieren una transformación progresiva en el mercado del café, marcada por la expansión del componente financiero, el incremento del volumen de derivados negociados y la persistente ampliación del diferencial entre los precios de futuros y spot. Este patrón es consistente con la literatura sobre la financiarización de commodities, que plantea que una mayor participación de inversionistas financieros puede modificar parcialmente los mecanismos de formación de precios, desplazando parte de la influencia de los fundamentos físicos hacia dinámicas relacionadas con la liquidez, las expectativas y la gestión de portafolios [15], [18], [19].

En particular, el aumento del spread y la mayor dispersión observada en la distribución de precios son consistentes con una dinámica en la que la señal de precios refleja en mayor medida factores financieros globales. Evidencia reciente en mercados agrícolas sugiere que este proceso no solo amplía la escala de las transacciones, sino que también fortalece la interconexión entre commodities y otros activos financieros, lo que incrementa la sensibilidad de los precios frente a shocks macroeconómicos y flujos de capital [20].

Desde esta perspectiva, los diferenciales observados en el mercado del café no parecen explicarse únicamente por mecanismos asociados a la teoría del almacenamiento, basada en costos de carry, inventarios y convenience yield [21], sino que son compatibles con un sistema híbrido en el que interactúan fundamentos físicos y dinámicas financieras.

B. *Dinámica conjunta del spread y la volatilidad en el período posterior a 2020*

La evidencia empírica sugiere incrementos simultáneos del spread y de la variabilidad observada del diferencial, particularmente desde 2020, período en el que ambos aumentan de forma persistente. Este comportamiento podría estar asociado a cambios en la dinámica del riesgo y a una mayor persistencia de las fluctuaciones del mercado.

La literatura reciente indica que la dinámica de precios de los commodities agrícolas puede verse influida por condiciones financieras globales, incluidos episodios de estrés financiero y cambios en la liquidez de mercado [22]. En este contexto, el patrón observado es consistente con una mayor sensibilidad del mercado del café frente a factores de naturaleza financiera, lo que podría contribuir tanto a la ampliación del spread como a una mayor variabilidad en su comportamiento.

Por otra parte, la presencia de asimetría positiva y curtosis elevada en la distribución del spread es coherente con la evidencia empírica que documenta distribuciones con colas pesadas en mercados con mayor grado de financiarización [19]. En estos contextos, los eventos extremos tienden a observarse con mayor frecuencia relativa, sin que necesariamente constituyan anomalías aisladas.

En conjunto, estos elementos sugieren que la ampliación del spread no solo refleja cambios en el diferencial entre mercados, sino también variaciones en su dinámica, en un entorno caracterizado por mayor incertidumbre y una creciente interacción con factores financieros

C. *Especulación y microestructura: evidencia desde CFTC*

El análisis de los datos de la CFTC muestra que la actividad especulativa se asocia positivamente con el diferencial entre futuros y spot, y que la proporción de posiciones largas es la métrica con la relación más fuerte con dicho spread. Este resultado sugiere que la presión compradora constituye un mecanismo relevante en la dinámica observada.

En este sentido, la ampliación del spread no solo refleja condiciones de oferta y demanda, sino también presiones derivadas del flujo de órdenes. Este resultado es consistente con estudios sobre la microestructura de los mercados de commodities que destacan el rol de la liquidez y de los flujos de negociación en la formación de precios a corto plazo [18]. De manera complementaria, se ha documentado que los inversionistas financieros pueden amplificar las tendencias de precios mediante mecanismos de retroalimentación, especialmente en contextos de alta incertidumbre [15].

Adicionalmente, la evidencia obtenida mediante el enfoque DNM sugiere que la interacción entre actores financieros (MM) y comerciales no es pasiva, sino estratégica. Los episodios en los que ambos grupos adoptan posiciones opuestas presentan los efectos más pronunciados sobre los retornos, lo que es consistente con evidencia que señala que la interacción entre hedgers y especuladores puede amplificar la volatilidad y generar dinámicas no lineales en la formación de precios [12].

En conjunto, estos resultados son consistentes con una dinámica de co-determinación entre agentes heterogéneos, en la que la señal de precios emerge de la interacción entre estrategias de cobertura y expectativas financieras.

D. *Reconfiguración del mercado: evidencia en el interés abierto*

La evolución del interés abierto sugiere una reconfiguración gradual del mercado, caracterizada por una mayor participación de actores financieros, en particular de los MM, en coexistencia con una predominancia relativamente estable de actores comerciales en las posiciones cortas. Este comportamiento es consistente con la literatura que describe la financiarización como un proceso mediante el cual los commodities adquieren una creciente relevancia en las estrategias de inversión y asignación financiera [11], [18].

Bajo esta perspectiva, los actores comerciales mantienen su función tradicional de cobertura, mientras que los inversionistas financieros introducen dinámicas asociadas a las expectativas, la liquidez y las decisiones de portafolio.

La coexistencia de ambos tipos de agentes es coherente con un sistema de carácter híbrido, en el que la formación de precios responde simultáneamente a fundamentos productivos y a factores financieros. Este tipo de configuración se ha asociado en la literatura con una mayor probabilidad de desacoples temporales entre mercados físicos y financieros, particularmente en entornos de elevada liquidez o volatilidad [19].

E. *Transmisión de precios y distribución del valor*

Los resultados sugieren una transmisión incompleta del precio al productor. Aunque la actividad especulativa muestra una asociación positiva con el precio internacional, la relación negativa entre la brecha futuros-spot y el precio al productor ($\rho \approx -0.57$) es consistente con un mecanismo de desacople entre el comportamiento del mercado financiero y la formación del precio interno.

Este hallazgo coincide con la literatura sobre la transmisión de precios en commodities, que documenta que fricciones en la cadena de valor, costos de intermediación y asimetrías de información pueden limitar la transferencia del valor generado en los mercados internacionales hacia los productores [23].

Desde una perspectiva complementaria, los estudios sobre gobernanza en cadenas globales de valor sugieren que la distribución del valor en commodities agrícolas depende, entre otros factores, de la estructura de mercado y del acceso diferencial a instrumentos financieros [24]. En este contexto, la ampliación del spread puede interpretarse como un espacio en el que parte del valor generado en el ámbito financiero no se traduce proporcionalmente en ingresos para los productores.

Asimismo, la estimación de un valor promedio no transmitido cercano al 22% bajo las métricas empleadas es consistente con esta interpretación, aunque su magnitud debe considerarse con cautela debido a la sensibilidad inherente a los supuestos de medición y de construcción de los indicadores. En conjunto, estos resultados sugieren que la financiarización del mercado del café no solo incide en la dinámica de precios, sino también en su distribución a lo largo de la cadena.

F. Síntesis: financiarización con transmisión incompleta

En conjunto, los resultados sugieren la coexistencia de dos procesos interrelacionados. Por un lado, se observa una creciente valorización financiera del café, reflejada en el aumento de los precios internacionales, la ampliación del spread y una mayor participación de actores financieros. Por otro, estos cambios coexisten con una transmisión incompleta del valor hacia el productor, en un contexto donde el diferencial de precios y diversas fricciones en la cadena limitan su traslado.

Esta interpretación es consistente con la literatura reciente, que plantea que la financiarización de commodities puede asociarse con mejoras en liquidez y ciertos aspectos de eficiencia de mercado, pero también con efectos distributivos heterogéneos, particularmente en economías en desarrollo [24], [25].

En este contexto, los resultados no permiten caracterizar la especulación como un fenómeno intrínsecamente adverso; más bien, sugieren que los mecanismos actuales de mercado podrían no asegurar una transmisión proporcional del valor a lo largo de la cadena. Esto plantea interrogantes relevantes sobre la sostenibilidad económica de los pequeños productores y sobre las condiciones bajo las cuales participan en mercados crecientemente financiarizados.

V. Conclusiones

Los resultados son consistentes con una creciente desconexión entre la dinámica financiera y el comportamiento del mercado físico del café, reflejada en la persistente ampliación del diferencial entre los precios de futuros y spot y en el aumento relativo de la participación de los actores financieros en el mercado de derivados. En conjunto, estos patrones son compatibles con procesos de financiarización que podrían estar modificando parcialmente los mecanismos tradicionales de formación de precios en commodities agrícolas.

La participación de los money managers se asocia sistemáticamente con mayores diferenciales futuro-spot, menores niveles de transmisión al mercado interno y mayores valores no transmitidos al productor. La estabilidad de estos resultados bajo especificaciones alternativas de umbrales y su coherencia con la evidencia econométrica sugieren que las relaciones observadas no dependen de una configuración particular del modelo, sino de una dinámica persistente en la estructura reciente del mercado.

La evidencia obtenida sugiere que el desacople reciente entre precios internacionales e internos no parece explicarse principalmente por variaciones cambiarias o shocks transitorios, sino por transformaciones más amplias en la composición y funcionamiento del mercado de futuros. En este contexto, la ampliación del spread adquiere una dimensión distributiva relevante, al asociarse con diferencias económicamente significativas entre la valorización financiera del café y los ingresos percibidos por los productores.

En conjunto, los hallazgos son consistentes con la idea de que la creciente integración entre los mercados financieros y agrícolas podría generar desafíos para los mecanismos de transmisión de precios y para la sostenibilidad económica de los pequeños productores en economías exportadoras. Aunque los mercados de futuros continúan cumpliendo funciones relevantes de cobertura y liquidez, los resultados sugieren la necesidad de fortalecer las herramientas de monitoreo y análisis orientadas a comprender mejor sus implicaciones distributivas en contextos de creciente financiarización.

Limitaciones y líneas futuras de investigación

El estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, el enfoque utilizado permite identificar asociaciones consistentes entre participación financiera, diferencial futuro-spot y transmisión de precios, pero no establecer relaciones causales estrictas. Aunque los resultados se mantienen estables bajo distintas especificaciones y pruebas de robustez, la dinámica de los mercados de commodities responde simultáneamente a múltiples factores financieros, macroeconómicos y productivos que no pueden aislarse completamente en una única especificación econométrica.

En segundo lugar, el análisis se concentra en indicadores agregados de posicionamiento financiero y en métricas de desacople construidas a partir de precios de referencia internacionales e internos. En consecuencia, el estudio no incorpora información microeconómica sobre costos de intermediación, contratos comerciales, estructuras locales de comercialización ni mecanismos específicos de formación de precios a nivel local, factores que podrían influir en la transmisión hacia el productor.

Asimismo, aunque los resultados son consistentes con cambios recientes en la dinámica del mercado y con una mayor participación de actores financieros, el trabajo no modela explícitamente mecanismos de volatilidad condicional, causalidad dinámica o cambios estructurales formales. En este sentido, futuras investigaciones podrían profundizar en modelos de transmisión no lineal, enfoques de causalidad temporal y análisis de redes de mercado que permitan comprender con mayor precisión la interacción entre actores financieros y comerciales.

De igual forma, resulta relevante avanzar hacia estudios que integren información microeconómica de productores y estructuras territoriales de comercialización, con el fin de aproximar de manera más detallada las posibles implicaciones distributivas asociadas a la creciente integración entre mercados financieros y agrícolas. En particular, futuras líneas de investigación podrían explorar el uso de herramientas de analítica de datos, aprendizaje automático y monitoreo en

tiempo real para el desarrollo de mecanismos alternativos de formación de precio interno, incorporando primas de valor y ajustes asociados al riesgo de mercado, la volatilidad financiera y atributos diferenciales de calidad. Este tipo de aproximaciones podría contribuir al diseño de esquemas de referencia de precios más sensibles a las condiciones productivas y comerciales de los pequeños productores en contextos de creciente financiarización.

Referencias

[1] J. C. Cuaresma, J. Hlouskova, and M. Obersteiner, "Fundamentals, speculation or macroeconomic conditions? Modelling and forecasting Arabica coffee prices," European Review of Agricultural Economics, vol. 45, no. 4, pp. 583–615, 2018, doi: 10.1093/erae/jby010.

[2] O. H. Cerquera Losada, V. H. Pérez Gómez, and J. Sierra Chavarro, "Análisis de la competitividad de las exportaciones del café del Huila," Revista Tendencias, vol. 21, no. 2, pp. 19–44, 2020, doi: 10.22267/rtend.202102.139.

[3] D. Rappaport, "Price Discovery and Energy Risk, or How Futures Contracts Are Changing the Energy Markets Forever: The Case of the New York Mercantile Exchange," The Journal of Risk Finance, vol. 1, no. 4, pp. 33–42, 2000, doi: 10.1108/eb043453.

[4] L. Baldi and M. Peri, "Spot and Futures Prices of Agricultural Commodities: Fundamentals and Speculation," 2019. doi: 10.22004/ag.econ.122002.

[5] E. B. Prasetyo, P. Putra, and Z. Zefriyenni, "Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Permintaan dan Penawaran: Tinjauan Literatur," Indo-MathEdu Intellectuals Journal, vol. 6, no. 6, pp. 9662–9671, 2025, doi: 10.54373/imeij.v6i6.4255.

[6] E. W. Sinurat, "Analisis Volatilitas Harga, Volatilitas Spillover, dan Tren Harga pada Komoditas Kopi di Sumatera Utara Sebelum dan Sesudah Liberalisasi Perdagangan," 2025. doi: 10.46576/jfeb.v4i2.7187.

[7] A. Ridha, R. Syahputra, and Z. Mora, "Faktor-faktor yang mempengaruhi fluktuasi harga kopi Indonesia," Jurnal Samudra Ekonomika, vol. 6, no. 2, pp. 101–111, 2022, doi: 10.33059/jse.v6i02.6205.

[8] R. P. H. Fishe, J. P. Janzen, and A. Smith, "Hedging and Speculative Trading in Agricultural Futures Markets," Am. J. Agric. Econ., vol. 96, no. 2, pp. 542–556, 2014, doi: 10.1093/ajae/aat111.

[9] Investing.com, "Coffee C Futures historical data (2006–2025)," https://es.investing.com/commodities/us-coffee-c-historical-data.

[10] International Coffee Organizatión, "Historical data on the global coffee trade," https://ico.org/es/resources/historical-data-on-the-global-coffee-trade/.

[11] U.S. Commodity Futures Trading Commission (CFTC), "Disaggregated Commitments of Traders – Combined Report (Futures and Options) [Data set]," https://publicreporting.cftc.gov/.

[12] B. Tröster and U. Gunter, "The Financialization of Coffee, Cocoa and Cotton Value Chains: The Role of Physical Actors," Dev. Change, vol. 54, no. 6, pp. 1550–1574, Nov. 2023, doi: 10.1111/dech.12802.

[13] R. Koenker, Quantile Regression. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. doi: 10.1017/CBO9780511754098.

[14] B. E. Hansen, "Sample Splitting and Threshold Estimation," Econometrica, vol. 68, no. 3, pp. 575–603, 2000, doi: 10.1111/1468-0262.00124.

[15] K. Tang and W. Xiong, "Index Investment and the Financialization of Commodities," Financial Analysts Journal, vol. 68, no. 6, pp. 54–74, 2012, doi: 10.2469/faj.v68.n6.5.

[16] R. Cont, A. Kukanov, and S. Stoikov, "The price impact of order book events," Journal of Financial Econometrics, vol. 12, no. 1, pp. 47–88, 2013, doi: 10.1093/jjfinec/nbt003.

[17] J. K. W. Fung and P. L. H. Yu, "Order imbalance and the dynamics of index and futures prices," in Journal of Futures Markets, Dec. 2007, pp. 1129–1157. doi: 10.1002/fut.20288.

[18] I. H. Cheng and W. Xiong, "Financialization of commodity markets," Dec. 01, 2014, Annual Reviews Inc. doi: 10.1146/annurev-financial-110613-034432.

[19] B. J. Henderson, N. D. Pearson, and L. Wang, "New Evidence on the Financialization of Commodity Markets," 2014, doi: 10.2139/ssrn.2491619.

[20] L. Yin and H. Cao, "Financialization of Commodity Markets: New Evidence from Temporal and Spatial Domains," Journal of Futures Markets, vol. 44, no. 8, pp. 1357–1382, 2024, doi: 10.1002/fut.22514.

[21] H. Working, "The Theory of the Price of Storage," American Economic Review, vol. 39, no. 6, pp. 1254–1262, 1949, [Online]. Available: https://www.jstor.org/stable/1816601

[22] M. Bonato, O. Cepni, R. Gupta, and C. Pierdzioch, "Financial stress and realized volatility: The case of agricultural commodities," Res. Int. Bus. Finance, vol. 71, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ribaf.2024.102442.

[23] C. L. Gilbert, "How to understand high food prices," J. Agric. Econ., vol. 61, no. 2, pp. 398–425, Jun. 2010, doi: 10.1111/j.1477-9552.2010.00248.x.

[24] J. Clapp, "Financialization, distance and global food politics," Journal of Peasant Studies, vol. 41, no. 5, pp. 797–814, Sep. 2014, doi: 10.1080/03066150.2013.875536.

[25] S. H. Irwin and D. R. Sanders, "Financialization and Structural Change in Commodity Futures Markets," Journal of Agricultural and Applied Economics, vol. 44, no. 3, pp. 371–396, 2012.

Innovación en la predicción de contaminantes nanoestructurados en el sector construcción: una revisión de enfoques para la prevención de enfermedades ocupacionales

Ana Marcela Muñoz Díaz
Estudiante Doctorado en Ingeniería e Innovación Tecnológica
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Medellín, Colombia
https://0000-0002-2306-1186

José León Henao Ríos
Docente
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Medellín, Colombia
https:// 0000-0002-3119-9775

Resumen. La integración de la nanotecnología en el sector de la construcción ha impulsado el desarrollo de edificios inteligentes y materiales con propiedades fotocatalíticas, como el dióxido de titanio (TiO_2), y la sílice (SiO_2) presente en el cemento y otros materiales usados en el sector de la construcción para incrementar propiedades como dureza y resistencia. Sin embargo, esta innovación conlleva riesgos emergentes para la salud ocupacional, principalmente por la inhalación de contaminantes nanoestructurados durante las etapas de aplicación, mantenimiento y demolición. El objetivo es identificar los enfoques tecnológicos más innovadores para el control de nanopartículas (NPs) usadas en los materiales de la construcción, con el propósito de proponer estrategias preventivas basadas en la evidencia que reduzcan la incidencia de patologías respiratorias de origen laboral. Se realizó una búsqueda sistemática en las bases de datos Scopus, Science Direct y PubMed utilizando ecuación de búsqueda encontrando un total de 96 artículos y luego de aplicar criterios de inclusión y exclusión quedaron 11 artículos. Esta investigación presenta una revisión sistemática de los enfoques actuales para la predicción y monitoreo de estas partículas en los ambientes de trabajo, los nuevos materiales usados en el sector de la construcción y los efectos a la salud que éstos ocasionan, los resultados destacan una brecha crítica en la estandarización de modelos de evaluación de riesgos y en la regulación específica para el uso y control de los nanomateriales en los ambientes de trabajo. Se concluye que la implementación de modelos predictivos avanzados es fundamental para anticipar la exposición laboral y la gran preocupación de los efectos de las NPs a largo plazo a nivel ambiental y la toxicidad que ocasionan una vez ingresan al cuerpo humano.

Palabras clave: Nanopartículas, TiO2, SiO2, Salud Ocupacional, Sector Construcción, Modelos de Predicción

I. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción ha experimentado una revolución tecnológica mediante la incorporación de nanopartículas (NPs), como la sílice (SiO2) y el dióxido de titanio (TiO2), para crear materiales inteligentes y sostenibles. Sin embargo, este avance presenta desafíos críticos en seguridad y salud en el trabajo [1]. La exposición a contaminantes nanoestructurados durante procesos como el corte, triturado, pulido plantea riesgos de enfermedades ocupacionales debido a su capacidad de penetración alveolar. A pesar de los beneficios ambientales de la fotocatálisis y la mejora en la infraestructura, existe una brecha en la predicción y monitoreo de estas partículas en entornos laborales. Esta revisión analiza los enfoques de la exposición ocupacional a NPs de sílice y dióxido de titanio, las técnicas de Machine Learning y datos enfocados a la predicción de la exposición, los efectos a la salud y los materiales usados en el sector de la construcción, innovadores para predecir la dispersión de nanomateriales, buscando fortalecer los marcos regulatorios y las estrategias de prevención. El objetivo es identificar los enfoques tecnológicos más innovadores para el control de NPs usadas en los materiales de la construcción, profundizar en los efectos a la salud que pueden ocasionar, indagar en los beneficios que presentan en los materiales de la construcción y, en general sobre el impacto en la seguridad ocupacional y ambiental. Se realiza una revisión sistemática de los últimos cinco años en tres bases de datos, aplicando criterios de inclusión y de exclusión y se realiza un análisis de los artículos encontrados en tres campos fundamentales: el uso de la inteligencia artificial para la predicción de la concentración de estos contaminantes, los materiales en la construcción y los efectos a la salud.

II. ANTECEDENTES

Existen varios enfoques relacionados con la propuesta de búsqueda de información relacionada con la predicción de la exposición de contaminantes a escala nano en trabajadores del sector de la construcción; el auge tecnológico, el vacío de normativo en materia de exposición ocupacional a NPs en Colombia y las enfermedades ocasionadas por estos agentes.

a. Auge Tecnológico

En primer lugar, es fundamental resaltar que la problemática se centra en el diagnóstico precoz del entorno laboral para prevenir enfermedades profesionales derivadas de un peligro emergente: las NPs integradas en los materiales de construcción. Si bien la evolución de la nanotecnología ha impulsado avances significativos en sectores como la medicina, la electrónica y la construcción, su manipulación diaria en diversas tareas operativas representa un riesgo latente para la salud de los trabajadores.

En consecuencia, los efectos a la salud pueden acelerarse debido al tamaño, inferior a 100 nm, pues ingresan con facilidad al cuerpo humano por inhalación, vía dérmica o digestiva, estudios internacionales hablan de nanomedicina y nanotoxicidad; nuevos términos, también asociados a los efectos que tienen éstas cuando ingresan al cuerpo humano. Otros estudios revelan daños a nivel celular por efecto de los radicales libres afectando la inmunidad innata; daños en el ADN, fibrosis pulmonar, daños renales y cardiovasculares [2].

b. Vacío Normativo

En el otro escenario, existe una brecha tecnológica y vacío normativo en Colombia, tradicionalmente el diagnóstico de la exposición ocupacional a contaminantes químicos se realiza a través de bombas de muestreo personal las cuales utilizan medios de captación (filtros o tubos) con el consecuente análisis en laboratorio mediante técnicas analíticas de acuerdo con los métodos establecidos por NIOSH (National Institute Occupational Safety Health) y posteriormente se realiza el cálculo de la concentración y se compara con un valor límite permisible establecido por la ACGIH (American Conferencia Goverment Industrial Higyenist) en su publicación anual TLVs and BEIs, es de anotar que Colombia no tiene valores límites permisibles para contaminantes químicos, en la Resolución 2400 de 1979 se hace referencia a tener en cuenta estos valores. [3]. Es de anotar que estos límites tradicionales se basan en la masa del contaminante en unidades de mg/m^3; sin embargo, en el caso de las NPs, su masa es insignificante, pero el área superficial es relativamente grande, lo que incrementa su reactividad y toxicidad alveolar.

Frente a esta situación se observan varios factores, a saber:

El diagnóstico toma varias etapas: muestreo en campo (para lo cual, en Colombia aún no se adquieren dispositivos para la captura de NPs en aire), análisis en laboratorio (para resultados confiables se requiere un laboratorio con la técnica analítica acreditada), cálculo de la concentración (aplicando correcciones y teniendo en cuenta variables ambientales como temperatura y presión atmosférica) y comparación con valores límites permisibles recomendados por otro país.

En materia de higiene ocupacional y contaminantes químicos, Colombia cuenta con la Resolución 2400 de 1979, conocida como el "Reglamento de higiene y seguridad ocupacional" por medio de la cual se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo; obsoleta, no actualizada hasta el momento, la cual no contempla la nanotecnología y las diferentes NPs como peligros emergentes. A nivel mundial países como España, Francia y Estados Unidos han desarrollados metodologías de valoración de la exposición cualitativas, conocidas como control banding, basadas en revisión de literatura, hojas de seguridad de las sustancias, características fisicoquímicas (tamaño, forma, solubilidad, etc.) variables de la exposición y componentes de la tarea; las cuales son subjetivas y no presentan capacidad para modelar procesos dinámicos o complejos en tiempo real [4].

Actualmente Colombia no cuenta con herramientas tecnológicas para el diagnóstico objetivo de ambientes laborales con presencia de NPs.

c. Las Enfermedades Ocupacionales

El uso creciente de nanomateriales en el sector de la construcción ha incrementado la exposición ocupacional a contaminantes nanoestructurados, generando riesgos significativos para la salud respiratoria de los trabajadores. Diversos estudios han evidenciado la relación entre la exposición a NPs de SiO2 y TiO2 y el desarrollo de enfermedades como la silicosis, la neumoconiosis y el cáncer de pulmón [5].

III. METODOLOGÍA

El método de investigación para esta revisión de literatura se basó en las guías para revisión sistemática de literatura de Kitchenham (2007) y en la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [6] y [7].

Los principales pasos seguidos para realizar el estudio de revisión sistemática fueron: Planificación de actividades previas a la revisión, para definir preguntas de investigación, criterios de inclusión y de exclusión, fuentes de información, cadena de búsqueda y procedimientos de categorización. Seguidamente la ejecución, que se refiere a la búsqueda y selección de los estudios con el fin de extraer y sintetizar los

datos y por ultimo las conclusiones, las cuales contemplan las respuestas a las preguntas de investigación previamente establecidas.

TABLA I PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

No.	Pregunta de investigación	Justificación
P1	Enfoque analítico: ¿Cuál es la relación entre las condiciones del entorno laboral y las características físico-químicas de las NPs (SiO2 y TiO2) que permite modelar algorítmicamente la exposición ocupacional en el sector de la construcción?	Del tamaño de partícula depende la peligrosidad de la sustancia
P2	¿Qué métodos y técnicas de análisis de datos se han usado para evaluar y predecir la exposición a NPs de SiO2 y TiO2 en el sector de la construcción?	Conocer los modelos que se han desarrollado para la predicción de la contaminación ocupacional
P3	¿Cuáles son los principales efectos a la salud ocasionados por las NPs una vez ingresan al cuerpo humano?	Se desconoce a ciencia cierta cómo afectan las NPs al cuerpo humano

Criterios de Inclusión y exclusión

Un criterio de inclusión (CI) y tres criterios de exclusión (CE). **El criterio de CI1**: los desarrollos tecnológicos y de innovación en materia de predicción de la exposición de materiales nanoestructurados en ambientes de trabajo. Los criterios de exclusión fueron: **CE1:** El estudio no puede ser un capítulo de libro. **CE2:** El estudio tiene un tiempo de publicación mayor de 5 años. **CE3**: La publicación está repetida en otra base de datos.

Fuentes

La revisión se hizo en tres bases de datos electrónicas consideradas relevantes las más relevantes [8]. Estas son: Scopus, Sciende Direct y PubMed, éste último fue el motor de búsqueda para acceder a la base de datos Medline.

Palabras claves y cadena de búsqueda

La cadena de búsqueda considera tres áreas: la exposición ocupacional a NPs de SiO2 y TiO2, las técnicas de Machine Learning, análisis de datos enfocados a la predicción de la exposición, y el monitoreo ocupacional siendo aplicadas en tres campos de la búsqueda: titulo, resumen y palabras claves.

TABLA II PALABRAS CLAVE UTILIZADAS

Áreas	Palabras clave
Higiene ocupacional	nanostructured pollutants, occupational exposure, nanoparticles, SiO2, TiO2
Técnicas de inteligencia artificial y análisis de datos	Machine Learning, data analysis
Monitoreo ocupacional	Occupational Assesment

Cadena de búsqueda

Técnicas de inteligencia artificial and exposición ocupacional a contaminantes nanoestructurados o monitoreo ocupacional.

- ("nanoparticles" OR "nanomaterials") AND ("cement" OR "concrete" OR "construction materials").
- ("nanoparticles" OR "nanomaterials") AND ("occupational health" OR "respiratory diseases" OR "lung cancer" OR "silicosis").
- ("silica nanoparticles" OR "SiO2" OR "titanium dioxide" OR "TiO2") AND ("cement" OR "concrete" OR "construction") AND ("occupational exposure" OR "health risk").
- ("machine learning" OR "predictive model") AND ("nanoparticles" OR "nanomaterials") AND ("occupational health" OR "construction industry").

Almacenamiento de datos: Las publicaciones encontradas en la fase de búsqueda fueron clasificadas y almacenadas respectivamente.

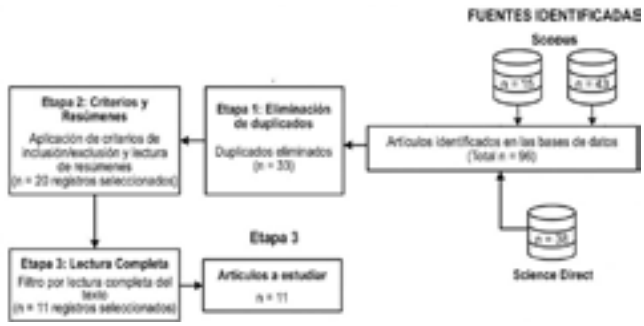
Validación: Antes de realizar la búsqueda de la información, el protocolo de revisión fue validado evaluando la pertinencia de las palabras claves y la cadena de búsqueda, con una pequeña muestra de publicaciones.

Extracción de información y síntesis

El proceso de búsqueda considero publicaciones entre los años 2021 y 2026. Como resultado de la búsqueda se obtuvo un total de 96 publicaciones detalladas así: Scopus (#15), Science Direct (#38,), PubMed (#43).

En la Figura 1., se presenta el diagrama de flujo correspondiente al proceso de búsqueda y selección de los artículos. Tras aplicar los criterios de inclusión, exclusión y la lectura de los resúmenes, se seleccionaron 11 artículos para su revisión detallada.

Fig. 1. Proceso de búsqueda



IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a. Características y métodos de los estudios

Después de aplicar la criterios y de realizar lectura de resumen quedaron 11 artículos para estudiar de los cuales, dos estaban relacionados con los efectos a la salud, uno relacionado con evaluaciones ocupacionales de las NPs en ambientes reales, tres referencian los componentes de los materiales usados en la industria de la construcción, cuatro a técnicas de machine learning como el desarrollo de modelos predictivos y uno que describe la ausencia de regulaciones ambientes y control de riesgos en seguridad por el uso de NPs.

Adicionalmente se realizó búsqueda específica entre la exposición a TiO2 y efectos a la salud, dado que en la búsqueda inicial no se encontraron artículos con esta característica, encontrándose uno.

b. Machine Learning y predicción de la exposición ocupacional a NPs

Los cuatro artículos referencian técnicas de Machine Learning (ML) las cuales juegan un papel fundamental en la estimación de contaminantes ambientales y en la detección temprana de efectos biológicos. A continuación se describen las funciones principales de las técnicas descritas.

1. Predicción de Biomarcadores de Toxicidad Pulmonar

El ML es capaz de integrar datos de "ómicas" con las propiedades físico-químicas de las NPs para detectar daños a la salud de forma temprana.

- Identificación de genes clave a través de análisis Random Forest han identificado firmas de genes que actúan como biomarcadores de inflamación pulmonar y fibrosis tras la inhalación de NPs de dióxido de titanio (TiO2-NPs).
- Relación dosis-respuesta: permite vincular características de las NPs —como el área superficial depositada, el tamaño y la carga— con cambios específicos en la expresión génica, lo que facilita entender cómo las propiedades físicas del material dictan su toxicidad.
- Altos volúmenes de información: Los modelos de ML ofrecen la ventaja de manejar conjuntos de datos de alta dimensión y pueden generalizar patrones para dosis o tiempos de exposición que no han sido probados experimentalmente, ahorrando recursos y tiempo en la evaluación de riesgos [8].

2. Mejora en la Evaluación de la Exposición (UFPs)

Las NPs en el aire, a menudo denominadas partículas ultrafinas (**UFPs**), presentan una alta heterogeneidad espacial y temporal que los modelos estadísticos tradicionales tienen dificultades para capturar.

- Superioridad sobre métodos tradicionales**:** Los métodos de ML, especialmente los basados en árboles como Random Forest y XGBoost, superan a las regresiones lineales tradicionales al predecir variaciones de UFPs, capturando mejor las relaciones complejas y no lineales entre los predictores (como el tráfico o el uso del suelo) y el contaminante.
- Modelado espacio temporal: El ML es particularmente beneficioso para modelos que analizan resoluciones temporales cortas (horarias o diarias), permitiendo una evaluación más precisa de la exposición dinámica que un trabajador podría experimentar en diferentes entornos [9].

Joaquim Cebolla 2025, En el artículo publicado en la revista *Building and Environment* (2025), presenta un método novedoso para estimar las tasas de emisión de NPs generadas incidentalmente (INP) en entornos industriales utilizando modelos de caja gris (grey-box modeling) que busca superar el ruido de fondo en las mediciones y el desarrollo de modelos estocásticos de parámetros agrupados. El método evaluó 78 modelos basados en ecuaciones de balance de masa de aerosoles en tres escenarios industriales reales de proyección térmica (High-Velocity Oxy-Fuel y Atmospheric Plasma Spraying). Los modelos combinan la física del sistema (determinista) con términos estocásticos que absorben las incertidumbres y el ruido de los sensores, los modelos simples (que incluyen ventilación forzada y generación de partículas, pero excluyen la difusión natural, agregación y deposición) resultaron ser los más robustos y precisos para estos entornos de alta ventilación. Se estimaron tasas de emisión de aproximadamente $4x10^{15}$ partículas/min, con variaciones mínimas dependiendo del material y la morfología de las piezas. El enfoque de caja gris permite una estimación sistemática y fiable de las emisiones de INP, es una alternativa viable para caracterizar procesos donde no se pueden aplicar técnicas tradicionales (como el

índice de pulverulencia) y podría servir de base para nuevos procedimientos estándar en higiene industrial [10].

3. Apoyo a la Seguridad Ocupacional

El uso de ML tiene un impacto directo en la prevención y en el cumplimiento de normativas:

- Identificación temprana de peligros: Las capacidades predictivas del ML se alinean con las directrices de agencias regulatorias nacionales, facilitando la identificación temprana de riesgos químicos en el lugar de trabajo.
- Diseño Seguro y Sostenible (SSbD**):** Al predecir la toxicidad antes de que un material sea sintetizado, el ML permite a los investigadores diseñar NPs con características físico-químicas que minimicen los efectos biológicos adversos, protegiendo así la salud de los trabajadores desde la fase de desarrollo del producto.

Ruby Vermoolen en 2025, presenta el desarrollo de un modelo llamado Nano Exposure Quantifier (NEQ), diseñado para evaluar la exposición de los trabajadores a nanomateriales manufacturados (MNs) en ambientes laborales, para el desarrollo se sustenta en que medir la exposición real a NPs es complejo y costoso y que los modelos existentes no capturan bien sus características únicas. El modelo estima la concentración de partículas en el aire (número de partículas/cm³) con intervalos de confianza, su estructura está compuesta por dos fases: Tier 1**:** evaluación inicial conservadora con información mínima y Tier 2 evaluación más detallada que incorpora datos específicos (energía de la actividad, masa manipulada, ventilación, controles locales); el modelo permite evaluar riesgos de exposición en procesos como síntesis de NPs, manipulación de polvos, uso de productos líquidos con nano, y abrasión de objetos que contienen nanomateriales [11].

En conclusión, la adopción de modelos de IA de 'caja gris' representa una solución estratégica ante el vacío normativo identificado en Colombia, donde la Resolución 2400 de 1979 aún no contempla límites específicos para peligros emergentes como las NPs. Al combinar leyes físicas deterministas con algoritmos estocásticos, estos modelos logran filtrar el ruido ambiental de los sensores en entornos de alta ventilación, permitiendo estimaciones de emisión (aprox. $4x10^{15}$ partículas/min) con una precisión que los métodos tradicionales de Higiene Ocupacional no pueden ofrecer en tiempo real. Esta capacidad técnica facilita una transición operativa: en lugar de depender de muestreos manuales lentos que requieren análisis de laboratorio externos, las empresas del sector construcción pueden utilizar estas predicciones para validar el cumplimiento preventivo frente a los valores límite (TLVs) de la ACGIH 2026. De este modo, la inteligencia artificial no solo actúa como una herramienta de monitoreo, sino como un mecanismo de autorregulación que protege la salud alveolar del trabajador mucho antes de que se manifiesten efectos crónicos como la fibrosis o la genotoxicidad documentada en la literatura reciente.

También existen desafíos en la etapa de procesamiento de datos para estos algoritmos, en cuanto a la complejidad de consolidar datsets voluminosos o la necesidad de depurar archivos de texto de los sensores, que por lo general presentan separaciones irregulares de espacios en blanco.

c. Nanopartículas y materiales del sector de la construcción

Se encontraron tres artículos los cuales destacan el uso de nanomateriales estructurados usados con fines de mejorar resistencia, durabilidad, amigables con el medio ambiente; sin embargo, existe la preocupación sobre la seguridad a largo plazo en términos de toxicidad, escalabilidad y la gestión de los residuos.

En este contexto Alí Akbar 2025, realizó una revisión sistemática entre los años 2019 y 2025 sobre esta cuestión y resalta varios aspectos, entre ellos el uso de nano-sílice, nano-TiO2, nanotubos de carbono, nanocelulosa, nanoclay, como los materiales más usados reciéntemente; usados también con fines de descontaminación urbana y materiales inteligentes que responden a estímulos ambientales.

Uno de los artículos informa que el biochar está estrechamente relacionado con las NPs, ya sea porque puede ser procesado en esa escala o porque se utiliza en combinación con ellas para potenciar sus efectos. Es así como se conoce el Nano-Biochar el cual posee una relación superficie-volumen muy alta. Esta característica aumenta significativamente su energía superficial, su eficiencia biológica y su capacidad para adsorber contaminantes, nutrientes y toxinas en comparación con el biochar convencional. En el ámbito de la construcción se utiliza Nano-sílice junto con fibras naturales en materiales de concreto, buscando mejorar propiedades mecánicas y durabilidad [12].

Otro de los artículos menciona entre las funciones de las NPs de SiO2, su capacidad de mejorar la resistencia a la compresión entre un 20 y 50% y reduce la permeabilidad, lo que protege las estructuras contra ataques químicos y corrosión, dado que actúa como un aditivo puzolánico que densifica la estructura del cemento. Así mismo su sostenibilidad dado que reduce la cantidad de cemento necesaria, lo que disminuye las emisiones de CO2 hasta en un 44% y que aun que el costo inicial es alto, éste se recupera mediante la reducción de mantenimientos y la extensión de10la vida útil de la infraestructura [13].

Las nano de dióxido de titanio, (*Nano−TiO2*) son valoradas por sus propiedades fotocatalíticas, dado que permiten crear superficies autolimpiantes y reduce la contaminación del aire urbano al descomponer óxidos de nitrógeno (*NOx*) y compuestos orgánicos volátiles bajo la luz UV. Los autores

destacan que el uso de NPs es una mejora incremental y un cambio de paradigma en los materiales utilizados para la construcción.

d. Nanopartículas de SiO2 y TiO2 y efectos a la salud

Se encontraron dos artículos relacionados con los efectos que ocasiona las NPs de SiO2 y no se encontraron artículos relacionados con los efectos de las NPs de TiO2, sin embargo se realizó revisión adicional en la base de datos Medline, aplicando los mismos criterios de búsqueda y se encontró un artículo. En la tabla III se relacionan los efectos, autores, y años de publicación.

TABLA III. RELACIÓN DE EFECTOS A LA SALUD

Np	Efecto	Autores	Año publicación y referencia
SiO2	Fibrosis pulmonar progresiva Inflamación crónica Formación de nódulos silicóticos Deterioro de la función respiratoria Muerte celular (piropotsis de macrófagos)	Lin Zhang, Jiaqi Tian, Ning Li, Yongheng Wang, Yulan Jin, Hongying Bian, Min Xiong, Zitong Zhang, Jiahua Meng, Zhengpu Han, Shuyin Duan	2025 [14]
	Daño pulmonar y fibrosis Reducción de la actividad antimicrobiana Entrada al torrente sanguíneo Respuesta inflamatoria y daño celular Estrés oxidativo	Yi Chen, Yingjie Fan, Yu Huang, Xiaoling Liao, Wenfeng Xu, Tao Zhang	2024 [15]
TiO2	A corto plazo: irritación de ojos, nariz y garganta. A largo plazo: Cancerígeno en animales, acumulación en órganos vitales como el hígado, riñones y pulmones. Genotoxicidad y daño celular (inestabilidad cromosómica y alteraciones en el ciclo celular)	Círculo médico de Córdoba. Departamento de salud ambiental. Argentina	2021[16]

e. Nanopartículas y evaluaciones ambientales

Un artículo evaluó la concentración de NPs incidentales en una fábrica de baldosas durante el proceso de cocción, se encontraron concentraciones de hasta 68711 partículas/cm^3 y diámetros medidos de 37 nm, el 95% de las NPs fueron menores de 100nm y esféricas. El estudio también realizó pruebas toxicológicas in vitro las cuales arrojaron citotoxicidad de baja a media lo cual disminuye la viabilidad celular; se aplicó modelo CB nanotool y el estudio resalta la importancia de contar con datos experimentales precisos y de escenarios reales de exposición [17].

V. CONCLUSIONES

Existe una amplia exposición a NPs de SiO2 y TiO2, ambos contaminantes peligrosos considerados cancerígenos y posiblemente cancerígenos por a IARC respectivamente. El uso de NPs se amplía a sectores como la construcción, la medicina, el sector agrario y en alimentos.

El tamaño de las partículas es determinante para definir toxicidad de las mismas, éstas atraviesan barreras y llegan al torrente sanguíneo afectando órganos y generando daño celular. El principal órgano afectado es el pulmón.

En cuanto al uso de inteligencia artificial para predecir la concentración de NPs en ambientes laborales, los artículos indican que los algoritmos más efectivos son el Random Forest y el XGBoost dado que ofrece mejores resultados en la predicción y en la identificación de biomarcadores biológicos; debido a que ofrecen resistencia al sobreajuste (overfitting). Podría también utilizarse técnicas de Machine Learning en la generación de alertas tempranas o automáticas para establecer la jerarquía de controles en la fuente, medio y persona como son el uso de sistemas de ventilación, métodos húmedos para limpieza de superficies y elementos de protección respiratoria con capacidad de retención para este tamaño de partículas.

Son pocos los estudios sobre las evaluaciones ocupacionales a NPs en ambientes de trabajo bajo las metodologías tradicionales, el artículo encontrado sugiere altas concentraciones en el proceso evaluado y 95% de ellas inferiores a 100nm lo que aumenta la reactividad biológica que repercute en el daño celular.

Existe un crecimiento acelerado en el uso de Nps en los materiales del sector de la construcción para las llamadas “construcciones inteligentes” los cuales tiene reacciones frente a cambios climáticos, disminuyen contaminantes criterio como los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, dióxido de carbono, lo que ayuda al control de la contaminación ambiental, además proporcionan bondades como la dureza, resistencia y propiedades fotocatalíticas.

Los organismos internacionales coinciden en que se deben establecer regulaciones preventivas en el uso acelerado de las NPs en aspectos de calidad del aire y seguridad laboral.

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Investigación en Higiene y Gestión Ambiental (GHYGAM) y al Grupo de Investigación en Ingeniería Sostenible (GIS) del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, así como también a la profesora Adriana Xiomara Reyes Gamboa de la Facultad de Ingenierías, por su apoyo en el desarrollo de este documento.

REFERENCIAS

[1] Ali Akbar Firoozi, Ali Asghar Firoozi, Mohammad Reza Maghami,Transformative Impacts of Nanotechnology on Sustainable Construction: A Comprehensive Review, Results in Engineering, Volume 26,2025,104973,ISSN 2590-1230, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104973.

[2] Xuemin Shi, Chen Liang, LinLin Wang, Xuefeng Bai, Ruiyang Ding, Zhiwei Sun, Occupational exposure to amorphous silica nanoparticles alters lung function and metabolomic features, Toxicology Letters, Volume 410, 2025, Pages 139-146, ISSN 03784274,https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2025.06.013

[3] Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, "Resolución 2400 de 1979," pp. 38–42, Bogotá, Colombia: Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, 1979. [En línea]. Disponible en: https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/2400%20-%201979.pdf

[4] American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), "2026 TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices," Cincinnati, OH, USA: ACGIH, 2026.

[5] Chen, Y., Fan, Y., Huang, Y., Liao, X., Xu, W., & Zhang, T. (2024). A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 269*, 115905. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115905

[6] B. Kitchenham, "Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering," EBSE Technical Report, Keele University and University of Durham, 2007.

[7] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, L. Shamseer, J. M. Tetzlaff, E. A. Akl, S. E. Brennan, R. Chou, J. Glanville, J. M. Grimshaw, A. Hróbjartsson, M. M. Lalu, T. Li, E. W. Loder, E. Mayo-Wilson, S. McDonald, L. A. McGuinness, L. A. Stewart, J. Thomas, A. C. Tricco, V. A. Welch, P. Whiting, and D. Moher, "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, p. n71, 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.

[8] V. B. Kampenes, T. Dybå, J. E. Hannay, and D. I. K. Sjøberg, "A systematic review of effect size in software engineering experiments," Information and Software Technology, vol. 49, no. 11–12, pp. 1073–1086, 2007, doi: 10.1016/j.infsof.2007.02.015.

[9] Vachon, J., Kerckhoffs, J., Buteau, S., & Smargiassi, A. (2024). Do machine learning methods improve prediction of ambient air pollutants with high spatial contrast? A systematic review. *Environmental Research, 262,* 119751. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119751

[10] Cebolla, J. (2025). Estimation of nanoparticle emissions in indoor industrial environments using a grey-box modeling approach. *Building and Environment, 252,* 112345. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112345

[11] R. Vermoolen, "The Nano Exposure Quantifier: a quantitative model for assessing nanoparticle exposure in the workplace," Journal of Nanoparticle Research, vol. 27, no. 5, pp. 123–145, 2025. https://doi.org/10.1093/annhyg/mer055

[12] K. I. Ogunwa, E. C. Nnadozie, N. Dube, P. O. Oladoye, and K. S. Obayomi, "The evolving role of biochar: recent advances and future directions – a review," Biomass and Bioenergy, vol. 208, p. 108844, May 2026. doi: 10.1016/j.biombioe.2025.108844

[13] Firoozi, A. A., Firoozi, A. A., & Maghami, M. R. (2025). Transforming civil engineering: The role of nanotechnology and AI in advancing material durability and structural health monitoring. Case Studies in Construction Materials, 23, e05063. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05063.

[14] L. Zhang, J. Tian, N. Li, Y. Wang, Y. Jin, H. Bian, M. Xiong, Z. Zhang, J. Meng, Z. Han, and S. Duan, "Exosomal miRNA reprogramming in pyroptotic macrophage drives silica-induced fibroblast-to-myofibroblast transition and pulmonary fibrosis," Journal of Hazardous Materials, vol. 483, p. 136629, 2025. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.136629

[15] Y. Chen, Y. Fan, Y. Huang, X. Liao, W. Xu, and T. Zhang, "A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem," *Science of The Total Environment*, vol. 857, p. 159353, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159353.

[16] Círculo Médico de Córdoba, "Dióxido de Titanio," Córdoba, Argentina: Círculo Médico de Córdoba, 2021. [En línea]. Disponible en: https://circulomedicocba.org/wp-content/uploads/2021/08/Dióxido-de-Titanio.pdf

[17] V. Moreno-Martín, M. López, D. Bou, S. Fraga, J. P. Teixeira, A. López-Lilao, V. Sanfélix, E. Monfort, and M. Viana, "Incidental nanoparticle characterisation in industrial settings to support risk assessment modelling," International Journal of Hygiene and Environmental Health, vol. 264. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2025.114523?utm_source=copilot.com

Desarrollo de un marco metodológico para la estimación del metano entérico y su integración en la huella de carbono de la cadena de suministro del queso costeño en sistemas lecheros tropicales mediante modelación CNCPS y análisis de ciclo de vida

Luis Galindo
Facultad de Ingeniería
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
lgalindom@unimagdalena.edu.co

Edwin Causado
Facultad de Ingeniería
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
ecausado@unimagdalena.edu.co

Yury Granja
Microbiología y Nutrición Animal
AGROSAVIA
San Roque, Colombia
ygranja@agrosavia.co

Resumen*—Dentro de los sistemas agroalimentarios, las cadenas lácteas contribuyen de manera significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y, por tanto, al calentamiento global. En este contexto, la cadena de suministro del queso costeño constituye una cadena de valor láctea de interés por su relevancia territorial, económica, productiva y cultural en la región Caribe colombiana. Esta cadena integra los esla producción primaria, transformación, comercialización, consumo final y gestión de residuos, donde interactúan actores, procesos y flujos de materia y energía asociados con la producción de leche, la elaboración de queso, la distribución y la disposición final. En los sistemas lecheros bovinos, el metano entérico (CH4) generado durante la fermentación ruminal constituye una fuente crítica de GEI y su estimación requiere información local sobre composición del alimento, consumo de materia seca, digestibilidad, productividad animal y manejo del sistema. Sin embargo, las técnicas directas de medición presentan restricciones de costo, infraestructura, logística y escala; además, los factores genéricos pueden limitar la representatividad de los resultados en sistemas lecheros tropicales. Este artículo propone un marco metodológico trazable, basado en datos locales, para estimar el CH4 entérico mediante modelación CNCPS e integrarlo en la cuantificación de la huella de carbono de la cadena de suministro del queso costeño. Metodológicamente, se plantea un análisis de ciclo de vida atribucional con alcance de la cuna a la tumba, conforme a ISO 14040, ISO 14044 e ISO 14067, con lineamientos IDF 2022, caracterización nutricional mediante NIRS y química húmeda, contraste con IPCC Tier 2, y análisis de sensibilidad e incertidumbre mediante simulación Monte Carlo. El aporte esperado consiste en cuantificar la huella de carbono en kg CO2 eq/kg FPCM y kg CO2 eq/kg de queso costeño, identificar puntos críticos de emisión y formular escenarios de mejora ambiental para una cadena láctea tropical.

***Palabras clave*—análisis de ciclo de vida; CNCPS; gases de efecto invernadero; huella de carbono; metano entérico; NIRS; queso costeño.**

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroalimentarios son esenciales para la seguridad alimentaria y la economía rural, pero también representan una fuente relevante de GEI. En 2022 emitieron aproximadamente 16,2 Gt CO2 eq, cerca de una tercera parte de las emisiones antropogénicas globales; dentro de este conjunto, las actividades realizadas en la unidad agropecuaria explicaron cerca del 48 % y la ganadería fue uno de los componentes de mayor contribución [1]. A escala global, la ganadería representa alrededor del 14,5 % de las emisiones antropogénicas y el ganado bovino concentra cerca del 65 % de las emisiones ganaderas; adicionalmente, el sector lácteo aporta cerca del 4 % de las emisiones antropogénicas globales [2], [3]. Esta evidencia muestra que la evaluación ambiental de productos lácteos transformados requiere considerar simultáneamente la producción primaria, la transformación, la logística, el consumo y la gestión de residuos.

En la cadena láctea, el metano entérico es una fuente crítica de GEI y una pérdida de energía bruta ingerida, por lo que su estimación es relevante tanto para la contabilidad ambiental como para la eficiencia productiva. Su cuantificación introduce incertidumbre cuando se aplican parámetros genéricos en sistemas lecheros tropicales, donde la calidad del alimento, el consumo, la digestibilidad y la productividad animal presentan alta variabilidad [6]-[8].

En Colombia, una parte importante de la producción láctea se desarrolla bajo sistemas bovinos de doble propósito en condiciones de trópico bajo. Para este artículo, un sistema lechero tropical se entiende como un sistema bovino con alta dependencia de pastos y forrajes, variabilidad estacional en la calidad del alimento, heterogeneidad tecnológica, arreglos de doble propósito y disponibilidad limitada de registros

productivos sistemáticos. Estas condiciones inciden en el consumo, la digestibilidad, la productividad animal y las emisiones de GEI, por lo que la estimación del CH4 entérico y de la huella de carbono (HC) requiere datos locales del alimento, el animal y el manejo [20], [23].

En la región Caribe colombiana, el queso costeño es un producto tradicional de alta relevancia alimentaria, económica y cultural. Su cadena de suministro integra producción primaria de leche, transformación artesanal o semiindustrial, distribución, comercialización, consumo final y manejo de residuos. Esta configuración lo convierte en un caso pertinente para evaluar emisiones de GEI desde una perspectiva de cadena de suministro y no únicamente desde la finca o la planta de transformación.

El análisis de ciclo de vida (ACV) permite evaluar estas interacciones al relacionar entradas, salidas y emisiones con una unidad funcional definida. ISO 14040 e ISO 14044 establecen sus fases principales; ISO 14067 orienta la cuantificación de HC de producto; e IDF 2022 aporta criterios sectoriales para productos lácteos, especialmente en unidades funcionales, asignación entre leche y carne, tratamiento de coproductos, calidad de datos y reporte [16]-[18].

Con base en lo anterior, este artículo propone un marco metodológico para estimar el CH4 entérico e integrarlo en la HC de la cadena de suministro del queso costeño en sistemas lecheros tropicales. La contribución central consiste en conectar modelación CNCPS en AMTS.Cattle.Pro, caracterización nutricional mediante NIRS y química húmeda, estimaciones ganaderas complementarias IPCC Tier 2, modelación ACV en SimaPro y análisis de sensibilidad e incertidumbre, con el fin de generar una ruta trazable para cadenas lácteas tropicales.

II. FUNDAMENTOS CONCEPTUALES Y METODOLÓGICOS

A. Análisis de ciclo de vida y huella de carbono

El ACV es una metodología estandarizada para evaluar impactos ambientales potenciales asociados con productos, procesos o servicios a partir de los flujos de materia y energía del sistema evaluado. Según ISO 14040 e ISO 14044, comprende cuatro fases: definición del objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación [13]. En cadenas lácteas, su valor radica en integrar emisiones de producción primaria, transformación, transporte, comercialización, consumo y residuos bajo una misma unidad funcional.

Como se muestra en la Fig. 1, el ACV organiza la información del sistema de producto, vincula entradas y salidas con actividades de la cadena, cuantifica impactos ambientales e interpreta los resultados según los límites y unidades funcionales definidos.

Fig. 1. Fases del análisis de ciclo de vida según ISO 14040.



Nota: La figura sintetiza las cuatro fases metodológicas del ACV: definición del objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación de resultados. Adaptado de ISO 14040 2006.

La HC de producto corresponde a las emisiones directas e indirectas de GEI asociadas con el ciclo de vida de un producto, expresadas en CO_2 equivalente. En leche, los valores reportados presentan alta variabilidad, desde menos de 1 hasta más de 8 kg CO_2 eq/kg FPCM, según productividad animal, dieta, condiciones agroclimáticas, límites del sistema, unidad funcional y asignación. Los valores más altos suelen asociarse con sistemas ganaderos mínimamente tecnificados, baja productividad animal, limitada eficiencia alimentaria y predominio de pastoreo extensivo, donde el CH4 entérico y el estiércol depositado en pasturas tienen mayor peso relativo [3], [20]. En queso, la HC por kg de producto suele ser superior a la de la leche por la concentración de sólidos lácteos y por la cantidad de leche requerida para producir 1 kg de queso; además, depende del rendimiento leche-queso, maduración, energía, transporte, refrigeración, empaques y manejo del lactosuero [13]-[15].

Por tanto, la evaluación ambiental del queso costeño requiere conectar la intensidad climática de la leche cruda con las etapas de transformación, comercialización, consumo y residuos, evitando interpretar la HC como un valor único independiente del sistema productivo y de las decisiones metodológicas.

B. Estimación del metano entérico en sistemas lecheros tropicales

En sistemas lecheros tropicales, la estimación del CH4 entérico no puede asumirse como un valor estático, porque depende de la interacción entre dieta, consumo de materia seca, digestibilidad, peso vivo, producción de leche y manejo. Estas variables cambian con la estacionalidad, el manejo de praderas, la suplementación y la productividad animal, lo que incrementa la incertidumbre cuando se emplean parámetros genéricos [6]-[8].

Las alternativas metodológicas para estimarlo incluyen medición directa, ecuaciones empíricas, factores IPCC, modelos mecanicistas, proxies en leche y aprendizaje automático. Las cámaras de respiración, el trazador SF6, GreenFeed y los detectores láser proporcionan mediciones experimentales, pero son costosos y difíciles de escalar. Los proxies basados en espectroscopía de leche, cromatografía de gases y perfil de ácidos grasos, así como los modelos de machine learning, amplían las posibilidades de predicción, aunque dependen de calibraciones robustas, bases de datos representativas y validación externa [7], [10]-[12]. En este contexto, CNCPS resulta pertinente porque ofrece una base mecanicista interpretable para relacionar calidad del alimento,

fermentación ruminal, utilización de nutrientes, desempeño animal y producción de CH4.

C. Modelación CNCPS y caracterización nutricional mediante NIRS

El sistema de Carbohidratos y Proteínas Netos de Cornell (CNCPS) es un modelo mecanicista de nutrición animal que representa composición del alimento, fracciones de carbohidratos y proteínas, degradación ruminal, pasaje, digestibilidad, utilización de nutrientes, desempeño animal y pérdidas energéticas asociadas al CH4 [19], [20]. Su fortaleza para este estudio no radica en reemplazar mediciones directas ni modelos de inventario, sino en utilizar datos locales de dieta y animal para estimar el componente entérico de forma más explicativa que los factores promedio.

En el marco propuesto, CNCPS no reemplaza al ACV ni define reglas de asignación ambiental. Su función es estimar el CH_4 entérico del eslabón primario mediante AMTS.Cattle.Pro; luego, esa estimación se integra en SimaPro junto con emisiones de estiércol, suelos, energía, combustibles, transporte, refrigeración, empaques, transformación y manejo de coproductos.

La caracterización nutricional del alimento es crítica para parametrizar el modelo. En sistemas lecheros tropicales, pastos, forrajes y suplementos varían en materia seca, proteína, fibra detergente neutro y ácido, lignina, extracto etéreo, carbohidratos solubles, almidón, digestibilidad y energía. El uso de NIRS, complementado con química húmeda en muestras críticas o de control, aporta información local con rapidez, trazabilidad y posibilidad de contraste analítico [21], [22].

D. Cadena de suministro del queso costeño

El queso costeño es un producto tradicional del Caribe colombiano, elaborado principalmente con leche bovina y asociado a prácticas artesanales, familiares y semiindustriales. En el departamento del Magdalena, la producción de leche y la transformación quesera se articulan con sistemas ganaderos de trópico bajo y doble propósito. La región Caribe produce cerca del 18,8 % de la leche nacional, equivalente a aproximadamente 4,1 millones de litros diarios, y una fracción importante de esta leche se destina a queso fresco artesanal; para Magdalena se reportan 1.124.069 L/día de leche y alrededor de 44.960 kg/día de queso fresco artesanal [24], [25].

El proceso productivo del queso costeño comprende, de manera general, filtrado de la leche, coagulación, corte o picado de la cuajada, salado, moldeo y prensado. Como se observa en la Fig. 2, estas etapas pueden desarrollarse en unidades artesanales o semiindustriales, con diferencias en infraestructura, control de proceso, consumo de agua y energía, condiciones higiénico-sanitarias, manejo del lactosuero, empaque y almacenamiento. Desde la perspectiva del ACV, estas diferencias son relevantes porque modifican los flujos de materia y energía y, por tanto, las cargas ambientales asignadas al producto final.

Fig. 2. Proceso productivo del queso costeño en unidades artesanales y semiindustriales.



Nota: La figura compara las etapas generales de elaboración del queso costeño, incluyendo filtrado de leche, coagulación, picado de cuajada, salado, moldeo y prensado. Fuente: proyecto de fortalecimiento de la capacidad Productiva y comercial de la cadena de suministro del queso costeño en las subregiones del Magdalena, La Guajira y Cordoba.

La literatura disponible sobre queso costeño se ha concentrado en calidad microbiológica, composición, tecnología, atributos sensoriales y comercialización; sin embargo, su desempeño climático ha sido poco evaluado bajo un enfoque integrado. Esta brecha justifica un marco que conecte el CH4 entérico de la producción primaria con la HC del queso como producto final, considerando especificidades territoriales, productivas y logísticas de la cadena.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

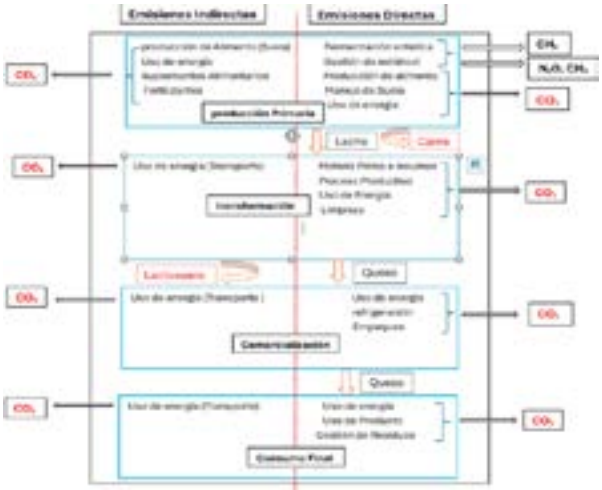
El estudio se plantea como una investigación aplicada, cuantitativa y metodológica. Se organiza en cuatro fases: caracterización de la cadena; estimación del CH4 entérico mediante CNCPS en AMTS.Cattle.Pro; integración de emisiones en SimaPro para cuantificar la HC; y análisis de sensibilidad, incertidumbre, puntos críticos y escenarios de mejora.

A. Fase 1: caracterización de la cadena e inventario de ciclo de vida

La primera fase delimitará el sistema de producto con alcance de la cuna a la tumba, incluyendo producción primaria, transformación, comercialización, consumo final y gestión de residuos. La caracterización permitirá identificar actores, flujos de leche, queso y lactosuero, insumos, energía, transporte, refrigeración, empaques, pérdidas y fuentes directas e indirectas de emisión.

La Fig. 3 presenta los límites del sistema propuestos para la cadena de suministro del queso costeño. El esquema integra producción primaria, transformación, comercialización, consumo final y gestión de residuos, junto con flujos de leche, queso, lactosuero, insumos, energía, transporte, refrigeración, empaques y residuos. Esta delimitación orienta el inventario ambiental conforme al enfoque de ciclo de vida.

Fig. 3. Límites del sistema de la cadena de suministro del queso costeño.



Nota: Elaboración propia. La figura ilustra los límites del sistema bajo un enfoque de análisis de ciclo de vida de la cuna a la tumba. CH4 = metano; N2O = óxido nitroso; CO2 = dióxido de carbono.

La unidad central de trazabilidad será la relación finca-quesería, porque conecta producción de leche, composición láctea, CH_4 entérico, rendimiento leche-queso y destino del lactosuero. También se caracterizarán transporte, almacenamiento, refrigeración, empaques, pérdidas y disposición final.

La información primaria se recopilará mediante encuestas estructuradas y entrevistas técnicas a productores, transformadores y comercializadores. Se registrarán variables de inventario animal, producción y composición de leche, alimentación, manejo de estiércol, energía, combustibles, insumos, leche procesada, queso obtenido, lactosuero, rutas, distancias, almacenamiento y pérdidas.

Las unidades funcionales serán kg CO_2 eq/kg FPCM y kg CO_2 eq/kg de queso costeño.

B. Fase 2: muestreo de leche, alimento y estimación del metano entérico mediante CNCPS

La segunda fase estimará el CH_4 entérico mediante CNCPS implementado en AMTS.Cattle.Pro. El modelo se parametrizará con datos locales del animal, alimento y sistema productivo: peso vivo, grupo genético, edad, estado fisiológico, días en leche, producción y composición de leche, dieta, suplementación, digestibilidad y consumo estimado de materia seca.

El estudio incorporará campañas de muestreo en épocas climáticas contrastantes, con el fin de capturar la variabilidad estacional en calidad del alimento, producción de leche, composición láctea y digestibilidad. Las muestras de leche se analizarán para determinar grasa, proteína, sólidos totales y caseína. Estos parámetros permitirán calcular la leche corregida por grasa y proteína, interpretar la calidad composicional de la leche y relacionarla con el rendimiento quesero.

Las muestras de pastos, forrajes y suplementos corresponderán a los recursos efectivamente consumidos por las vacas lecheras. En pasturas se conformarán muestras compuestas por potrero, considerando especie forrajera, edad de rebrote, manejo de pradera, época climática y disponibilidad real para consumo. Para suplementos, concentrados o forrajes conservados, se tomarán submuestras representativas de los lotes utilizados en la alimentación. Las muestras serán rotuladas, conservadas y remitidas a laboratorio para análisis mediante NIRS, complementado con química húmeda cuando se requiera validar muestras críticas, valores atípicos o alimentos poco representados en las bases de calibración.

Las variables nutricionales y energéticas incluirán materia seca, proteína cruda, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido, lignina, extracto etéreo, cenizas, almidón, carbohidratos solubles, digestibilidad y energía. Con estos datos, AMTS.Cattle.Pro estimará producción diaria de CH_4, rendimiento de CH_4 por consumo de materia seca e intensidad de CH_4 por unidad de leche corregida.

Las emisiones de CH_4 por estiércol y N_2O directo e indirecto se estimarán con IPCC Tier 2, según disponibilidad de datos sobre manejo de excretas, deposición en pasturas, fertilización, volatilización y lixiviación.

C. Fase 3: integración al análisis de ciclo de vida y cuantificación de la huella de carbono

En la tercera fase, las emisiones estimadas se incorporarán al modelo ACV en SimaPro. El modelo integrará datos de campo, resultados de laboratorio, salidas de AMTS.Cattle.Pro, estimaciones IPCC Tier 2 y procesos secundarios de bases de datos ACV para evaluar la categoría cambio climático.

Los resultados se expresarán en kg CO_2 eq/kg FPCM y kg CO_2 eq/kg de queso costeño, desagregando la contribución de producción primaria, transformación, transporte, refrigeración, empaques, consumo final y residuos.

La asignación de cargas se documentará explícitamente. En producción primaria se usará como criterio base la asignación biofísica recomendada por IDF 2022 entre leche y animales vendidos; como sensibilidad se evaluarán asignaciones económica, másica o energética. En transformación, el tratamiento del lactosuero dependerá de su destino real.

D. Fase 4: sensibilidad, incertidumbre, puntos críticos y escenarios de mejora

La cuarta fase interpretará los resultados mediante análisis de contribución, sensibilidad e incertidumbre. Se identificarán puntos críticos por eslabón, fuente de GEI y actividad, con énfasis en la participación relativa del metano entérico frente a estiércol, suelos, energía, transporte, refrigeración, empaque, pérdidas y coproductos.

El análisis de sensibilidad evaluará consumo de materia seca, digestibilidad, composición nutricional, producción y composición de leche, rendimiento quesero, estiércol, destino del lactosuero, distancia de transporte, refrigeración, pérdidas y asignación. Cuando existan rangos justificables, se aplicará Monte Carlo para presentar resultados como intervalos y no solo como valores puntuales.

Finalmente, se formularán escenarios de mejora ambiental coherentes con las condiciones reales de la cadena. Estos escenarios podrán incluir mejoras en calidad del alimento, eficiencia productiva, manejo de estiércol, aprovechamiento del lactosuero, optimización del transporte, reducción de pérdidas, eficiencia energética y manejo de refrigeración. Cada escenario será comparado con la línea base mediante indicadores de reducción absoluta y relativa de la huella de carbono, tanto por kg de leche corregida como por kg de queso costeño producido.

IV. RESULTADOS ESPERADOS Y APORTE METODOLÓGICO

El principal resultado esperado es un marco metodológico trazable para estimar CH4 entérico en producción primaria e integrarlo en la HC de la cadena de suministro del queso costeño. Este marco articulará datos locales del alimento, animal, leche, transformación y comercialización bajo estándares internacionales.

Se espera obtener un inventario ambiental de la cadena que represente entradas, salidas, fuentes de emisión, coproductos, transporte, refrigeración, empaques, pérdidas y residuos, permitiendo analizar la cadena como sistema articulado desde la producción primaria hasta el consumo final.

Desde el componente ganadero, se espera estimar el CH_4 entérico mediante AMTS.Cattle.Pro/CNCPS a partir de composición nutricional del alimento, consumo de materia seca, digestibilidad, producción y composición de leche, y características animales. El uso de NIRS y química húmeda fortalecerá los datos de entrada y el contraste con IPCC Tier 2 permitirá evaluar consistencia metodológica.

La cuantificación se expresará en kg CO_2 eq/kg FPCM y kg CO_2 eq/kg de queso costeño, con desagregación por eslabón y fuente de GEI. Esta lectura permitirá identificar la contribución relativa del CH_4 entérico y de otras fuentes relevantes para orientar escenarios de mitigación.

El análisis de contribución permitirá identificar puntos críticos de emisión por eslabón, actividad y tipo de gas, mientras que el análisis de sensibilidad evaluará parámetros como consumo de materia seca, digestibilidad, rendimiento quesero, destino del lactosuero, distancia de transporte, refrigeración, pérdidas y asignación.

Cuando existan rangos técnicamente justificables, la simulación Monte Carlo permitirá presentar los resultados como intervalos de variabilidad y no solo como valores puntuales, fortaleciendo la transparencia del marco metodológico.

El aporte metodológico radica en conectar tres niveles usualmente separados: estimación biológica del metano entérico, inventario ambiental de una cadena láctea tropical y cuantificación de HC del queso como producto final. Esta integración permite una evaluación más representativa que aquella basada solo en factores genéricos o alcances parciales.

V. CONCLUSIONES

La cadena de suministro del queso costeño representa un sistema agroalimentario relevante para el Caribe colombiano; sin embargo, su desempeño climático ha sido poco evaluado desde una perspectiva integral de ciclo de vida. Esta limitación justifica construir inventarios trazables que representen las condiciones productivas y territoriales del sistema.

El CH_4 entérico es un componente crítico de la HC en cadenas lácteas tropicales de doble propósito. Su estimación debe incorporar datos locales de alimento, digestibilidad, consumo de materia seca y productividad animal, especialmente cuando los factores genéricos no representan la variabilidad tropical.

La integración de CNCPS en AMTS.Cattle.Pro, NIRS, química húmeda, IPCC Tier 2, SimaPro, ISO 14040, ISO 14044, ISO 14067 e IDF 2022 ofrece una arquitectura metodológica coherente. CNCPS estima el componente entérico, IPCC complementa emisiones ganaderas, SimaPro integra el modelo ACV e IDF 2022 orienta unidades funcionales, asignación y coproductos.

El marco propuesto permitirá cuantificar la HC del queso costeño, identificar puntos críticos y evaluar escenarios de mejora ambiental. Su valor científico reside en conectar nutrición animal, producción primaria, transformación quesera y evaluación ambiental de producto en una cadena láctea tropical.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia por el apoyo financiero al proceso de formación doctoral del primer autor.

REFERENCIAS

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, Greenhouse gas emissions from agrifood systems: Global, regional and country trends, 2000-2022, FAOSTAT Analytical Brief 94. Rome, Italy: FAO, 2024.

[2] P. J. Gerber et al., “Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: A review,” Animal, vol. 7, no. s2, pp. 220-234, 2013, doi: 10.1017/S1751731113000876.

[3] FAO and Global Dairy Platform, Climate change and the global dairy cattle sector: The role of the dairy sector in a low-carbon future. Rome, Italy: FAO, 2018.

[4] P. Guzmán-Luna, M. Mauricio-Iglesias, A. Flysjö, and A. Hospido, “Analysing the interaction between the dairy sector and climate change from a life cycle perspective: A review,” Trends in Food Science & Technology, vol. 126, pp. 168-179, 2022, doi: 10.1016/j.tifs.2021.09.001.

[5] H. Ni, H. Zeng, Z. Liu, W. Li, S. Miao, A. Yang, and Y. Wang, “Towards decarbonizing the supply chain of dairy industry: Current practice and emerging strategies,” Carbon Neutrality, vol. 4, art. no. 8, 2025, doi: 10.1007/s43979-025-00124-z.

[6] K. A. Johnson and D. E. Johnson, “Methane emissions from cattle,” Journal of Animal Science, vol. 73, no. 8, pp. 2483-2492, 1995, doi: 10.2527/1995.7382483x.

[7] A. N. Hristov et al., “Symposium review: Uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models,” Journal of Dairy Science, vol. 101, no. 7, pp. 6655-6674, 2018, doi: 10.3168/jds.2017-13536.

[8] C. I. Molina-Botero et al., “Validation of enteric methane emissions by cattle estimated from mathematical models using data from in vivo experiments,” Acta Scientiarum. Animal Sciences, vol. 47, art. no. e69328, 2025, doi: 10.4025/actascianimsci.v47i1.69328.

[9] Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use. Hayama, Japan: IGES, 2006; and 2019 Refinement to the 2006

IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, Switzerland: IPCC, 2019.

[10] S. Van Gastelen et al., "Predicting enteric methane emission of dairy cows with milk Fourier-transform infrared spectra and gas chromatography-based milk fatty acids," Journal of Dairy Science, vol. 101, no. 6, pp. 5582-5598, 2018, doi: 10.3168/jds.2017-13052.

[11] G. Bittante and M. Bergamaschi, "Enteric methane emissions of dairy cows predicted from fatty acid profiles of milk, cream, cheese, ricotta, whey, and scotta," Animals, vol. 10, no. 1, art. no. 61, 2020, doi: 10.3390/ani10010061.

[12] S. Ross, H. Wang, H. Zheng, T. Yan, and M. Shirali, "Approaches for predicting dairy cattle methane emissions: From traditional methods to machine learning," Journal of Animal Science, vol. 102, art. no. skae219, 2024, doi: 10.1093/jas/skae219.

[13] A. Dalla Riva, J. Burek, D. Kim, G. Thoma, M. Cassandro, M. De Marchi, and M. Penasa, "The environmental analysis of Asiago PDO cheese: A case study from farm gate-to-plant gate," Italian Journal of Animal Science, vol. 17, no. 1, pp. 250-262, 2018, doi: 10.1080/1828051X.2017.1344936.

[14] C. Salas-Vargas, L. Brunett-Pérez, V. E. Espinosa-Ortiz, and C. G. Martínez-García, "Environmental impact of Oaxaca cheese production and wastewater from artisanal dairies under two scenarios in Aculco, State of Mexico," Journal of Cleaner Production, vol. 311, art. no. 127600, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127600.

[15] C. Rossi et al., "Cradle-to-grave life cycle assessment of buffalo mozzarella cheese supply chain in central Italy," Journal of Agriculture and Food Research, vol. 14, art. no. 100871, 2023, doi: 10.1016/j.jafr.2023.100871.

[16] International Organization for Standardization, ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework, and ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.

[17] International Organization for Standardization, ISO 14067:2018 Greenhouse gases—Carbon footprint of products—Requirements and guidelines for quantification. Geneva, Switzerland: ISO, 2018.

[18] International Dairy Federation, The IDF global carbon footprint standard for the dairy sector, Bulletin of the International Dairy Federation No. 520/2022. Brussels, Belgium: IDF, 2022.

[19] M. E. Van Amburgh et al., "The Cornell Net Carbohydrate and Protein System: Updates to the model and evaluation of version 6.5," Journal of Dairy Science, vol. 98, no. 9, pp. 6361-6380, 2015, doi: 10.3168/jds.2015-9378.

[20] M. E. Van Amburgh, A. Foskolos, E. A. Collao-Saenz, R. J. Higgs, and D. A. Ross, "Modifications to the Cornell Net Carbohydrate and Protein System related to environmental issues—Capability to evaluate nitrogen and phosphorus excretion and enteric carbon dioxide and methane emissions at the animal level," Applied Animal Science, vol. 35, no. 1, pp. 101-113, 2019, doi: 10.15232/aas.2018-01831.

[21] R. J. Higgs, L. E. Chase, D. A. Ross, and M. E. Van Amburgh, "Updating the Cornell Net Carbohydrate and Protein System feed library and analyzing model sensitivity to feed inputs," Journal of Dairy Science, vol. 98, no. 9, pp. 6340-6360, 2015, doi: 10.3168/jds.2015-9379.

[22] R. Andrés-Camelo, J. Mazabel, P. Espitia-Buitrago, R. N. Jauregui, and J. A. Cardoso, "Near-infrared spectroscopy and wet chemistry dataset for forage nutritional quality assessment in Urochloa humidicola," Data in Brief, vol. 60, art. no. 111651, 2025, doi: 10.1016/j.dib.2025.111651.

[23] R. González-Quintero et al., "Carbon footprint, non-renewable energy and land use of dual-purpose cattle systems in Colombia using a life cycle assessment approach," Livestock Science, vol. 244, art. no. 104330, 2021, doi: 10.1016/j.livsci.2020.104330.

[24] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Encuesta Nacional Agropecuaria 2019. Bogotá, Colombia: DANE, 2019.

[25] Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, Análisis situacional de la cadena láctea. Bogotá, Colombia: UPRA, 2021.

[26] Instituto Colombiano Agropecuario, Censo Pecuario Nacional 2023. Bogotá, Colombia: ICA, 2023.

[27] W. Sepúlveda, A. K. Chacón, L. K. Santos, and N. O. Mancilla, "Quesos tradicionales en Colombia: Un estudio que aborda el punto de vista de los consumidores," Archivos de Zootecnia, vol. 72, no. 280, pp. 260-268, 2023.

[28] Z. E. Soto-Varela, C. G. Gutiérrez, Y. de Moya, H. J. Bolívar-Anillo, R. Mattos, and J. L. Villarreal, "Detección molecular de Salmonella spp., Listeria spp. y Brucella spp. en queso artesanal fresco comercializado en Barranquilla: Un estudio piloto," Biomédica, vol. 38, no. 3, pp. 30-36, 2018, doi: 10.7705/biomedica.v38i3.3677.

[29] M. R. Arteaga-Márquez, H. L. Hernández-Hernández, and C. D. Peñate-Quiroz, "Elaboración de un queso procesado tipo untable obtenido a partir de queso costeño," Información Tecnológica, vol. 31, no. 2, pp. 187-194, 2020, doi: 10.4067/S0718-07642020000200187.

Forecasting Actual Energy Demand in the Colombian Energy Market using N-BEATS

Juan-J. Dorado-M
Facultad de Ingeniería
Universidad Icesi
Cali, Colombia
juanjosedoradom@gmail.com

Milton Sarria-Paja
Facultad de Ingeniería
Universidad Icesi
Cali, Colombia
mosarria@icesi.edu.co

***Abstract*—Accurate demand prediction is essential for efficient dispatch in power systems. Capturing the high intra-day variability and seasonal patterns of the Colombian market remains challenging for classical linear forecasting methods. This study proposes a comparative evaluation of deep learning architectures for hourly demand forecasting in the Colombian electricity market: Prophet, a statistical-component-based additive model; LSTM (Long Short-Term Memory), a recurrent neural network designed for complex sequences; and N-BEATS (Neural Basis Expansion Analysis for Time Series), a pure deep learning architecture based on interpretable expansion blocks. We evaluate all models on hourly records extracted from XM's public API for the period August 2022–April 2026. A strictly univariate, fair comparison protocol is adopted, fixing identical backcast and forecast horizons for every architecture. Results obtained on a rolling window evaluation that retrains every model at each weekly forecast origin identify N-BEATS and its interpretable variant as competitive alternatives for addressing this problem, with the latter achieving the lowest mean absolute percentage error (MAPE = 3.49%) and the highest coefficient of determination (R^2 = 0.84), outperforming well known alternatives such as Prophet (MAPE = 4.95%) or LSTM (MAPE = 4.96%). In addition, the trend and seasonality stacks of the interpretable N-BEATS provide an organic decomposition of the forecast that improves interpretability compared to other black-box models such as LSTM, while barely sacrificing accuracy.**

***Index Terms*—Electricity demand forecasting, deep learning, N-BEATS, LSTM, Prophet, time series, Colombian electricity market.**

I. Introduction

The operation of electric power systems directly depends on the ability to effectively forecast various variables. In the modern world, the required energy demand is a starting point for which sufficient accuracy is a requirement to support unit commitment, economic dispatch, and financial settlement. In the Colombian wholesale electricity market, the system operator XM publishes hourly records of *actual demand of the system* (*demanda real del sistema*), the variable that ultimately determines the dispatch instructions sent to generators and the prices paid in the spot market. Errors in the forecast of this signal translate directly into operational reserves that must be activated or into thermal generation, the latter of which is detrimental to the country's context, as it aligns with the UN's net-zero emissions goals [1] and Colombia's own long-term climate strategy [2].

The Colombian power system poses particularly challenging dynamics for short-term load forecasting. The demand curve combines a strong daily cycle, a weekly pattern driven by the working week, and a yearly modulation induced by the rainy and dry seasons. In addition, the country has experienced structural changes during the past few years such as a rapid growing of distributed solar generation or the recovery from the COVID-19 demand shock. These structural shifts violate the stationarity assumptions underlying linear techniques and render a single, hand-crafted feature pipeline ineffective.

This is the setting where Deep learning offers an attractive alternative here, as it learns relevant representations directly from raw data. However, two competing concerns must be balanced. On the one hand, recurrent architectures such as LSTM [3] have demonstrated strong empirical performance for sequential data, but their internal state acts as a black box that is difficult for stakeholders, whether they are operators, regulators, or even external agents such as academics (universities, research groups, or independent researchers). On the other hand, statistical models based on decomposition such as Prophet [2] are transparent but make rigid assumptions about the structure of the components (additive or multiplicative). The N-BEATS architecture [4] was proposed precisely to bridge this gap: it is a pure deep learning model whose blocks can identify time series patterns in a general manner or specialize in recovering trend and seasonality components using Fourier bases. In this way, the flexibility of a fully connected residual network is preserved, with the alternative of decomposing a time series into trend and seasonality stacks.

This study investigates whether the accuracy–interpretability trade-off demonstrated by N-BEATS on standard benchmarks holds for the actual demand of the Colombian system. We deliberately restrict the comparison to a univariate framework, adhering to the core premise of the original N-BEATS proposal [4]. Additionally, all models receive the same number of past observations and forecast an identical horizon. The contributions of this paper are threefold:

- Construction of a recent, 3 years and 8 months hourly dataset of Colombian system demand obtained from the official XM API.
- Fair comparison of the performance of multiple models when solving univariate times series point forecasting:

Prophet, LSTM, generic N-BEATS, and interpretable N-BEATS on a rolling window, multi-step evaluation.
- Analysis of the trend and seasonality components extracted by the interpretable N-BEATS variant, evaluating the trade-off between interpretability and accuracy when using deep learning models.

We acknowledge that this univariate setting deliberately ignores exogenous information such as weather, holidays, and seasonal patterns, among others, and that their inclusion could further reduce forecast error. However, our objective was to explore how these models behave in a scenario characterized by the absence of such variables. Additionally, the evaluation adopts a rolling window protocol in which every model is retrained at each forecast origin, as discussed in Section VII.

This paper is organised as follows. Section II reviews the literature on electricity demand forecasting and the architectures considered in this study. Section III describes the data acquisition and preprocessing. Section IV introduces the four forecasting models and their formulation. Section V details the experimental protocol, including the evaluation metrics and the hyperparameter choices. Section VI reports the quantitative results and analysis. Finally, Section VII summarises the findings and points to opportunities for future work.

II. Related Work

Electricity demand forecasting is a topic that has been an active research area for several decades, its complete overview is beyond the scope of this paper [6]–[8]. We organise the discussion around the three families of models that are most relevant to our experimental study.

A. Classical and statistical approaches

The earliest workhorses for short-term load forecasting were the autoregressive integrated moving average (ARIMA) model and its seasonal variants [9]. These models are well understood from a theoretical standpoint and benefit from a tractable, parsimonious parameterisation. However, ARIMA family models assume linearity in the conditional mean and stationarity of the differenced series, and they typically struggle when multiple seasonalities (daily, weekly, yearly) act simultaneously, as is the case for hourly system demand. Exponential smoothing state-space models, such as ETS [8] and the structural state-space framework of [10], relax some of these assumptions and have remained competitive baselines. Although ARIMA is not included in the present empirical study, we focus on architectures that can natively handle long backcast windows, it is a natural extension and is left for future work, Section VII.

B. Decomposition-based models

A second line of work explicitly decomposes the time series into trend, seasonal, and residual components. Prophet [4] is a popular representative of this approach: it fits a piecewise-linear (or logistic) trend, a Fourier-based seasonality, and a holiday effect using a Bayesian formulation. Its main appeal is interpretability and ease of use, since most components are exposed as plottable artefacts. However, Prophet imposes strong structural priors — in particular, it does not learn the shape of the seasonality from the data but assumes a Fourier basis, and the noise process is taken as i.i.d. Gaussian. For high-frequency demand data with non-stationary residuals, these priors can become a limiting factor.

C. Deep learning approaches

The third family comprises deep learning models that learn the temporal representation directly from the raw signal. Recurrent neural networks, and in particular Long Short-Term Memory networks [3], were among the first deep architectures successfully applied to electricity load forecasting [11], [12]. The LSTM cell maintains an internal cell state and uses input, forget, and output gates to selectively store information across long sequences. While effective, LSTMs are notoriously difficult to interpret and can be expensive to train when the input window is long.

More recently, fully connected and attention-based models have closed (even in some cases overtaken) the gap with recurrent baselines. The N-BEATS architecture proposed by Oreshkin *et al.* [5] stacks blocks of fully connected layers that produce a backcast and a forecast through a doubly residual scheme; depending on the basis used to project the block outputs, the model can be either generic (no inductive bias) or interpretable (trend and seasonality blocks). N-BEATS achieved state-of-the-art results on the M3, M4, and TOURISM datasets, its successor, N-HiTS [18], introduced hierarchical interpolation and multi-rate sampling to reduce computational cost while preserving accuracy, and is a natural candidate for a future extension of this work, and the hybrid method of Smyl [13] based on exponential smoothing and recurrent networks won the M4 competition, signalling the maturity of deep learning for univariate forecasting. Multivariate extensions such as LSTNet [14] are also relevant, but require explicit covariates that are out of the scope of our univariate setting.

D. Forecasting in the Colombian context

Studies focused specifically on the Colombian electricity market have traditionally relied on ARIMA, hybrid econometric models, or variable-driven neural networks that incorporate weather and calendar features. The contribution of the present work is to evaluate, under a strictly univariate, fair-comparison protocol, the performance of N-BEATS on the actual demand series exposed by the official market operator, and to report the trend and seasonality components that the interpretable variant recovers without external supervision.

III. Data Processing

A. Data source and time span

The dataset used in this study is the actual hourly demand of the Colombian power system (*Demanda Real*), retrieved from the official API of the market operator XM through the `pydataxm` client library [9]. We queried the variable `DemaReal` aggregated at the system level (`Sistema`), for the period from 28 August 2022 to 30 April 2026. The query

returns one row per day with 24 columns, one per hour, expressed in kWh. After the preprocessing described below, the resulting series contains $T = 32{,}208$ hourly observations covering 1,342 calendar days.

B. Reshaping and gap filling

The raw response from the API is in wide format, with a single `Date` column and 24 columns named `Values_Hour01, ..., Values_Hour24`. We first reshape the table to long format using a `melt` operation, decoding the hour from the column name and combining it with the date to construct a single timestamp `ds`. The demand value `y` is then converted from kWh to GWh by dividing by 10^6 to keep the network inputs in a numerically stable range. It is essential to ensure that there are no missing values within the selected timeframe, as the sequential nature of time series models makes them highly sensitive to gaps. Consequently, we first detect any missing hours that may be absent from the API response, if any gaps are found, the study period is adjusted accordingly. This process results in our continuous range of records from August 28, 2022, to April 30, 2026.

C. Univariate framing

A key methodological decision in this paper is to keep the comparison strictly univariate: the only input each model has access to is the past demand itself. Calendar features, weather, and other external covariates are deliberately excluded so that any difference in performance can be attributed to the architecture rather than to feature engineering. We adopt this protocol both because it mirrors the setup of the original N-BEATS paper [4] and because it facilitates a clean ablation against Prophet and LSTM.

D. Train / validation / test split

Let $H = 168$ denote the forecast horizon (one week of hourly observations) and $L = 1176$ the backcast length (seven weeks). We reserve the last $K \cdot H = 4 \cdot 168 = 672$ observations for an fixed-training, multi-step evaluation (Section V), and we use everything before that point for model training. From the training portion we build supervised pairs $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ by sliding a window of length $L + H$ over the time axis, with $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^L$ and $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^H$. Within the training partition, the most recent 15% of the resulting sequences are held out as a validation set used for early stopping and learning-rate scheduling, while the remaining 85% feed the optimiser.

Let $H = 168$ denote the forecast horizon (one week of hourly observations) and $L = 1176$ the backcast length (seven weeks). We adopt a rolling window evaluation (Section V) in which every model is trained at each forecast origin on a fixed-length window of the $W = 8{,}760$ most recent hours (one year). The origin is advanced in daily steps over the most recent portion of the series, yielding 22 evaluation windows. For each origin, supervised pairs $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ are built by sliding a window of length $L + H$ over the corresponding training span, with $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^L$ and $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^H$. Within each training window, the most recent 15% of the resulting sequences are held out as a validation set used for early stopping and learning-rate scheduling, while the remaining 85% feed the optimiser.

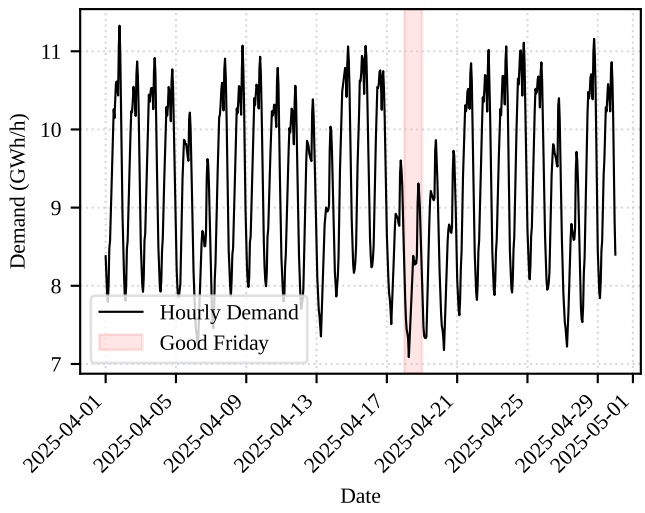


Fig. 1. Hourly demand of the Colombian power system during April 2025. The series exhibits a typical weekly seasonality that is significantly disrupted mid-month due to the Holy Week holidays, specifically reaching its lowest point on *"Good Friday"*.

E. Scaling

Our neural networks are trained on a scaled version of the demand series. We fit a `RobustScaler` on the training portion only, this scaler in particular subtracts the median and divides by the inter-quartile range of $\mathbf{y}$. We chose `RobustScaler` over `StandardScaler` because the Colombian demand series contains frequent holiday-induced dips that act as statistical outliers. In a univariate study, the IQR-based normalisation is less sensitive to such extremes than mean/standard-deviation normalisation. Both LSTM and N-BEATS receive the same scaled inputs to ensure that any difference in performance is attributable to the architecture rather than to preprocessing. Inverse scaling is performed before the metrics in Section V are computed, so that all reported errors are expressed in the original units (GWh). Prophet, on the other hand has been fit on the unscaled series since it expects raw values together with the timestamps.

F. Exploratory observations

A preliminary inspection of the hourly series for April 2025 (Fig. 1) shows that demand patterns remain relatively stable, exhibiting the expected double daily peak with a midday plateau and high values during evening peak hours. Conversely, a marked decline is observed during nighttime and weekends, consistent with the system's operational reality. Furthermore, the data reveals a clear instance of the previously mentioned outliers in Colombian energy demand: a significant rupture in the typical trend on April 18th, which corresponded to *"Good Friday" (Viernes Santo)* on the year 2025.

IV. Forecasting Models

We evaluate four forecasting models in addition to a seasonal naive baseline. All models receive the same input window and produce a vector of $H = 168$ hour-ahead forecasts in a single direct multi-step prediction. To ensure clarity for the reader, the formatting in this document follows these specific conventions: lowercase letters denote scalars, bold lowercase letters represent vectors, and bold uppercase letters signify matrices.

A. Moving Average Baseline (Naive)

Since our hourly time series exhibits a strong daily cycle, we employ a moving average predictor with a period of $p = 24$ (one day) as a baseline. This method tiles the most recently observed day across the entire forecast horizon:

$$\hat{y}_{T+h} = y_{T+1-p+((h-1) \bmod p)}, \quad h = 1, \dots, H, \tag{1}$$

with $p = 24$. Although this baseline ignores most of the timeseries components, it is included only to compare the magnitude of the metrics.

B. Prophet

Prophet [2] models the series as the additive sum of a trend $g(t)$, a periodic component $s(t)$, a holiday component $h(t)$, and a Gaussian residual ϵ_t:

$$y_t = g(t) + s(t) + h(t) + \epsilon_t. \tag{2}$$

The trend $g(t)$ is a piecewise-linear function whose change points are placed automatically and whose slope changes are penalised by a Laplace prior controlled by `changepoint_prior_scale`. The seasonal component $s(t)$ is parameterised as a truncated Fourier series of period P:

$$s(t) = \sum_{n=1}^{N} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{P}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{P}\right) \right], \tag{3}$$

with one set of $\{a_n, b_n\}$ per declared seasonality (yearly, weekly, daily). The amplitude of the Fourier coefficients is regularised through `seasonality_prior_scale`. We use Prophet in additive mode and refit it on the training window of each forecast origin. Details about the hyperparameter search are reported in Section V.

C. LSTM

The Long Short-Term Memory cell [3] updates a hidden state $\mathbf{h}_t$ and a cell state $\mathbf{c}_t$ at every time step using gated nonlinear transformations:

$$\mathbf{i}_t = \sigma(\mathbf{W}_i \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_i \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_i), \tag{4}$$
$$\mathbf{f}_t = \sigma(\mathbf{W}_f \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_f \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_f), \tag{5}$$
$$\mathbf{o}_t = \sigma(\mathbf{W}_o \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_o \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_o), \tag{6}$$
$$\tilde{\mathbf{c}}_t = \tanh(\mathbf{W}_c \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_c \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_c), \tag{7}$$
$$\mathbf{c}_t = \mathbf{f}_t \odot \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i}_t \odot \tilde{\mathbf{c}}_t, \tag{8}$$
$$\mathbf{h}_t = \mathbf{o}_t \odot \tanh(\mathbf{c}_t), \tag{9}$$

where σ denotes the logistic sigmoid and $\odot$ the element-wise product. Our LSTM stack consists of a first recurrent layer with 64 units that returns the full sequence, followed by a second recurrent layer with 32 units that returns only the last hidden state, and finally a dense projection of dimension H that produces the multi-step forecast in a single call. The total number of trainable parameters is exactly 34,856.

D. N-BEATS

N-BEATS [4] is a deep, fully connected architecture organised into stacks of basic blocks. A block receives a backcast vector $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^L$ and produces, through a stack of fully connected layers with ReLU activations followed by two linear projections, two basis-expansion coefficient vectors $\boldsymbol{\theta}^b$ and $\boldsymbol{\theta}^f$:

$$\boldsymbol{\theta}^b = \mathbf{W}^b \mathbf{h}_4, \qquad \boldsymbol{\theta}^f = \mathbf{W}^f \mathbf{h}_4, \tag{10}$$

where $\mathbf{h}_4$ is the output of the last hidden layer of the block. These coefficients are projected onto two basis matrices $\mathbf{V}^b$ and $\mathbf{V}^f$ to yield the block backcast and forecast:

$$\hat{\mathbf{x}}^b = \mathbf{V}^b \boldsymbol{\theta}^b, \qquad \hat{\mathbf{y}}^f = \mathbf{V}^f \boldsymbol{\theta}^f. \tag{11}$$

Blocks are connected through a doubly residual scheme: the input of block ℓ is the residual of the previous block, $\mathbf{x}^{(\ell)} = \mathbf{x}^{(\ell-1)} - \hat{\mathbf{x}}^{b,(\ell-1)}$, and the global forecast is the sum of the block forecasts $\hat{\mathbf{y}} = \sum_\ell \hat{\mathbf{y}}^{f,(\ell)}$. This residual structure is the key that makes the model interpretable when specialised bases are used.

1) Generic N-BEATS: In the generic variant, the basis matrices $\mathbf{V}^b$ and $\mathbf{V}^f$ are learnable parameters with no inductive bias. The model is therefore a deep residual MLP whose only structure is the stacked, doubly residual topology. We use two stacks of three blocks each, with hidden width 256.

2) Interpretable N-BEATS: In the interpretable variant, the basis matrices are fixed and chosen to match a well-known time-series decomposition. The first stack uses a polynomial basis of degree d for the trend block, so that its forecast is constrained to be a smooth function of time:

$$\hat{\mathbf{y}}^{f,\text{trend}} = \sum_{i=0}^{d} \theta_i^f \, \mathbf{t}^i, \quad \mathbf{t} = [0, 1, \dots, H-1]^\top / H. \tag{12}$$

The second stack uses a Fourier basis for the seasonality block:

$$\hat{\mathbf{y}}^{f,\text{seas}} = \sum_{n=0}^{\lfloor H/2 \rfloor} \left[\theta_{n,c}^f \cos(2\pi n \, \mathbf{t}) + \theta_{n,s}^f \sin(2\pi n \, \mathbf{t}) \right]. \tag{13}$$

With this choice of basis, the output of the trend stack is a low-frequency component and the output of the seasonality stack is a band-limited oscillation around zero, which can be plotted independently to inspect what the network has learnt. We use one trend stack and one seasonality stack, each with three blocks. The hidden width is 256 for the trend stack and 1024 for the seasonality stack, and the basis dimensions are $d = 2$ for the trend (so the trend forecast is at most a quadratic function of time) and 84 harmonics for the seasonality.

E. Loss and optimiser

All neural models are trained to minimise the mean squared error between the scaled target $\mathbf{y}$ and the model output $\hat{\mathbf{y}}$:

$$\mathcal{L}(\phi) = \frac{1}{H}\sum_{h=1}^{H}\left(y_h - \hat{y}_h(\phi)\right)^2, \tag{14}$$

with the Adam optimiser [8] and an initial learning rate of 10^{-3}. Additionally, the interpretable N-BEATS uses gradient clipping with $\|\cdot\|_2 \leq 1$ to stabilize the training of the seasonality stack.

V. Experimental Setup

A. Forecasting protocol

All models are evaluated under the rolling window protocol with training at every forecast origin. We fix the forecast horizon at $H = 168$ hours (one week) and the backcast window at $L = 1176$ hours (seven weeks). The forecast origin is advanced in daily steps (24 hours) across the most recent portion of the series, producing $N = 22$ evaluation windows. At each origin, every model is retrained on a window comprising the $W = 8{,}760$ most recent hours (one year) and then produces H point forecasts that are compared to the true future values. This setup mirrors the operational reality in which an operator periodically refreshes the model on recent data to track distributional drift (e.g. the growth of distributed solar generation and the post-COVID recovery), and sweeping 22 daily origins yields a robust estimate than does not relies on a single split.

B. Evaluation metrics

We use three complementary metrics. The coefficient of determination measures explained variance:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{H}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{H}(y_i - \bar{y})^2}, \tag{15}$$

where $\bar{y}$ is the empirical mean of the test window. The root mean squared error reports the typical magnitude of the deviation in the same units as the data (GWh):

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{H}\sum_{i=1}^{H}(y_i - \hat{y}_i)^2}. \tag{16}$$

The mean absolute percentage error provides a unit-free measure that is widely used in the energy industry:

$$\mathrm{MAPE} = \frac{100\%}{H}\sum_{i=1}^{H}\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right|. \tag{17}$$

We report both the pooled metric over all origins and the origin mean with standard deviation across the $N = 22$ evaluation windows.

TABLE I
Approximate execution times for a single training run and for inference over 168 hour horizon.

Model	Training	Inference (168 h)
Prophet	24.6 s ×24	4.97 s
LSTM	6.6 min	0.14 s
N-BEATS	33.2 s	0.37 s
N-BEATS (i)	2.4 min	3.85 s

C. Computational cost

Table I reports the execution times for training and inference, the deep models were implemented in *TensorFlow* and trained on a Google Colab environment using an NVIDIA Tesla T4 GPU (16 GB GDDR6) to handle the computational workload. Prophet's grid search evaluates 24 configurations; each fit takes approximately 24.6 seconds, for a total of approximately 10 minutes. The neural models are trained with a single fixed architecture, hyperparameters were selected based on the guidelines of the original publications and validated on the held-out 15% partition. A full grid search over learning rate, hidden width, and number of stacks was computationally prohibitive for the scope of this paper and was deferred to future work.

D. Hyperparameters

1) Prophet: We perform a grid search over the configurations

$$\texttt{changepoint\_prior\_scale} \in \{0.01, 0.05, 0.10\},$$
$$\texttt{seasonality\_prior\_scale} \in \{0.01, 0.10, 1.0, 10.0\},$$
$$\texttt{seasonality\_mode} \in \{\text{additive}, \text{multiplicative}\},$$

yielding 24 candidate models. The best configuration on the held-out evaluation window was `changepoint_prior_scale` = 0.05, `seasonality_prior_scale` = 10.0, with additive mode. Yearly, weekly, and daily seasonalities are all enabled.

2) LSTM: Trained for up to 256 epochs with batch size 512. Early stopping monitors the validation MSE with a patience of 15 epochs and restores the best weights, and the learning rate is reduced by a factor of 0.5 after 5 stagnant epochs down to a floor of 10^{-6} (`ReduceLROnPlateau`). The total parameter count is approximately 34,856 trainable weights.

3) N-BEATS (generic): Two stacks of three blocks, hidden width 256, basis dimensions $\theta^b = 8$ and $\theta^f = H = 168$, weights not shared within a stack. We train for up to 256 epochs with batch size 512, early stopping patience of 5, and `ReduceLROnPlateau` with factor 0.5 and patience 3.

4) N-BEATS (interpretable): One trend stack and one seasonality stack, three blocks each, hidden widths $[256, 1024]$ for trend and seasonality respectively, basis dimensions $d_{\text{trend}} = 2$ and $d_{\text{seas}} = 84$. We use the same Adam optimiser with gradient clipping (`clipnorm` = 1) to stabilise the seasonal block, training for up to 256 epochs with early stopping patience of 25.

TABLE II
OUT-OF-SAMPLE PERFORMANCE OVER THE 22 ROLLING WINDOW EVALUATION.

Model	R^2 (pooled)	R^2 (per origin) mean $\pm$ std	RMSE (GWh)	MAPE (%)
Naive	0.383	0.41 ± 0.54	0.86	5.78
Prophet	0.658	0.67 ± 0.36	0.64	4.95
LSTM	0.675	0.67 ± 0.18	0.60	4.96
N-BEATS	0.756	0.76 ± 0.20	0.54	4.06
N-BEATS (i)	**0.839**	$\mathbf{0.84 \pm 0.11}$	**0.44**	**3.49**

TABLE III
COEFFICIENT OF DETERMINATION R^2 ACROSS THE EVALUATION WINDOWS.

Model	Min	Mean $\pm$ Std	Max
Naive	-1.06	0.41 ± 0.54	0.78
Prophet	-0.12	0.67 ± 0.36	0.95
LSTM	0.20	0.67 ± 0.18	0.89
N-BEATS	0.20	0.76 ± 0.20	0.95
N-BEATS (i)	0.64	0.84 ± 0.11	0.96

E. Reproducibility

All random seeds (Python, NumPy, TensorFlow, Keras) are fixed to zero before training. The implementation uses TensorFlow 2 and the open-source N-BEATS port from [15]. The experiments were run on a single workstation.

VI. RESULTS

A. Overall comparison

Table II summarises the rolling window evaluation, multi-step evaluation performance of the five models considered in this study. It can be observed how the interpretable variant of N-BEATS dominates the comparison on the three reported metrics: it attains the highest coefficient of determination ($R^2 = 0.839$), the lowest root mean squared error (0.44 GWh) and the lowest mean absolute percentage error ($2.95\% \pm 1.78\%$). N-BEATS is the closest competitor, but it lags by approximately 0.03 in R^2 and by 0.64 percentage points in MAPE. LSTM and Prophet exhibit significantly lower mean accuracy and a markedly higher variance across folds ($R^2 = 0.759 \pm 0.296$ and $R^2 = 0.744 \pm 0.097$ respectively), suggesting that the inductive bias provided by the trend and seasonality bases is what stabilises the interpretable variant. Prophet trails the deep models, and the seasonal naive baseline is, as expected, well behind all data-driven alternatives.

B. Per origin behaviour

The distribution of the per origin coefficient of determination across the 22 evaluation windows is summarised in Table III. The earliest origins, whose one week forecast windows fall on the first half of April 2026, are consistently the most difficult ones for every model: Prophet drops to a negative R^2 (as low as -0.12) and the generic N-BEATS to 0.20, whereas the interpretable N-BEATS never falls below 0.64 even on these windows. This sharp difference is primarily attributable to the fact that these windows coincide with *Holy Week* (*Semana Santa*) of 2026, a period that includes Good Friday (3 April) and Easter Sunday (5 April). During Holy Week, Colombian industrial and commercial activity decreases markedly, producing atypical demand patterns that deviate significantly from the weekly seasonality learnt during training. Because our protocol does not incorporate exogenous holiday indicators, no model can fully anticipate this structural break. The interpretable N-BEATS shows the smallest degradation on these difficult windows (the highest minimum R^2 and the tightest spread across origins), which we attribute to the strong inductive bias of the polynomial trend basis, whose smooth prior partially absorbs the level shift.

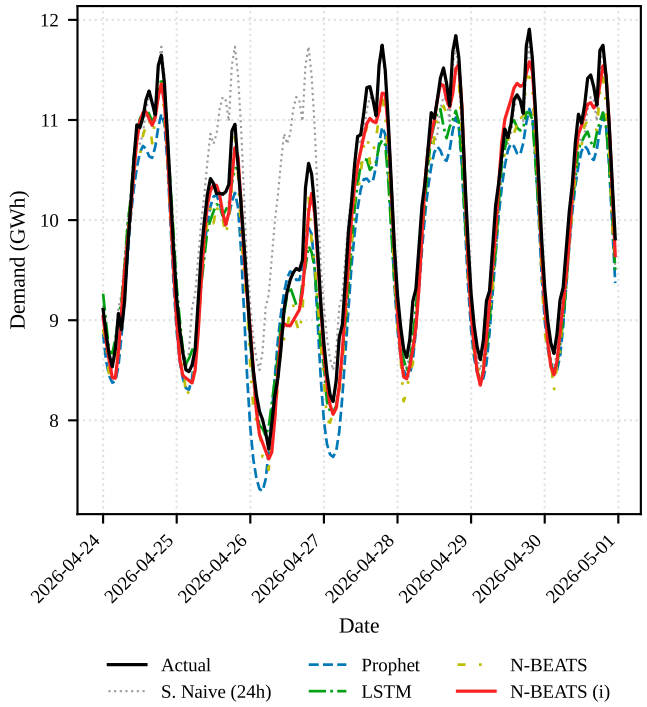


Fig. 2. Predictions of all models on the most recent evaluation window (168 hours ending 30 April 2026). Black: ground truth. The interpretable N-BEATS is the only model that simultaneously tracks the daily peaks and the night-time troughs.

C. Qualitative inspection of the forecasts

Fig. 2 overlays the predictions of all models on the most recent evaluation window (the 168 hours ending on 30 April 2026). Two observations stand out. First, the LSTM and the N-BEATS variants reproduce the daily double peak with high fidelity, while Prophet smooths it out. Second, the interpretable N-BEATS tracks both the magnitude of the peaks and the level of the night-time minima, which are the regions where most of the MAPE of the other models is concentrated.

D. Trend and seasonality decomposition

One distinctive advantage of the interpretable N-BEATS is that the contribution of each stack can be inspected as an

independent forecast. Fig. 3 shows the decomposition obtained by manually executing the residual stacking of the trained model and recording the partial forecast produced by the trend and seasonality stacks for the last evaluation window. The trend stack outputs an almost flat signal in the range $[9.90, 10.08]$ GWh (the typical mean level of the system at this time of the year), with intra-window standard deviation below 0.01 GWh. The seasonality stack produces a band-limited oscillation in the range $[-2.35, 1.53]$ GWh, with a standard deviation of 1.11 GWh that closely matches the intra-window standard deviation of the real signal (1.09 GWh). In other words, almost all of the explanatory power for short-term variability is concentrated in the seasonality stack, while the trend stack absorbs the slowly varying mean. This decomposition is obtained organically, without any handcrafted feature, and provides a direct visual interpretation of what the network has learnt.

E. Discussion

The experimental evidence corroborates Oreshkin *et al.* [4]: the doubly residual, basis expansion design of N-BEATS is well suited to univariate forecasting, and the interpretable variant incurs no measurable accuracy penalty in return for its structure. In fact, on the Colombian demand series, the interpretable variant outperforms its generic counterpart, presumably because the polynomial-and-Fourier prior matches the true generating process closely enough to act as a useful regulariser. The LSTM remains a strong baseline, but its forecasts are harder to audit. Prophet is the most interpretable of the classical baselines, yet its rigid architecture is unable to capture the full intra day shape of the demand curve. Taken together, these observations suggest that for the operational problem of hourly demand forecasting for the Colombian system over a one-week horizon, the interpretable N-BEATS model offers the superior trade-off between accuracy, stability across evaluation origins, and explainability. This balance is particularly valuable for building operator confidence in the deployment of these models for decision-making.

VII. Conclusions and Future Work

Throughout this paper, we have presented a fair comparison of four forecasting models for the actual hourly demand of the Colombian electricity system, specifically addressing the univariate timeseries forecasting problem. The models evaluated were: Prophet, LSTM, generic N-BEATS, and interpretable N-BEATS. Using the same backcast and forecast horizons across all architectures and a rolling window evaluation that retrains every model at each weekly forecast origin, the interpretable N-BEATS achieved the best results on the three reported metrics, with a MAPE of 3.49% and a pooled R^2 of 0.839. Generic N-BEATS came second, with the LSTM and Prophet baselines trailing. Beyond the headline numbers, the results show two notable patterns: the interpretable variant of N-BEATS has the smallest variance across origins, and its trend and seasonality stacks decompose the forecast in a way that

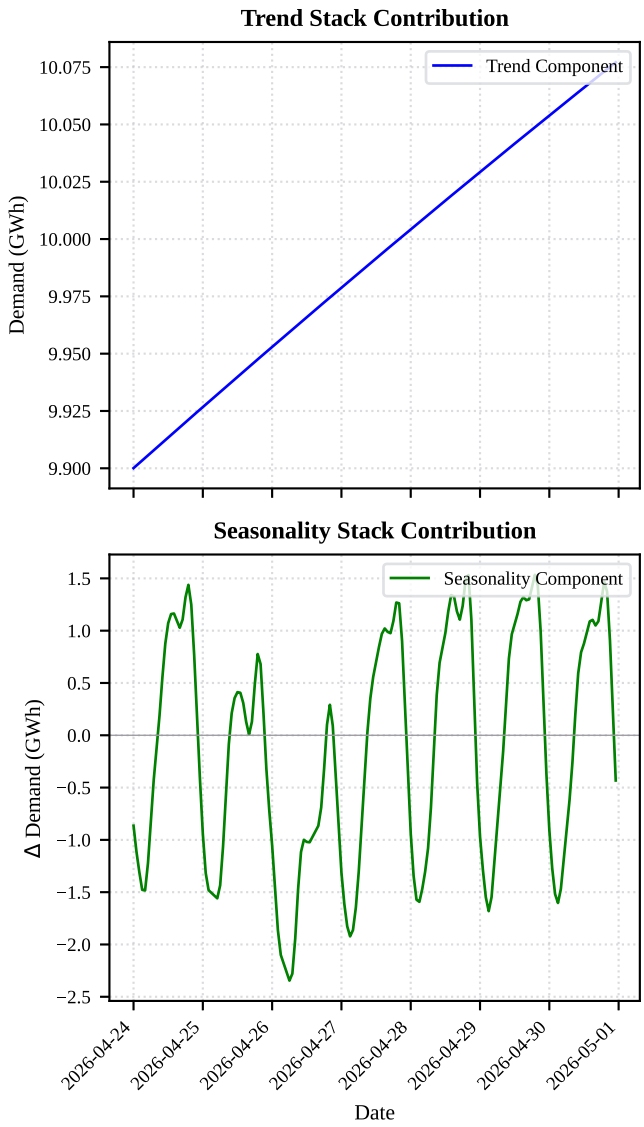


Fig. 3. Decomposition produced by the interpretable N-BEATS for the last evaluation fold. Top: contribution of the trend stack, capturing the low-frequency movement of the series. Bottom: contribution of the seasonality stack, which oscillates around zero to represent periodic daily and weekly fluctuations.

matches the variability of the real signal very closely. As previously discussed, this provides an intuitive visual breakdown and enhances the model's overall interpretability.

The origin analysis further revealed that the evaluation windows coinciding with *Holy Week* (*Semana Santa*), a period of markedly atypical demand in Colombia, were consistently the hardest ones for every model. Despite the absence of any explicit holiday encoding, the interpretable N-BEATS exhibited the smallest degradation on these outlier weeks.

From a computational standpoint, it is worth to mention that the interpretable variant requires approximately $10\times$ longer inference time than the generic N-BEATS (3.85 s vs. 0.37 s for a single 168-hour forecast, Table I). This overhead stems

from the larger hidden width of the seasonality stack and the additional basis-expansion projections. While the absolute latency remains acceptable for an hourly dispatch cycle, it represents a practical trade-off that operators should consider when deploying the model in systems that rely heavily on their latency in order to provide an answer.

These findings support the use of interpretable N-BEATS as the default architecture for short-term system-level demand forecasting in this setting, the Colombian context, particularly the trend and seasonality decomposition provide the transparency required by the stakeholders. It is also important to mention that these results suggest that the inductive bias provided by polynomial and Fourier bases is not in tension with predictive performance, even on a non-stationary, real-world series.

Several extensions would consolidate the research presented here. First, including additional benchmarks such as (S)ARIMA would provide a more robust baseline against classical methods. Although widely used, this model was excluded due to time constraints. Similar considerations apply to other high-performance models, such as Smyl's M4-winning hybrid [13] or N-HiTS [18], the successor to N-BEATS.

Furthermore, while this study focused specifically on univariate behavior, preliminary proof-of-concept tests incorporating calendar features, such as holidays, day of the week indicators, and cyclical sine/cosine hour encodings yielded promising results. This suggests that a future study incorporating exogenous variables to improve precision is a natural next step. Regarding the temporal scope, extending the forecast horizon from one to three months ahead would further test the architecture's robustness under distributional drift, complementing the weekly rolling window already adopted in this study.

Interestingly, moving from hourly to daily granularity led to a decrease in performance, likely due to the significant reduction in data points (by a factor of 24). Finally, extending these models to forecast demand at the regional level—for instance, using a shared backbone with dedicated heads for each region, could help propagate this methodology to operational tools requiring finer geographical resolution.

References

[1] United Nations, "Net Zero Coalition: Delivering on the Paris Agreement," 2021. [Online]. Available: https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition

[2] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "E2050: Colombia's Long-Term Climate Strategy," 2021. [Online]. Available: https://e2050colombia.com/

[3] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long short-term memory," *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, 1997.

[4] S. J. Taylor and B. Letham, "Forecasting at scale," *The American Statistician*, vol. 72, no. 1, pp. 37–45, 2018.

[5] B. N. Oreshkin, D. Carpov, N. Chapados, and Y. Bengio, "N-BEATS: Neural basis expansion analysis for interpretable time series forecasting," in *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2020.

[6] R. Weron, "Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future," *International Journal of Forecasting*, vol. 30, no. 4, pp. 1030–1081, 2014.

[7] F. Petropoulos *et al.*, "Forecasting: Theory and practice," *International Journal of Forecasting*, vol. 38, no. 3, pp. 705–871, 2022.

[8] R. J. Hyndman and G. Athanasopoulos, *Forecasting: Principles and Practice*, 3rd ed. OTexts, 2021.

[9] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2015.

[10] A. C. Harvey, *Forecasting, Structural Time Series Models and the Kalman Filter*. Cambridge University Press, 1989.

[11] N. G. Polson and V. O. Sokolov, "Deep learning for short-term traffic flow prediction," *International Journal of Forecasting*, 2017.

[12] J. Lago, F. De Ridder, and B. De Schutter, "Forecasting spot electricity prices: Deep learning approaches and empirical comparison of traditional algorithms," *Applied Energy*, vol. 221, pp. 386–405, 2018.

[13] S. Smyl, "A hybrid method of exponential smoothing and recurrent neural networks for time series forecasting," *International Journal of Forecasting*, vol. 36, no. 1, pp. 75–85, 2020.

[14] G. Lai, W.-C. Chang, Y. Yang, and H. Liu, "Modeling long- and short-term temporal patterns with deep neural networks," in *SIGIR*, 2018, pp. 95–104.

[15] XM S.A. E.S.P., "pydataxm: Python library for accessing the Colombian energy market data," 2023. [Online]. Available: https://github.com/EquipoAnaliticaXM/API_XM

[16] D. P. Kingma and J. Ba, "Adam: A method for stochastic optimization," in *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2015.

[17] ARM Software, "tspfnbeats: TensorFlow implementation of N-BEATS," 2022. [Online]. Available: https://github.com/ARM-software/tspfnbeats

[18] C. Challu, K. G. Olivares, B. N. Oreshkin, F. Garza Ramirez, M. Mergenthaler Canseco, and A. Dubrawski, "N-HiTS: Neural hierarchical interpolation for time series forecasting," in *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 37, no. 6, pp. 6989–6997, 2023.

A Literature Review on Anthropomorphic Motion Generation

Sara Maradiago
Facultad de Ingeniería
Universidad ICESI
Cali, Colombia
sara.maradiago@u.icesi.edu.co

Daniel Gómez-Marín
Facultad de Ingeniería
Universidad ICESI
Cali, Colombia
dgomez@icesi.edu.co

***Abstract*—This paper presents a systematic literature review of Human Motion Generation (HMG) research published between 2016 and 2025. Following the PRISMA methodology, the review analyzes representative studies from major computer vision, machine learning, and computer graphics venues in order to identify the principal architectural paradigms that shaped modern HMG systems. The paper is organized around three major transitions in the field: recurrent and autoregressive approaches for sequential motion prediction, probabilistic latent-variable frameworks for stochastic motion generation, and Transformer- and diffusion-based models for long-range and multimodal motion synthesis. Across these paradigms, the reviewed literature progressively incorporates conditioning signals based on language, audio, scene geometry, trajectories, and interaction goals to improve controllability and motion realism. This review compares the modeling assumptions, motion representations, conditioning strategies, and evaluation methods adopted across these approaches, while also discussing recurring challenges such as temporal drift, limited motion diversity, physical plausibility, and computational cost. Finally, the paper examines emerging trends in controllable multimodal generation, geometric guidance, and research accessibility through open-source tools and pretrained models, outlining current limitations and future directions for scalable and realistic motion synthesis.**

***Index Terms*—Human Motion Synthesis, Generative Models, Contextual Interaction**

I. Introduction

This paper presents a systematic literature review following the PRISMA methodology [1] that examines research published between 2016 and 2025, focusing on the evolution of the architectural paradigms that shaped modern Human Motion Generation (HMG) systems. HMG studies the steerable computational synthesis of human movement in three-dimensional space [2]. As an interdisciplinary field spanning computer vision, machine learning, and character animation, HMG has applications in film and game production [3, 4, 5], virtual and augmented reality [6, 7, 8], robotics [9, 10], and human-computer interaction [11, 12].

A central challenge in data-driven HMG is generating coherent motion continuations from previously observed motion or high-level conditioning signals. This generative process implies a movement data prior may evolve into multiple valid futures depending on factors such as intention, environmental affordances, interaction goals, or social context [6, 13, 14]. As discussed by Holden et al. [2], earlier research treated motion synthesis as a sequential forecasting problem in which future digital human-skeleton poses were predicted autoregressively using deterministic regression objectives. Given that similar motion prefixes can evolve into semantically distinct futures, these methods often converged toward averaged or unrealistic trajectories [6, 15]. This limitation motivated the adoption of probabilistic generative frameworks capable of modeling multimodal motion distributions [4].

In parallel, as reflected across multiple recent architectures, HMG research increasingly recognized that human motion depends not only on kinematic structure, but also on semantic intent, scene context, rhythm, interaction goals, and communication cues. This motivated the incorporation of conditioning mechanisms based on language [8, 10, 16], audio [17], scene geometry [18], and control signals through advances in latent-variable modeling, attention mechanisms, and multimodal representation learning.

Although HMG encompasses broader paradigms such as physics-based animation, biomechanical simulation, reinforcement learning for embodied agents, and video-based motion synthesis, the methods reviewed in this paper primarily belong to the data-driven character animation paradigm. Within this formulation, motion is represented through skeletal joint positions, joint rotations, or parameters of parametric human body models derived from motion capture corpora [2, 11, 19, 20]. This shared representation framework provides a coherent basis for comparing the architectural evolution of autoregressive, adversarial, variational, Transformer, and diffusion-based approaches.

Beyond reviewing architectural evolution, this paper also examines the practical accessibility of contemporary HMG research. This review examines how datasets, pretrained models, open-source tools, and improved computational efficiency are progressively lowering the barriers to experimentation and reproducibility for new researchers entering the field.

The remainder of this review is organized around the major architectural transitions identified through the literature analysis, namely recurrent and autoregressive approaches, probabilistic latent-variable generative frameworks, and Transformer- and diffusion-based motion generation models. In addition, the review discusses deployment paradigms and practical accessibility factors that increasingly shape how

HMG systems are developed, evaluated, and adopted in research practice.

II. Methodology

This systematic literature review was conducted following the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) framework [1] to ensure a transparent and reproducible study selection process. The review focused on deep learning approaches for 3D Human Motion Generation (HMG) published between 2016 and 2025.

A. Data Sources and Search Strategy

Records were retrieved from Google Scholar[21], IEEE Xplore [22], the International Conference on Computer Vision (ICCV) [23], the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) [24], the International Conference on Learning Representations (ICLR) [25], the Association for the Advancement of Artificial Intelligence Conference (AAAI) [26], ACM Multimedia [27], ACM Transactions on Graphics (TOG) [28], Computer Graphics Forum (CGF) [29], and the International Journal of Computer Vision (IJCV) [30], selected because they represent the principal publication venues for computer vision, machine learning, and computer graphics research related to HMG.

The search process was implemented through the Semantic Scholar Graph API, which served as a unified retrieval interface across the selected sources. The following keyword queries were used:

- *human motion generation*
- *human motion synthesis*
- *character motion synthesis*
- *text-to-motion*

The initial retrieval identified 460 records. Automatic deduplication using Semantic Scholar identifiers, DOI metadata, and normalized title matching reduced the dataset to 363 unique records for screening.

B. Automated Screening and Eligibility

The screening pipeline combined source filtering, title analysis, abstract analysis, and keyword-based heuristics to identify studies related to generative 3D human motion synthesis.

Target sources were defined through explicit venue-matching rules corresponding to ICCV, CVPR, ICLR, AAAI, ACM Multimedia, ACM Transactions on Graphics, Computer Graphics Forum, and IJCV, while workshop papers were excluded through predefined venue exclusion patterns.

Studies were included when:

1) The paper matched a target venue and the title contained both motion-subject and generation-task patterns.
2) Non-target venue papers demonstrated strong relevance through title and abstract analysis combined with generative-model terminology such as *model* or *framework*.

Studies were excluded when:

1) The title matched hard exclusion patterns including *survey*, *review*, *benchmark*, *retrieval*, *prediction*, *text-to-video*, *video generation*, *robot*, or *point cloud*.
2) The work focused on non-generative tasks such as monitoring, reconstruction, analysis, or robotics.
3) The paper failed to satisfy the venue and relevance criteria.

From the 363 screened records, 273 studies were excluded during title and abstract review. The remaining 90 full-text articles were assessed for eligibility, of which 60 were excluded for not focusing on 3D human motion generation, generative modeling, or skeletal motion representations. Finally, 30 studies were included in the review. Due to conference page limitations, the discussion focuses on the most representative works within the identified architectural paradigms.

C. Supplementary Manual Search

Additional studies were identified through backward citation searching of highly relevant papers retrieved during screening. References from influential works were manually inspected to identify related studies on motion synthesis, probabilistic motion prediction, motion editing, and whole-body motion generation not retrieved during the initial query.

III. Architectural Paradigms

The selected studies were compared to identify the main architectural paradigms and conceptual transitions that shaped the evolution of modern HMG systems. The analysis focused on how different modeling assumptions addressed four recurring challenges in HMG: sequential motion prediction, probabilistic motion diversity, long-range temporal modeling, and controllable multimodal conditioning.

The reviewed literature revealed three major generational transitions in deep learning-based HMG. Early recurrent and autoregressive architectures formulated motion synthesis as a sequential forecasting problem conditioned on previous poses. Probabilistic latent-variable frameworks later introduced stochastic generation mechanisms to model motion uncertainty and multiple plausible futures. More recent Transformer- and diffusion-based approaches replaced local recurrent generation with global attention and iterative denoising processes, enabling scalable multimodal conditioning and more controllable long-range motion synthesis.

A. Recurrent and autoregressive approaches

Prior to the adoption of deep learning, human motion synthesis was commonly addressed through motion graphs, procedural animation, and physics-based controllers. While these enabled controllable animation, they often required extensive manual design and domain-specific constraints [2]. In response to these limitations, early deep learning research demonstrated that neural networks could instead learn continuous latent motion manifolds directly from motion capture data [2]. This transition from manual heuristics to learned representations established the structural foundation for the recurrent and autoregressive motion generation paradigms that followed.

Recurrent and autoregressive architectures subsequently became the dominant paradigm for early neural HMG systems, formulating motion synthesis as a sequential prediction problem conditioned on previously observed poses [3, 12]. These architectures typically represented motion as temporal sequences of skeletal joint rotations or joint positions derived from motion capture data. Most early systems relied on recurrent neural networks (RNNs), Long Short-Term Memory networks (LSTMs), or autoregressive decoders, making them particularly suitable for real-time locomotion, character control, and interactive animation [7, 31].

Early research focused on improving temporal stability, motion continuity, and kinematic consistency during long motion sequences. Several works explored alternative motion representations and conditioning mechanisms to reduce artifacts such as pose freezing, rotational instability, and long-term drift. Phase-Functioned Neural Networks (PFNNs) introduced phase-dependent activations for terrain-aware locomotion control [31], while QuaterNet replaced Euler-angle rotations (which are prone to discontinuities such as gimbal lock) with quaternion representations and differentiable forward kinematics losses to improve skeletal stability [3]. Auto-Conditioned recurrent networks further reduced long-horizon degradation (where autoregressive predictions progressively diverge or collapse over time) by recursively feeding generated poses during training [12]. Other approaches incorporated skeletal priors, graph-based structures, and hierarchical recurrent modules to improve articulated body coherence [9, 15]. Representative quantitative improvements achieved by these models are summarized in Table I.

As recurrent architectures matured, they also expanded toward controllable motion synthesis conditioned on higher-level inputs such as text and scene context. Text2Action and Language2Pose introduced autoregressive generation from natural language descriptions [10, 32], while Neural State Machine incorporated scene geometry and interaction objectives for real-time character-scene interaction [7]. These developments broadened HMG from pure motion prediction toward interactive and semantically conditioned motion generation.

Despite their early success, recurrent and autoregressive methods remained fundamentally constrained by sequential generation. Given that motion was synthesized frame-by-frame, prediction errors accumulated over time, often producing temporal drift, frozen poses, or motion collapse [19]. Moreover, autoregressive decoding lacked direct access to global temporal context, limiting tasks such as motion infilling, editing, and globally constrained synthesis. These limitations motivated the development of probabilistic latent-variable models capable of representing motion uncertainty and multiple plausible futures.

B. Probabilistic latent-variable extensions

As recurrent predictors struggled to model the multimodal nature of human motion, HMG research progressively shifted toward probabilistic latent-variable models capable of representing uncertainty and motion diversity [13, 33]. Rather than predicting a single deterministic future, these approaches learned latent motion distributions from which multiple plausible motion trajectories could be sampled [6, 34]. Variational Autoencoders (VAEs), Generative Adversarial Networks (GANs), and hierarchical latent-variable architectures became the dominant paradigms during this transition [35, 36].

Early latent-space approaches focused on improving temporal stability while reducing the tendency of recurrent predictors to collapse toward static mean poses [33]. Recurrent VAE models introduced stochastic latent sampling into sequential motion generation, while adversarial approaches such as HP-GAN and BiHMP-GAN enabled probabilistic future prediction by generating multiple plausible continuations from the same motion history [6, 13]. Other methods incorporated hierarchical latent representations, skeletal priors, and structured temporal dependencies to improve motion coherence and long-term consistency [15, 36]. Representative quantitative improvements achieved by these frameworks are summarized in Table II.

As probabilistic modeling matured, latent generative frameworks expanded toward controllable and interactive synthesis. Action2Motion introduced action-conditioned latent motion generation, where motion synthesis was guided by discrete action labels such as walking, jumping, or boxing [35]. Similarly, MotionVAE, MoGlow, and related approaches enabled controllable locomotion and interactive character animation with improved realism by conditioning latent motion generation on trajectories or high-level control signals [34, 37]. Other works explored long-horizon generation and future-guided latent conditioning to improve temporal diversity and sequence stability [14, 38]. These developments established stochastic motion generation as a central objective in HMG research.

Despite their advantages over recurrent models, probabilistic latent-variable approaches still faced important limitations. GAN-based systems were often difficult to optimize, whereas VAE-based methods frequently produced over-smoothed motions due to latent regularization [6, 36]. Moreover, many architectures continued to rely on recurrent autoregressive decoders, inheriting error accumulation and temporal drift from sequential generation [34]. Nevertheless, these probabilistic formulations established the foundations for later Transformer-based and diffusion-based paradigms for scalable and controllable long-range motion synthesis.

C. Transformer and diffusion-based models

Transformer-based architectures introduced a major shift in HMG by replacing recurrent temporal modeling with global self-attention mechanisms capable of capturing long-range dependencies across entire motion sequences [19]. Unlike autoregressive recurrent models, Transformers enabled sequence-level generation with improved temporal coherence, parallel decoding, and flexible multimodal conditioning. ACTOR demonstrated that Transformer-based VAEs could generate variable-length action-conditioned motions in a non-autoregressive manner [19], while FACT extended self-

TABLE I
REPRESENTATIVE RECURRENT AND AUTOREGRESSIVE HMG MODELS FOR SEQUENTIAL MOTION SYNTHESIS.

Reported evaluation metrics include prediction error, Euler-angle reconstruction error, motion continuity, and human preference studies.

Model	Year	Primary Metric	Quantitative Result	Evaluation Focus
Deep Motion Framework	2016	Motion synthesis quality	Learned continuous motion manifolds from mocap data	Neural motion synthesis and editing from learned latent motion representations
PFNN	2017	Motion continuity	Stable real-time locomotion over complex terrain	Phase-conditioned locomotion control and terrain adaptation
Text2Action	2017	Human preference	Higher motion diversity than Seq2Seq baselines	Text-conditioned autoregressive action generation
acLSTM	2018	Prediction error at 640ms	2.55 vs. 18.73 Seq2Seq	Reduction of motion freezing through auto-conditioning
QuaterNet	2018	Mean angle error	0.21 (velocity model) vs. 0.93 ERD	Rotational stability using quaternion representations
JL2P (Language2Pose)	2019	Human preference	75% realism preference (vs. 85% Ground Truth)	Semantic consistency between text and motion
Neural State Machine	2019	Interaction stability	Real-time adaptive interactions with scene geometry	Goal-conditioned character-scene interaction
RNN-SPL	2019	Euler joint angle error	12.84 vs. 16.29 vanilla RNN	Spatial kinematic consistency

TABLE II
REPRESENTATIVE PROBABILISTIC LATENT-VARIABLE HMG FRAMEWORKS BASED ON VARIATIONAL AND ADVERSARIAL MOTION GENERATION.

Standard evaluation criteria include Fréchet Inception Distance (FID), Inception Score (IS), motion realism, foot sliding, and sequence duration.

Model	Year	Primary Metric	Quantitative Result	Evaluation Focus
Recurrent VAE	2017	Prediction error	4.12 at 210 frames vs. 19.49 ERD	Variational recurrent motion synthesis with stochastic latent sampling
HP-GAN	2018	Probabilistic motion prediction	Multiple plausible futures generated from identical motion history	Adversarial probabilistic generation of stochastic future trajectories
BiHMP-GAN	2019	Mean angle error (MAE)	1.67 MAE at 1000ms vs. 1.85 HP-GAN	Bidirectional adversarial motion prediction with temporal consistency
MoGlow	2019	Motion realism	Comparable locomotion quality to natural motion	Controllable probabilistic locomotion synthesis using normalizing flows
Action2Motion	2020	FID	2.458 on HumanAct12 vs. 5.61 Act-MoCoGAN	Action-conditioned latent motion generation using temporal VAEs
MotionVAE	2020	Foot sliding	0.10 cm/frame (close to real motion statistics)	Latent motion control for interactive character animation
Dynamic Future Net	2020	Motion diversity	Higher diversity than autoregressive models	Future-guided latent motion generation
Hierarchical DLVM	2020	FID / IS	10.45 FID / 7.52 IS	Hierarchical probabilistic latent modeling for diverse motion synthesis
Perpetual Motion	2020	Sequence duration	Plausible motion generation up to 72,000 frames (10 minutes)	Unbounded long-horizon latent motion synthesis

attention to music-conditioned dance synthesis [17]. These approaches established global sequence modeling as a scalable alternative to recurrent generation.

The introduction of diffusion-based models marked another major transition in HMG research. Inspired by denoising diffusion probabilistic models (DDPMs), these methods generated motion through iterative denoising processes that progressively transformed Gaussian noise into coherent skeletal sequences [4]. Compared to autoregressive baselines, diffusion models improved motion diversity, realism, and controllability while supporting flexible conditional generation. MotionDiffuse demonstrated the effectiveness of diffusion for text-conditioned synthesis [4], and subsequent works extended diffusion frameworks to motion editing, interpolation, infilling, trajectory control, and multimodal interaction synthesis [39, 40]. Representative quantitative improvements achieved by Transformer and diffusion-based frameworks are summarized in Table III.

Recent research increasingly emphasizes controllability and multimodal conditioning. OmniControl introduced sparse spatial guidance mechanisms for arbitrary joint and timestep control [39], while unified frameworks integrated text, audio, scene context, and interaction constraints within shared generative representations [20, 41]. Other approaches incorporated large language models (LLMs) to decompose complex textual instructions into localized body-part actions and temporal sub-tasks [16]. These developments considerably expanded the expressiveness and fine-grained controllability of HMG systems.

Current work additionally focuses on physical plausibility, computational efficiency, and large-scale multimodal learning [20, 42, 43]. Reinforcement-learning-guided diffusion frameworks reduced artifacts such as foot sliding and unstable contacts [42], while alternative architectures such as Motion Mamba employed state-space models (SSMs) to achieve linear computational complexity for long-sequence synthesis [43]. At the same time, large-scale multimodal systems trained on heterogeneous motion corpora have pushed HMG toward

foundation-style generative models capable of generalized synthesis across tasks, conditions, and modalities [20, 40].

Overall, the reviewed literature reveals a progressive transition from deterministic sequential prediction toward probabilistic, multimodal, and globally conditioned motion generation frameworks. Early recurrent and autoregressive models established the foundations of neural temporal motion synthesis but remained limited by error accumulation and restricted long-range temporal reasoning [3, 44]. Subsequent probabilistic latent-variable approaches introduced stochastic motion generation capable of modeling multiple plausible futures [6, 13]. More recently, Transformer- and diffusion-based architectures combined global temporal modeling, multimodal conditioning, and controllable synthesis within unified generative frameworks [4, 19, 20]. In parallel, evaluation methodologies also evolved from subjective perceptual assessments and task-specific animation metrics toward more standardized quantitative benchmarks such as FID-based measures, retrieval accuracy, and motion-text alignment metrics that facilitate reproducible comparison across models and datasets (see Tables I, II, and III). Collectively, these developments shifted HMG from primarily kinematic prediction toward multimodal motion generation informed by context and semantics.

IV. Deployment Paradigms

Beyond architectural differences, HMG systems that were reviewed for this paper differ in how they are deployed in practice, reflecting trade-offs between motion quality, controllability, computational cost, and real-time responsiveness [31]. At one end, offline approaches typically operate on entire motion sequences with an emphasis on temporal consistency and motion quality [4]. At the other, online approaches operate under real-time constraints and generate motion incrementally in response to user input or environmental changes [39]. Recent systems increasingly combine elements of both paradigms, balancing high-quality generation with interactive controllability [39].

A. Offline generation

Offline motion generation assumes access to the complete motion sequence during inference. Instead of incremental pose prediction, these methods optimize entire motion segments jointly, allowing them to maintain coherent motion dynamics over extended durations [19].

This paradigm is commonly associated with architectures that process or optimize motion sequences at the segment level rather than through strictly reactive frame-by-frame control, including convolutional autoencoders, Transformer-based VAEs, graph-based trajectory models, and diffusion frameworks [2, 4, 19, 44]. Given that a full human motion sequence is available, constraints can be applied globally across time, making offline methods particularly suitable for tasks such as interpolation, infilling, style transfer, and text-conditioned synthesis [45, 46, 47].

Offline generation is widely used in applications that prioritize motion quality over responsiveness, including film production, animation pipelines, and precomputed game animations [48]. These methods generally produce smooth and temporally coherent motion, but their computational cost often limits their applicability in real-time interactive settings [43].

B. Online generation

Online motion generation, on the other hand, operates under real-time constraints, where motion is generated causally and updated incrementally in response to user input, environmental changes, control signals, and previously generated motion context. In contrast to offline approaches, online systems do not assume access to a complete motion sequence corpus during inference. Instead, these systems continuously predict future poses conditioned on the current motion state, recent temporal history, and external control conditions [7, 31, 38].

This paradigm is particularly important in interactive applications such as video games, virtual reality, robotics, and character controllers, where responsiveness and stability are essential. Architectures such as Phase-Functioned Neural Networks (PFNN) and Neural State Machines (NSM) map high-level objectives, terrain information, or scene context into immediate pose updates [7, 31]. Similarly, recurrent motion models continuously adapt generated motion to changing conditions over time [3, 12].

Compared to offline methods, online systems prioritize low latency and interactive controllability over global sequence optimization [7]. Although these approaches can generate stable long-term motion, autoregressive online approaches are often more susceptible to temporal drift and accumulated prediction errors [19].

C. Hybrid generation

Recent research increasingly combines offline generative models with lightweight real-time control systems in order to balance motion quality and responsiveness [4, 41]. These hybrid approaches typically leverage offline-trained latent motion models or diffusion priors as foundational latent motion representations, which are then adapted during inference using reinforcement learning, autoregressive controllers, or trajectory adaptation modules [34, 49].

In parallel, improvements in efficient Transformer architectures and accelerated diffusion sampling are enabling traditionally offline models to operate in more interactive settings. As a result, the distinction between offline and online generation is becoming progressively less rigid, with many modern systems combining elements of both paradigms [34, 39, 49].

Overall, deployment paradigms in HMG reflect different trade-offs between motion quality, controllability, and computational efficiency. Offline approaches prioritize global temporal coherence and high-fidelity synthesis, whereas online systems emphasize responsiveness and real-time adaptability. Hybrid frameworks increasingly bridge these paradigms by combining large-scale generative priors with lightweight control mechanisms, reflecting a broader trend toward interactive yet high-quality motion generation.

TABLE III
REPRESENTATIVE TRANSFORMER- AND DIFFUSION-BASED HMG FRAMEWORKS FOR MULTIMODAL AND CONTROLLABLE MOTION GENERATION.

The standard benchmarking metrics reported are Fréchet Inception Distance (FID), kinetic Fréchet Inception Distance (FIDk), R-Precision and skate ratio.

Model	Year	Primary Metric	Quantitative Result	Evaluation Focus
FACT	2021	FIDk	35.35 vs. 69.18 DanceNet	Cross-modal Transformer attention for music-conditioned dance synthesis
ACTOR	2021	FID	0.11 (NTU-13) vs. 0.33 Action2Motion	Non-autoregressive Transformer-VAE generation of full motion sequences
Bailando	2022	FIDg	9.62 vs. 10.60 Ground Truth	Dance generation with choreographic memory and Actor–Critic GPT refinement
MotionDiffuse	2022	R-Precision (Top-1)	0.491 on KIT-ML	Diffusion-based text-to-motion synthesis with improved diversity and realism
UDE	2022	Top-1 Accuracy	8.21 vs. 7.01 MotionCLIP	Unified multimodal motion generation from text, audio, and action conditions
OmniControl	2023	FID	0.181 on HumanML3D	Spatially guided diffusion for arbitrary joint and timestep control
AttT2M	2023	FID	0.112 on HumanML3D	Multi-perspective attention for fine-grained text-motion alignment
NIFTY	2023	Interaction realism	Improved object-aware interaction consistency	Object-conditioned human-object interaction synthesis
Motion Mamba	2024	FID	0.281 on HumanML3D	Linear-complexity state-space motion modeling for efficient long-sequence synthesis
BAMM	2024	FID	0.200 vs. 0.473 MLD	Bidirectional autoregressive motion modeling with high-fidelity generation
FineMoGen	2024	FID	0.151 on KIT-ML	Fine-grained spatiotemporal motion synthesis and editing
ReinDiffuse	2025	Skate ratio	0.058 vs. 0.102 MDM	Physics-aware diffusion refinement using reinforcement learning rewards
GenM3	2025	FID	0.046 on HumanML3D	Large-scale multimodal pretraining for generalized motion generation
Morph	2025	FID	0.041 on HumanML3D	Simulation-free physical optimization for motion refinement
SMD	2025	FID	0.214 vs. 1.067 T2M	Shape-conditioned mesh diffusion for directly renderable motion generation

V. RESEARCH ACCESSIBILITY AND PRACTICAL ENTRY POINTS

This review was motivated by the practical objective of identifying accessible entry points for researchers approaching Human Motion Generation for the first time. Although state-of-the-art HMG systems increasingly rely on large multimodal datasets, sophisticated architectures, and computationally expensive training procedures, the reviewed literature also reveals the emergence of a progressively more accessible research ecosystem built around public datasets [4, 16], reusable motion representations [19, 43], pretrained models [5, 20], and open-source implementations [17, 49].

This growing ecosystem has improved reproducibility and reduced the practical overhead associated with experimentation and prototyping. As a result, meaningful contributions are increasingly possible through targeted research problems such as multimodal conditioning, motion editing, controllable generation, lightweight adaptation strategies, and dataset construction, even when large-scale computational infrastructure is not available [5, 43, 50].

A major factor supporting this accessibility is the availability of large-scale public motion datasets. Benchmarks such as Human3.6M [6, 20, 44], CMU MoCap [2, 19, 35], and AMASS [4, 16, 17] provide diversity and scale for training modern architectures and evaluating performance under standardized protocols. Beyond traditional motion-capture corpora, the community has also introduced datasets tailored to multimodal generation tasks, including text-to-motion benchmarks such as HumanML3D and KIT-ML [8, 16, 39, 43], music-driven motion datasets such as AIST++ [17, 20], and scene-aware interaction datasets such as PROX and BEHAVE [11, 18, 40].

In parallel, advances in computer vision have increasingly enabled the reconstruction of human motion directly from ordinary RGB video recordings without requiring specialized motion-capture equipment [4]. By combining 2D keypoint detection, 3D pose lifting, and parametric body models such as SMPL [16, 17, 19], researchers can construct motion datasets from unconstrained "in-the-wild" videos. This capability is particularly valuable for collecting rare actions, interaction behaviors, or contextual motion patterns that remain underrepresented in curated motion-capture datasets [20].

Motion acquisition has also become more flexible through low-cost capture solutions and synthetic data generation pipelines [11, 51]. Consumer devices such as smartphones can support lightweight motion acquisition workflows; for example, ARKit[52] can estimate object motion and infer manipulation behavior [11]. Similarly, simulated environments derived from commercial video games can provide large-scale synthetic datasets with controllable ground-truth annotations for 3D pose, trajectory information, and scene context [18, 51].

From a computational perspective, modern HMG systems remain demanding due to the increasing scale of multimodal datasets, long temporal horizons, and the complexity of diffusion-based generative models. However, recent research has also focused on improving computational efficiency

through latent motion representations, accelerated diffusion sampling, and more scalable sequence modeling architectures [43, 48].

For example, latent-space diffusion approaches reduce the dimensionality of the generation process, while architectures such as Motion Mamba [43] replace quadratic attention mechanisms with sequence models that scale linearly with temporal length. These optimizations increasingly enable experimentation, fine-tuning, and inference on commercially available GPU hardware, even if large-scale end-to-end training remains computationally intensive [43].

Finally, open-source software ecosystems have become a major driver of accessibility and reproducibility in HMG research [5]. Open-source repositories provide publicly available source code, pretrained models, or training pipelines through platforms like GitHub, reducing implementation overhead and facilitating reproducibility across the community. General-purpose deep learning frameworks such as PyTorch [19, 44], together with the specialized motion library Fairmotion [17, 49], further simplify experimentation and reduce engineering complexity for new researchers entering the field.

VI. Conclusions

This review analyzed the evolution of Human Motion Generation (HMG) research between 2016 and 2025 through a PRISMA-guided systematic review methodology. Starting from an initial large-scale literature search, progressively stricter filtering stages based on relevance, methodological scope, and technical contribution resulted in a curated corpus of representative works spanning recurrent models, probabilistic generative architectures, Transformers, diffusion frameworks, and multimodal motion systems. By organizing these works according to architectural paradigms, deployment strategies, conditioning mechanisms and accesibility, this review aimed to provide a structured overview of the major technological transitions that shaped modern HMG research.

The reviewed literature reveals a clear architectural evolution from deterministic recurrent predictors toward probabilistic and multimodal generative frameworks. Early recurrent and autoregressive approaches established the foundations of neural temporal motion modeling but suffered from error accumulation, limited long-range consistency, and poor handling of motion uncertainty [3, 44]. Subsequent work introduced latent-variable models, adversarial training, Transformers, and diffusion-based architectures capable of modeling global temporal dependencies, generating multiple plausible futures, and integrating conditioning signals such as language, audio, scene geometry, and interaction context [4, 8, 13, 19]. Collectively, these developments transformed HMG from a purely kinematic prediction problem into a broader multimodal embodied generation task.

The analysis of deployment paradigms showed that offline, online, and hybrid generation systems reflect different trade-offs between motion quality, responsiveness, controllability, and computational efficiency [31, 39]. Offline approaches remain dominant in applications that prioritize globally coherent motion synthesis tasks due to their ability to optimize globally coherent motion sequences, whereas online systems prioritize low-latency interaction for applications such as games, robotics, and virtual environments [4, 7]. More recent hybrid frameworks combine pretrained generative priors with lightweight real-time controllers, reducing the distinction between offline and interactive motion generation [34, 49].

This review also presents how HMG research has become progressively more accessible due to the availability of large public datasets, pretrained models, open-source implementations, and reusable motion representations [5, 8]. Resources such as AMASS, HumanML3D, and AIST++, together with frameworks like PyTorch and Fairmotion, substantially reduce implementation overhead and improve reproducibility [17, 49]. At the same time, advances in efficient architectures such as Motion Mamba and latent-space generation increasingly enable experimentation on commercially available hardware, lowering practical barriers for new researchers entering the field [43, 48].

Despite this progress, several open challenges remain unresolved, including the high computational cost of diffusion-based generation, limited physical realism, semantic ambiguity in multimodal conditioning, and the lack of standardized evaluation protocols capable of capturing perceptual motion quality [10, 39, 43]. Future progress will likely depend on richer motion representations, stronger semantic grounding through Large Language Models, and physically consistent generation frameworks capable of modeling complex human-object and human-scene interactions [16, 40, 53]. Overall, the field is progressively moving toward unified generalist systems that combine perception, reasoning, and motion synthesis within a single multimodal framework [20].

References

[1] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, et al., "The prisma 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, n71, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71.

[2] D. Holden, J. Saito, and T. Komura, "A Deep Learning Framework for Character Motion Synthesis and Editing," *ACM Transactions on Graphics*, 2016. DOI: 10 . 1145 / 3596711 . 3596789. [Online]. Available: https : / / www . semanticscholar . org / paper / f67d67ea1b416c5dd5f103f684abce9c20ef9ddb.

[3] D. Pavllo, D. Grangier, and M. Auli, "QuaterNet: A Quaternion-based Recurrent Model for Human Motion," in *British Machine Vision Conference*, 2018.

[4] M. Zhang et al., "MotionDiffuse: Text-Driven Human Motion Generation With Diffusion Model," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022. DOI: 10.1109/TPAMI.2024.3355414.

[5] M. Petrovich et al., "Multi-Track Timeline Control for Text-Driven 3D Human Motion Generation," 2024. DOI: 10.1109/CVPRW63382.2024.00197.

[6] E. Barsoum, J. Kender, and Z. Liu, "HP-GAN: Probabilistic 3D human motion prediction via GAN," in *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2018. DOI: 10.1109/CVPRW.2018.00191.

[7] S. Starke, H. Zhang, T. Komura, and J. Saito, "Neural State Machine for Character-Scene Interactions," *ACM Transactions on Graphics*, 2019. DOI: 10.1145/3355089.3356505.

[8] C. Guo et al., "Generating Diverse and Natural 3D Human Motions from Text," 2022. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.00509.

[9] R. Villegas, J. Yang, D. Ceylan, and H. Lee, "Neural Kinematic Networks for Unsupervised Motion Retargetting," in *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00901.

[10] C. Ahuja and L.-p. Morency, "Language2Pose: Natural Language Grounded Pose Forecasting," in *International Conference on 3D Vision*, 2019. DOI: 10.1109/3DV.2019.00084.

[11] J. Li, J. Wu, and C. K. Liu, "Object Motion Guided Human Motion Synthesis," *ACM Transactions on Graphics*, 2023. DOI: 10.1145/3618333.

[12] Y. Zhou, Z. P. Li, S. Xiao, C. He, Z. Huang, and H. Li, "Auto-conditioned recurrent networks for extended complex human motion synthesis," in *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2018.

[13] J. N. Kundu, M. Gor, and R. V. Babu, "BiHMP-GAN: Bidirectional 3D Human Motion Prediction GAN," in *AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2018. DOI: 10.1609/AAAI.V33I01.33018553.

[14] W. Chen, H. Wang, Y. Yuan, T. Shao, and K. Zhou, "Dynamic Future Net: Diversified Human Motion Generation," in *ACM Multimedia*, 2020. DOI: 10.1145/3394171.3413669.

[15] E. Aksan, M. Kaufmann, and O. Hilliges, "Structured Prediction Helps 3D Human Motion Modelling," in *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2019. DOI: 10.1109/ICCV.2019.00724.

[16] Y. Wang et al., "Fg-T2M++: LLMs-Augmented Fine-Grained Text Driven Human Motion Generation," *International Journal of Computer Vision*, 2025. DOI: 10.1007/s11263-025-02392-9.

[17] R. Li, S. Yang, D. A. Ross, and A. Kanazawa, "AI Choreographer: Music Conditioned 3D Dance Generation with AIST++," 2021. DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.01315.

[18] J. Wang, S. Yan, B. Dai, and D. Lin, "Scene-aware Generative Network for Human Motion Synthesis," 2021. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.01203.

[19] M. Petrovich, M. J. Black, and G. Varol, "Action-Conditioned 3D Human Motion Synthesis with Transformer VAE," in *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2021. DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.01080.

[20] J. Li et al., "GENMO: A GENeralist Model for Human MOtion," 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2505.01425.

[21] *Google scholar*, Accessed: 2026-05-10, 2025. [Online]. Available: https://scholar.google.com/.

[22] *Ieee xplore digital library*, Accessed: 2026-05-10, 2025. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/.

[23] *Ieee/cvf international conference on computer vision (iccv)*, Accessed: 2026-05-10, 2025. [Online]. Available: https://iccv.thecvf.com/.

[24] *Ieee/cvf conference on computer vision and pattern recognition (cvpr)*, Accessed: 2026-05-10, 2025. [Online]. Available: https://cvpr.thecvf.com/.

[25] *International conference on learning representations (iclr)*, Accessed: 2026-05-10, 2025. [Online]. Available: https://iclr.cc/.

[26] *Aaai conference on artificial intelligence*, Accessed: 2026-05-10, 2025. [Online]. Available: https://aaai.org/conference/aaai/.

[27] *Acm multimedia conference*, Accessed: 2026-05-10, 2025. [Online]. Available: https://www.acmmm.org/.

[28] *Acm transactions on graphics*, Accessed: 2026-05-10, 2025. [Online]. Available: https://dl.acm.org/.

[29] *Computer graphics forum*, Accessed: 2026-05-10, 2025. [Online]. Available: https://onlinelibrary.wiley.com/journal/14678659.

[30] *International journal of computer vision*, Accessed: 2026-05-10, 2025. [Online]. Available: https://www.springer.com/journal/11263.

[31] D. Holden, T. Komura, and J. Saito, "Phase-Functioned Neural Networks for Character Control," *ACM Transactions on Graphics*, 2017. DOI: 10.1145/3072959.3073663.

[32] H. Ahn, T. Ha, Y. Choi, H. Yoo, and S. Oh, "Text2Action: Generative Adversarial Synthesis from Language to Action," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2018. DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460608.

[33] I. Habibie, D. Holden, J. Schwarz, J. Yearsley, and T. Komura, "A Recurrent Variational Autoencoder for Human Motion Synthesis," in *British Machine Vision Conference*, 2017. DOI: 10.5244/C.31.119.

[34] H. Y. Ling, F. Zinno, G. Cheng, and M. V. D. Panne, "Character controllers using motion VAEs," *ACM Transactions on Graphics*, 2020. DOI: 10.1145/3386569.3392422.

[35] C. Guo et al., "Action2Motion: Conditioned Generation of 3D Human Motions," in *ACM Multimedia*, 2020. DOI: 10.1145/3394171.3413635.

[36] S. Ghorbani, C. Wloka, A. Etemad, M. Brubaker, and N. Troje, "Probabilistic Character Motion Synthesis using a Hierarchical Deep Latent Variable Model," *Computer graphics forum (Print)*, 2020. DOI: 10.1111/cgf.14116.

[37] G. Henter, S. Alexanderson, and J. Beskow, "MoGlow: probabilistic and controllable motion synthesis using normalising flows," *ACM Transactions on Graphics*, 2019. DOI: 10.1145/3414685.3417836.

[38] Y. Zhang, M. J. Black, and S. Tang, "Perpetual Motion: Generating Unbounded Human Motion," 2020.
[39] Y. Xie, V. Jampani, L. Zhong, D. Sun, and H. Jiang, "OmniControl: Control Any Joint at Any Time for Human Motion Generation," 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2310.08580.
[40] P. Cong, Z. Wang, Y. Ma, and X. Yue, "SemGeoMo: Dynamic Contextual Human Motion Generation with Semantic and Geometric Guidance," 2025. DOI: 10.1109/CVPR52734.2025.01636.
[41] Z. Zhou and B. Wang, "UDE: A Unified Driving Engine for Human Motion Generation," 2022. DOI: 10.1109/CVPR52729.2023.00545.
[42] G. Han, M. Liang, J. Tang, Y. Cheng, W. Liu, and S. Huang, "ReinDiffuse: Crafting Physically Plausible Motions with Reinforced Diffusion Model," 2024. DOI: 10.1109/WACV61041.2025.00222.
[43] Z. Zhang, A. Liu, I. Reid, R. Hartley, B. Zhuang, and H. Tang, "Motion Mamba: Efficient and Long Sequence Motion Generation with Hierarchical and Bidirectional Selective SSM," 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2403.07487.
[44] W. Mao, M. Liu, M. Salzmann, and H. Li, "Learning Trajectory Dependencies for Human Motion Prediction," in *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2019. DOI: 10.1109/ICCV.2019.00958.
[45] M. Kaufmann, E. Aksan, J. Song, F. Pece, R. Ziegler, and O. Hilliges, "Convolutional Autoencoders for Human Motion Infilling," 2020. DOI: 10.1109/3DV50981.2020.00102.
[46] Y. Cai et al., "A Unified 3D Human Motion Synthesis Model via Conditional Variational Auto-Encoder*," in *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2021. DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.01144.
[47] Z. Chang, E. J. C. Findlay, H. Zhang, and H. P. H. Shum, "Unifying Human Motion Synthesis and Style Transfer with Denoising Diffusion Probabilistic Models," 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2212.08526.
[48] D. Wei et al., "NeRM: Learning Neural Representations for High-Framerate Human Motion Synthesis," 2024.
[49] L. Siyao et al., "Bailando: 3D Dance Generation by Actor-Critic GPT with Choreographic Memory," 2022. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01077.
[50] L. Xu et al., "ActFormer: A GAN-based Transformer towards General Action-Conditioned 3D Human Motion Generation," 2022. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.00212.
[51] Z. Cao, H. Gao, K. Mangalam, Q.-Z. Cai, M. Vo, and J. Malik, "Long-term Human Motion Prediction with Scene Context," in *European Conference on Computer Vision*, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-58452-8_23.
[52] Apple Inc., *Arkit*, https://developer.apple.com/augmented-reality/arkit/, Accessed: 2026-05-09, 2025.
[53] Z. Wang et al., "Move as you Say, Interact as you can: Language-Guided Human Motion Generation with Scene Affordance," 2024. DOI: 10.1109/CVPR52733.2024.00049.

Arquitectura de cibersalud para el análisis de la marcha y la estimación del riesgo de caídas mediante sensores pasivos Wi-Fi/CSI con IA explicable en la enfermedad de Parkinson

Samuel Rivera Navarro
Facultad de Ingeniería
Universidad ICESI
Cali, Colombia
samuel.riveranavarro@u.icesi.edu.co

Andrés Navarro Cadavid
Facultad de Ingeniería
Universidad ICESI
Cali, Colombia
anavarro@icesi.edu.co

Resumen*—El monitoreo continuo, pasivo y no invasivo de los síntomas motores en la enfermedad de Parkinson (EP) constituye un desafío clínico sin resolver. Los enfoques basados en dispositivos vestibles imponen cargas de adherencia y barreras de accesibilidad, mientras que las evaluaciones clínicas periódicas no logran capturar la variabilidad sintomática en entornos reales. Este artículo presenta una revisión sistemática realizada bajo las directrices PRISMA 2020, que analiza 79 estudios publicados entre 2013 y 2025 sobre sensado inalámbrico para el monitoreo motor en EP, con énfasis en la detección de congelación de la marcha (FOG) y caídas. Los resultados confirman que el sensado mediante información de estado del canal Wi-Fi (CSI) es la modalidad dominante, presente en el 53.2% de los estudios, con exactitudes reportadas entre 93% y 99.7% para la detección de FOG y caídas usando arquitecturas de aprendizaje profundo convolucionales, recurrentes e híbridas. La revisión identifica una brecha crítica, ningún estudio existente combina sensado exclusivo Wi-Fi CSI con detección simultánea de FOG y caídas validada en pacientes reales con EP. Adicionalmente, la infraestructura Wi-Fi 6 y Wi-Fi 7 permanece inexplorada como plataforma de sensado biomédico y no existe presencia latinoamericana en la literatura revisada. Estos hallazgos definen los requisitos de diseño para una arquitectura de cibersalud que integre sensado pasivo Wi-Fi CSI e inteligencia artificial explicable para el monitoreo continuo domiciliario de pacientes con EP

Palabras clave—Enfermedad de parkinson, Wi-Fi CSI, FOG, detección de caídas.

I. INTRODUCCIÓN

La enfermedad de Parkinson es una de las enfermades degenerativas que más afecta a la población, aproximadamente en estados unidos se presentan más de 1,1 millones de casos de personas que han sido diagnosticadas con la enfermedad de Parkinson y se espera que esta cifra aumente a 1,2 millones para 2030 [32]. Aproximadamente entre los años 2016 y 2020 según datos reportados por el ministerio de salud se tenían 148.224 personas afectadas por esta enfermedad en Colombia [33] siendo el Parkinson el segundo trastorno degenerativo del sistema nervioso más común después de la enfermedad de Alzheimer. A medida que la enfermedad de Parkinson progresa, el deterioro cognitivo y motor se manifiesta con mayor intensidad, lo que permite observar algunos de los síntomas característicos como los temblores y la inestabilidad al caminar. Debido a las alteraciones en la marcha y el equilibrio propias de esta patología, los pacientes presentan un mayor riesgo de caídas, lo que en muchos casos hace necesario que requieran asistencia para desplazarse. Asimismo, la evaluación del riesgo de caídas se realiza exclusivamente durante visitas clínicas periódicas, lo que genera una brecha ya que no existen sistemas capaces de monitorear de manera continua, pasiva y no invasiva el riesgo de caídas en entornos reales del hogar. Las alternativas basadas en dispositivos portables requieren el uso constante por parte de los pacientes, lo que conduce a una baja adherencia, y su alto costo limita aún más su accesibilidad. La importancia de desarrollar sistemas precisos de detección de FOG radica en su impacto directo sobre la seguridad del paciente. El FOG afecta a entre el 50% y el 80% de los pacientes en etapas avanzadas de la EP y es una de las principales causas de caídas accidentales [34] A pesar de su gravedad, la evaluación clínica tradicional del FOG y el riesgo de caída se basa frecuentemente en cuestionarios subjetivos o en la observación visual directa por especialistas. Estos métodos presentan limitaciones críticas: no logran capturar la variabilidad de los síntomas en el entorno real del paciente y pueden verse afectados por el "síndrome de la bata blanca", donde los síntomas desaparecen temporalmente frente al clínico. Por ello, existe una necesidad urgente de arquitecturas de ciber salud que permitan un monitoreo objetivo, continuo y no invasivo en el hogar [34].

II. METODOLOGÍA

A. Estrategia de Búsqueda y Fuentes de Información

Se llevó a cabo una búsqueda en bases de datos académicas como Scopus, IEEE explorer y Science Direct. Los términos de búsqueda se estructuraron utilizando operadores booleanos, combinando palabras clave como:

- **Población:** *"Parkinson's disease", "PD".*

- **Síntomas:** *"Freezing of Gait", "FOG", "falls", "fall risk".*
- **Tecnología:** "Channel State Information", "CSI", "Wi-Fi sensing", "wearable sensors", "deep learning".

B. Criterios de inclusión y exclusión

1) Criterios de inclusión

Se incluyeron estudios que cumplían con la totalidad de los siguientes criterios:

a) Emplean tecnología de radiofrecuencia (Wi-Fi CSI, Wi-Fi RSSI, radar, SDR), sensores vestibles o sistemas de visión computacional para el reconocimiento de actividades humanas o síntomas motores.

b) Abordan al menos una de las siguientes tareas objetivo: reconocimiento de actividades (HAR), detección de caídas, análisis de marcha, detección de FOG, tracking o signos vitales.

c) Reportan al menos una métrica de desempeño cuantitativa (exactitud, F1-score, AUC, sensibilidad o especificidad).

2) Criterios de Exclusión

Fueron excluidos los estudios que presentaban alguna de las siguientes características:

a) Publicaciones duplicadas o versiones previas de trabajos posteriormente publicados en revista (en cuyo caso se conservó la versión de mayor impacto).

b) Artículos publicados en idiomas diferentes al inglés o al español

c) Solamente artículos Open Access

C. Proceso de seleccion de estudios:

El proceso de selección siguió el flujo de cuatro etapas del diagrama PRISMA: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión [31]. En la fase de identificación se recuperaron los registros de las 3 bases de datos consultadas. Tras la eliminación de duplicados, se realizó un filtrado por título y resumen, aplicando los criterios de exclusión. Los estudios que superaron esta fase fueron sometidos a lectura completa del texto para verificar el cumplimiento íntegro de los criterios de inclusión. Todos los pasos fueron realizados de forma independiente y los desacuerdos resueltos por consenso con el director de la investigación.

La Fig. 1 ilustra el diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección. Se identificaron inicialmente 478 registros (3 provenientes de bases de datos y 475 de registros adicionales). Tras la eliminación de 95 duplicados y registros removidos por otras razones, 380 registros fueron sometidos a cribado por título y resumen, de los cuales 301 fueron excluidos. Los 79 reportes restantes fueron evaluados para elegibilidad en texto completo; dado que ninguno fue excluido en esta fase, los 79 estudios pasaron a conformar el corpus final de la revisión.

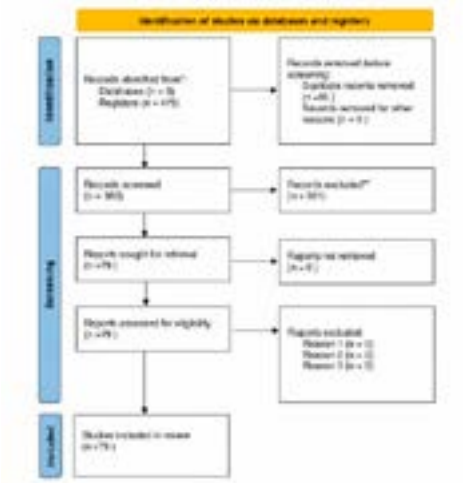


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de estudios.

D. Extracción y síntesis de datos

Para cada estudio incluido se extrajo un conjunto estandarizado de 15 campos de datos, diseñado para capturar las dimensiones tecnológica, metodológica y clínica relevantes para los objetivos de la revisión. La Tab. 1 presenta el protocolo de extracción de datos.

#	Campo	Descripción / valores posibles
1	Cita IEEE	Referencia completa en formato IEEE
2	Año de publicación	Año de publicación (2013–2025)
3	Título	Título completo de la publicación
4	Autores	Lista completa de autores
5	Revista / Conferencia	Nombre del medio de publicación
6	País de afiliación	País de la institución principal
7	Tipo de estudio	Experimental, Survey/Revisión, Dataset/Benchmark, Revisión sistemática, Factibilidad
8	Tarea objetivo	HAR, Caídas, FOG, Tracking, Marcha, Gestos, Signos vitales, Identificación, Temblor
9	Tecnología de sensing	Wi-Fi CSI, Wearable, Radar, Visión, SDR, RSSI, IMU
10	Hardware utilizado	Plataforma de adquisición (Intel 5300, Nexmon, USRP, etc.)
11	Banda de frecuencia	Frecuencia central y ancho de banda de operación
12	Características de la población	Tamaño (N), edad, condición clínica (sano/EP)
13	Algoritmo(s) principal(es)	Arquitectura de ML/DL empleada
14	Dataset utilizado	Propio / Público (nombre)
15	Métrica principal de desempeño	Accuracy, F1, AUC, Sensibilidad/Especificidad (con valor reportado)

Tabla 1. Protocolo de extracción de datos

III. RESULTADOS

La mayoría de los trabajos encontrados corresponde a estudios experimentales específicamente 61 estudios es decir, 77.2% lo que sugiere que ya no solo se plantean ideas, sino que también se están evaluando soluciones en escenarios reales. Le siguen las revisiones y surveys que corresponden a 9 estudios es decir el 11,4%, lo estudios de datasaets(5 estudios, 6,3%), las revisiones sistemáticas(3 estudios, 3,8%) y un único esutido de factibilidad. El predominio de investigaciones experimentales muestra que el área está avanzando activamente, pero aún existen pocas síntesis sistemáticas sobre la relación entre Wi-Fi CSI y la Enfermedad de Parkinson.

Repescto al análisis que se encuentra en la Tab. 2 de las tecnologías de sensing empleadas en los estudios incluidos en la revisión podemos observar lo siguiente

El Wi-Fi CSI es el tipo de tecnología que más predomina en la revisión con 42 estudios (53.2%). De estos, 29 lo emplean como tecnología exclusiva de *sensing*, sin combinar con otros sensores, lo que valida su viabilidad como sistema de monitoreo pasivo y no invasivo [3], [7]. El trabajo de Yang et al. [1] demostró que la información del estado del canal (CSI) a diferencia del RSSI, esta tecnología captura información más detallada de la señal, permitiendo reconocer actividades y movimientos incluso a través de obstáculos. Estudios posteriores como el de Wang et al. [5] y el survey de Yousefi et al. [3] ayudaron a establecer los fundamentos del Wi-Fi CSI sensing, impulsando su uso en aplicaciones biomédicas.

Los sensores inerciales (wereables e IMU) aparecen en 17 estudios que equivale aproximadamente al 21,5% y son la tecnología predominante en la detección de congelación de marcha (FOG) en parkinson hasta el momento, con trabajos como Pardoel et al. [22], Li et al. [12] y Bikias et al. [13]. Sin embargo, estos requieren que el paciente lleve los sensores de forma continua, lo que impone cargas de adherencia y posibles incomodidades en pacientes con temblor y rigidez.

#	Tecnología	%	% del total	Observación
1	Wi-Fi CSI	42	53.2%	Tecnología dominante; 29 usos exclusivos
2	Wearable (IMU/acelerómetro)	17	21.5%	Segunda más frecuente; predomina en FOG/EP
3	Wi-Fi (sin extracción CSI)	11	13.9%	Basado en RSSI o métricas de capa MAC
4	Visión computacional	7	8.9%	Cámaras RGB o infrarrojas; no pasivo
5	IMU (standalone)	7	8.9%	Sensores inerciales sin Wi-Fi
6	Radar	6	7.6%	FMCW o UWB; costo elevado
7	SDR (radio definida por software)	3	3.8%	USRP; hardware especializado

Tabla 2. Tecnologías de sensing identificadas en la revisión.

Las tareas objetivo abordadas por los estudios incluidos reflejan diferentes enfoques que se muestran en la Tab. 3 muestran lo siguiente

La detección de caídas lidera con 26 estudios, confirmando la relevancia clínica que tiene la identificación de este problema, especialmente en adultos mayores y pacientes con Parkinson [4]. Palipana et al. Propusieron FallDeFi [4], un sistema de detección de caídas basado en el uso del Wi-Fi CSI con 93% de precisión, que sentó las bases del sensing pasivo para este tipo de evento. Trabajos más recientes como el de Zhou et al. y Preechakarnjanadit et al. [27] muestran la evloucion hacia arquitecturas más robustas con modelos CNN-LSTM, GNN y *Transformer*.

La detección de FOG, con 19 estudios, es el tercer tipo de actividad más investigada y la de mayor relevancia clínica para la presente propuesta. FOG es uno de los síntomas más complejos de la enfermedad de Parkinson, asociado directamente con el riesgo de caídas y con un deterioro severo de la calidad de vida [22]. Los trabajos de Tahir et al. [8], Shan et al. [10] y Habib et al.[19], presentan un estado del arte en esta tarea.

El análisis de los algoritmos utilizados se observa una transición de los enfoques convencionales de aprendizaje automático hacia modelos más avanzados de aprendizaje profundo.

Las redes neuronales convolucionales (CNN) se encuentran presentes en 17 estudios (21,5%), es la arquitectura que más frecuentemente se utilizó. Su capacidad para extraer características espaciales de espectrogramas y matrices CSI las hace especialmente adecuadas para el reconocimiento de patrones en señales inalámbricas [8]. Yang ¬et al. proponen SenseFi [17], un benchmark comprehensivo que incluye CNN, LSTM y Transformers para el sensing Wi-Fi, facilitando la comparación estandarizada de arquitecturas.

Las redes LSTM y variantes recurrentes cuenta con 10 estudios siendo la segunda arquitectura más empleada, especialmente en tareas de detección de FOG y análisis de marcha donde la naturaleza temporal de la señal CSI es determinante [19], Habib et al. proponen una fusión de BiLSTM con mecanismo de atención dual (D^2ANN) para la detección de FOG [20], alcanzando 98.66% de exactitud.

Los modelos transformer tienen 3 estudios dentro de esta revisión, estos artículos están en un periodo de 2023-2025, reflejando la tendencia global de adopción de este tipo de arquitecturas en señales de tiempo [17] Preechakarnjanadit et al. [27] realizan una comparación directa entre CNN-LSTM, GNN y transformer para detección de caídas en tiempo real via Wi-Fi CSI.

#	Tarea objetivo	N
1	Detección de caídas	26
2	Reconocimiento de actividades (HAR)	24
3	Detección de FOG (congelación de marcha)	19
4	Tracking / localización	11
5	Análisis de marcha	8
6	Reconocimiento de gestos	8
7	Signos vitales	3

Tabla 3. Tareas objetivo abordadas en los estudios incluidos

4 estudios emplean transfer Learning [8] y tres emplean esquemas de few-shot o meta-learning [25]. Estos enfoques son relevantes dentro de un contexto clínico en el cual la disponibilidad de datos etiquetados de pacientes con Parkinson es limitada. Bahadori et al. [25] se demuestran que sistemas multi antena multi-receptor con few-shot Learning pueden llegar a alcanzar 99.25% de exactitud.

Los Random Forests y SVM aparecen principalmente en trabajos de benchmark comparativo [24]. Ali et al. [24] realizan una comparación sistemática de algoritmos ML para sensing Wi-Fi CSI, concluyendo que las redes neuronales profundas (DNN: 99.76%) superan consistentemente a los métodos clásicos (KNN: 94.52%), aunque estos últimos ofrecen mayor interpretabilidad.

Por ultimo los estudios incluidos reportan un rango de desempeño amplio, pero en general elevado. La exactitud (Accuracy) es la métrica mas frecuentemente reportada. Para la detección de caídas basada en Wi-Fi CSI, los mejores resultados están entre 93-99% con Palipana et al. [4] reportando 93%, Guo et al. reportando 99% con BiLSTM y Chen at al. [18] logrando 93.8% en pacientes con Parkinson. Para la detección de FOG, Tahir et al. [8] reportan 99.7% con CNN sobre señales CSI, Shah et al. [10] alcanzan 98% mediante autoencoders en fusión Wi-Fi + radar y Habib et al [19] obtetienen 98-98.66% con modelos de Deep Learning.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión confirman el posicionamiento del Wi-Fi CSI como una de las tecnologías de sensing de radiofrecuencia de mayor trayectoria y diversidad aplicativa en el estado del arte. Su ventaja frente a otras opciones radica en la capacidad de extraer información multidimensional de la señal OFMD, el CSI proporciona amplitud y fase por subportadora, por antena transmisora y receptora, generando tensores de alta resolución que capturan pertubaciones del canal causadas por el movimiento humano [1]. A diferencia del RSSI, que promedia toda esta información en un único escalar, el CSI permite detectar movimientos finos como temblor en reposo, bradicinesia y alteraciones del patrón de marcha.

En el *survey* de Ma et al. [7] demuestra que la CSI es sensible a desplazamientos del cuerpo de apenas unos centímetros, mientras que trabajos como SHARP de Meneghello et al. [16] y *SenseFi* de Yang et al. [17] han sistematizado metodologías robustas de preprocesamiento y arquitecturas de clasificación que alcanzan desempeños superiores al 95% incluso en condiciones de *cross-domain*. Estos avances indican que la tecnología está suficientemente madura para ser trasladada a entornos clínicos.

En cuanto a los sensores inerciales la revisión muestra que dominan el espacio de detección de FOG en Parkinson, con trabajos consolidados de Pardoel et al. [22], Bikias et al. [13] y Mostafa et al. [30].

En primer lugar, la adherencia al dispositivo es un desafío crítico: los pacientes con Parkinson avanzado presentan rigidez, temblor y disfunción motora que dificultan la colocación y el uso sostenido de sensores sobre el cuerpo. En segundo lugar, los wearables requieren carga periódica de baterías, mantenimiento y eventualmente reemplazo, lo que genera costos recurrentes y dependencia tecnológica. En tercer lugar, su aceptación psicosocial es variable: algunos pacientes reportan incomodidad, estigma o dificultades para operar los dispositivos de forma autónoma [22]. Finalmente, la mayoría de los sistemas *wearable* existentes para FOG son de naturaleza reactiva: detectan el episodio cuando ya ha iniciado, sin capacidad de anticipación ni de integración con análisis ambiental del patrón de deambulación.

El *sensing* pasivo mediante Wi-Fi CSI, en contraste, opera de forma completamente transparente para el paciente: no requiere uso de dispositivos, no impone cargas de adherencia y puede funcionar continuamente en el entorno domiciliario o clínico sin intervención del usuario. Esta característica es especialmente valiosa en pacientes con EP avanzado, quienes pueden experimentar fluctuaciones motoras súbitas (el fenómeno on-off) que dificultarían la activación manual de cualquier dispositivo de alerta.

El hallazgo principal central de esta revisión es la inexistencia de un sistema que combine *sensing* Wi-Fi CSI exclusivo, detección simultanea de FOG y caídas y validación en población real con Parkinson.

Los trabajos que mas se aproximan al vacío identificado son Shah et al. [10] con la mayor muestra clínica (N = 120) y detección combinada FOG-caídas, pero dependencia de radar, Tahir et al. [8] con la mejor precisión en FOG mediante CSI (99.7%) pero sin abordar caídas y Khan et al. [21], el trabajo mas reciente en FOG con SDR en EP, que reporta 99,7% pero con hardware de radio definida por software, no con infraestructura Wi-Fi comercial.

Adiccionalmente la revisión permite evidenciar que practiamente toda la literatura de Wi-Fi CSI sensing que ha siso desarrollada sobre infraestructura 801.11n (Wi-Fi 4) con hardware Intel 5300 NIC, que data de mas de una década y opera principalmente en bandas de 2.4 GHz y 5 GHz. La única excepción identificada es AX-CSI de Gringoli et al. [11], que demuestra la extracción de CSI en chipsets 802.11ax (Wi-Fi 6).

Wi-Fi 6 (802.11ax) y Wi-Fi 7 (802.11be) introducen mejoras sustanciales para el sensing biomédico de alta precisión, mayor número de subportadoras OFDM por canal (hasta 996 en 80 MHz frente a 56 en 20 MHz con Intel 5300), generando matrices CSI de mayor resolución espectral, capacidad OFDMA que permite multiplexar múltiples canales simultáneamente, habilitando el monitoreo de varias áreas del hogar desde un único punto de acceso, latencia reducida a menos de 1 ms mediante acceso al canal, relevante para la detección en tiempo real de eventos FOG de corta duración.

V. CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática PRISMA, que analizó 79 estudios publicados entre 2013 y 2025 sobre sensing inalámbrico y vestible para el monitoreo de actividades motoras y síntomas de la Enfermedad de Parkinson, permite concluir que el Wi-Fi CSI constituye la tecnología de sensing domiciliario pasivo con mayor trayectoria y diversidad aplicativa presente en el 53.2% de los estudios,

posicionándose como la plataforma idónea para el monitoreo continuo no invasivo al inferir movimiento sin requerir dispositivo alguno sobre el paciente. Este campo muestra además un crecimiento acelerado, pasando de 10 estudios en el período 2013–2018 a 16 solo en 2024 y 6 adicionales en los primeros cinco meses de 2025, lo que lo sitúa como una tecnología que tiene una tendencia a crecer con el paso del tiempo. Aunque las arquitecturas CNN, LSTM y sus combinaciones híbridas dominan el estado del arte con exactitudes del 93–99.7%, los de modelos Transformer para señales CSI y técnicas *few-shot* y *meta-learning* amplía las posibilidades para escenarios con datos clínicos limitados. Sin embargo, el análisis revela vacíos críticos que definen el espacio de contribución original de esta propuesta: ninguno de los 79 estudios combina sensing Wi-Fi CSI exclusivo con detección simultánea de FOG y caídas en pacientes con Parkinson. A esto se suma que la infraestructura Wi-Fi 6/7 permanece inexplorada como plataforma de *sensing* biomédico, y que la totalidad de los estudios revisados proviene de entornos de laboratorio urbano sin presencia latinoamericana, lo que evidencia que los modelos existentes no han enfrentado las condiciones de interferencia, variabilidad estructural y baja infraestructura que se puede llegar a presentar en Latinoamerica.

VI. REFERENCIAS

[1] Z. Yang, Z. Zhou, and Y. Liu, “From RSSI to CSI: Indoor localization via channel response,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 46, no. 2, pp. 1–32, 2013, doi: 10.1145/2543581.2543592.

[2] W. Wang, A. X. Liu, M. Shahzad, K. Ling, and S. Lu, “Understanding and modeling of WiFi signal based human activity recognition,” in *Proc. ACM MobiCom*, New York, NY, USA, 2015, doi: 10.1145/2789168.2790093.

[3] S. Yousefi, H. Narui, S. Dayal, S. Ermon, and S. Valaee, “A survey on behavior recognition using WiFi channel state information,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 10, pp. 98–104, Oct. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1700082.

[4] S. Palipana, D. Rojas, P. Agrawal, and D. Pesch, “FallDeFi: Ubiquitous fall detection using commodity Wi-Fi devices,” *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 1–25, Jan. 2018, doi: 10.1145/3161183.

[5] Z. Wang, B. Guo, Z. Yu, and X. Zhou, “Wi-Fi CSI-based behavior recognition: From signals and actions to activities,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 5, pp. 109–115, May 2018, doi: 10.1109/MCOM.2018.1700144.

[6] Gringoli, F., Schulz, M., Link, J., & Hollick, M. (2019). *Free your CSI: A channel state information extraction platform for modern Wi-Fi chipsets*. En *Proceedings of the 13th International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization* (pp. 21–28). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3349623.3355477

[7] Y. Ma, G. Zhou, and S. Wang, “WiFi sensing with channel state information: A survey,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 52, no. 3, pp. 1–36, 2019, doi: 10.1145/3310194.

[8] A. Tahir et al., “WiFreeze: Multiresolution scalograms for freezing of gait detection in Parkinson’s leveraging 5G spectrum with deep learning,” *Electronics*, vol. 8, no. 12, p. 1433, Dec. 2019, doi: 10.3390/ELECTRONICS8121433.

[9] Z. Wang et al., “A survey on human behavior recognition using channel state information,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 144502–144524, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2949123.

[10] S. A. Shah et al., “Sensor fusion for identification of freezing of gait episodes using Wi-Fi and radar imaging,” *IEEE Sensors J.*, vol. 20, no. 24, pp. 14912–14919, Dec. 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.3004767.

[11] F. Gringoli, M. Cominelli, A. Blanco, and J. Widmer, “AX-CSI: Enabling CSI extraction on commercial 802.11ax Wi-Fi platforms,” in *Proc. WiNTECH*, 2020, doi: 10.1145/3477086.3480833.

[12] B. Li et al., “Improved deep learning technique to detect freezing of gait in Parkinson’s disease based on wearable sensors,” *Electronics*, vol. 9, no. 11, p. 1919, Nov. 2020, doi: 10.3390/electronics9111919.

[13] T. Bikias, D. Iakovakis, S. Hadjidimitriou, V. Charisis, and L. Hadjileontiadis, “DeepFoG: An IMU-based detection of freezing of gait episodes in Parkinson’s disease patients via deep learning,” *Front. Robot. AI*, vol. 8, p. 537384, 2021, doi: 10.3389/frobt.2021.537384.

[14] I. Nirmal, A. Khamis, M. Hassan, W. Hu, and X. Zhu, “Deep learning for radio-based human sensing: Recent advances and future directions,” *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 23, no. 2, pp. 995–1019, 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3058333.

[15] C. Chen, G. Zhou, and Y. Lin, “Cross-domain WiFi sensing with channel state information: A survey,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 56, no. 1, pp. 1–36, 2022, doi: 10.1145/3570325.

[16] F. Meneghello et al., “SHARP: Environment and person independent activity recognition with commodity IEEE 802.11 access points,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 22, no. 10, pp. 6160–6175, 2022, doi: 10.1109/TMC.2022.3185681.

[17] J. Yang et al., “SenseFi: A library and benchmark on deep-learning-empowered WiFi human sensing,” *Patterns*, vol. 4, no. 3, p. 100703, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.PATTER.2023.100703.

[18] S.-Y. Chen and C.-L. Lin, “Wi-Fi-based human activity recognition for continuous, whole-room monitoring of motor functions in Parkinson’s disease,” *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 5, pp. 778–790, 2024, doi: 10.1109/OJAP.2024.3393117.

[19] Z. Habib, M. A. Mughal, M. A. Khan, and M. Shabaz, “WiFOG: Integrating deep learning and hybrid feature selection for accurate freezing of gait detection,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 86, pp. 119–131, 2024, doi: 10.1016/j.aej.2023.11.075.

[20] Z. Habib et al., “A novel deep dual self-attention and Bi-LSTM fusion framework for Parkinson’s disease prediction using freezing of gait: A biometric application,” *Multimed. Tools Appl.*, 2024, doi: 10.1007/S11042-024-18906-5.

[21] M. B. Khan et al., “Intelligent frozen gait monitoring using software-defined radio frequency sensing,” *Electronics*, vol. 14, no. 8, p. 1603, 2025, doi: 10.3390/ELECTRONICS14081603.

[22] S. Pardoel, J. Kofman, J. Nantel, and E. Lemaire, “Wearable-sensor-based detection and prediction of freezing of gait in Parkinson’s disease: A review,” *Sensors*, vol. 19, no. 23, p. 5141, Nov. 2019, doi: 10.3390/s19235141.

[23] L. Guo et al., “WiAR: A public dataset for WiFi-based activity recognition,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 154127–154144, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2947024.

[24] M. Ali et al., “A comparison of machine learning algorithms for Wi-Fi sensing using CSI data,” *Electronics*, vol. 12, no. 18, p. 3935, Sep. 2023, doi: 10.3390/electronics12183935.

[25] N. Bahadori, J. Ashdown, and F. Restuccia, “ReWiS: Reliable Wi-Fi sensing through few-shot multi-antenna multi-receiver CSI learning,” in *Proc. IEEE WoWMoM*, Belfast, UK, 2022, doi: 10.1109/WOWMOM54355.2022.00027.

[26] G. Zhu et al., “CSI-Bench: A large-scale in-the-wild dataset for multi-task WiFi sensing,” arXiv:2505.21866, 2025, doi: 10.48550/arxiv.2505.21866.

[27] D. Preechakarnjanadit and A. Taparugssanagorn, “Real-time, non-intrusive fall detection via Wi-Fi CSI: A comparative study of CNN-LSTM, GNN, and transformer models,” *AI Comput. Sci. Robot. Technol.*, 2025.

[28] L. Sigcha et al., “Deep learning algorithms for detecting freezing of gait in Parkinson’s disease: A cross-dataset study,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 249, p. 124522, 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2024.124522.

[29] Q. Bu et al., “TransferSense: Towards environment independent and one-shot WiFi sensing,” *Pers. Ubiquitous Comput.*, vol. 25, pp. 493–506, 2021, doi: 10.1007/s00779-020-01480-6.

[30] T. A. Mostafa et al., “A comparative study of time frequency representation techniques for freeze of gait detection and prediction,” *Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6446, 2021, doi: 10.3390/s21196446.

[31] M. J. Page et al., “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews,” *BMJ*, vol. 372, p. n71, Mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.

[32] T. Ashfaque Mostafa, S. Soltaninejad, T. L. McIsaac, and I. Cheng, «A Comparative Study of Time Frequency Representation Techniques for Freeze of Gait Detection and Prediction», *Sensors*, vol. 21, n.º 19, p. 6446, sep. 2021, doi: 10.3390/s21196446.

[33] Ministerio de Salud y Protección Social. (2021). *Día Mundial del Parkinson: Colombia se destaca en atención*. https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Dia-Mundial-del-Parkinson-Colombia-se-destaca-en-atencion.aspx

[34] A. Salomon *et al.*, «A machine learning contest enhances automated freezing of gait detection and reveals time-of-day effects», *Nat Commun*, vol. 15, n.º 1, p. 4853, jun. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-49027-0

Modelo para la Identificación de Autenticidad en colecciones Arqueológicas en la Cultura del Alto Magdalena apoyado con herramientas de Inteligencia Artificial.

Sandra Milena García Córdoba,
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)
Colombia
https://orcid.org/0000-0002-3077-0140

Sixto Enrique Campaña Bastidas
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)
Colombia
https://orcid.org/0000-0001-9937-2784

John Evert Barco Jiménez
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)
Colombia
https://orcid.org/0000-0002-9152-2132

Edna Rocio Bernal Monroy
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)
Colombia
https://orcid.org/0000-0002-6038-4478

Paola Galíndez Muñoz
Museo Arqueológico Medardo García
Alcaldía Municipal Isnos Huila
Colombia
Isnos.museo@gmail.com

***Resumen*— La inteligencia artificial se ha consolidado como una herramienta fundamental para el análisis e interpretación de datos visuales en arqueología. Este avance ha impulsado el uso de técnicas como la visión por computador, la fotogrametría digital y modelos de aprendizaje automático y profundo, incluyendo redes neuronales convolucionales y mecanismos de atención.**

En el contexto colombiano, la validación de la autenticidad en colecciones arqueológicas, entendida como la correspondencia verificable entre la identidad de las piezas y su origen histórico a partir de atributos materiales, técnicos y contextuales, continúa siendo un proceso altamente dependiente del juicio experto, sin modelos computacionales que integren de manera efectiva el conocimiento arqueológico con técnicas avanzadas de inteligencia artificial. Esta brecha limita la trazabilidad, dificulta la detección de falsificaciones y restringe el aprovechamiento analítico de los datos patrimoniales.

El presente estudio tiene como objetivo analizar el uso de técnicas de inteligencia artificial en la validación de autenticidad en contextos arqueológicos mediante una revisión sistemática de literatura, con el fin de identificar tendencias, limitaciones y oportunidades de aplicación. La contextualización de la investigación se orienta a colecciones cerámicas de la cultura del Alto Magdalena pertenecientes al Museo Arqueológico Medardo García, ubicado en Isnos, Huila.

La metodología adopta un enfoque mixto con diseño explicativo secuencial (DEXPLIS). En la fase cuantitativa se emplean imágenes digitales organizadas en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba, evaluando el desempeño mediante métricas como exactitud y precisión. En la fase cualitativa se aplican entrevistas a expertos para interpretar los resultados del modelo con criterios de autenticidad arqueológica y su contexto histórico.

La revisión realizada permitió identificar un alto grado de convergencia entre las predicciones del modelo y el juicio experto, fortaleciendo la interpretabilidad, confiabilidad y contextualización de los resultados obtenidos.

En conclusión, la revisión realizada permitió identificar una tendencia creciente en el uso de técnicas de aprendizaje profundo para el análisis de objetos arqueológicos; no obstante, persisten limitaciones asociadas con la interpretabilidad de los modelos, la incorporación del juicio experto y la contextualización cultural de los datos. Como aporte, el estudio establece una base conceptual y metodológica para el desarrollo de enfoques de inteligencia artificial aplicados a la validación de autenticidad en colecciones cerámicas arqueológicas en Colombia.

Palabras Clave — Autenticidad arqueológica, cerámica arqueológica, inteligencia artificial, visión por computador, patrimonio cultural.

I INTRODUCCIÓN

El patrimonio arqueológico que caracteriza el contexto de la cultura del Alto Magdalena en Isnos, ubicado al sur del departamento del Huila, se reconoce por los vestigios que se conservan en los parques arqueológicos, configurando un sistema religioso y social declarado por la UNESCO como Patrimonio de la Humanidad en 1995, lo que constituye un activo estratégico para el desarrollo científico, cultural y territorial del país [6].

No obstante, la validación de autenticidad en colecciones arqueológicas continúa siendo altamente dependiente del juicio experto, lo que limita la trazabilidad, dificulta la detección de falsificaciones y restringe el aprovechamiento analítico de datos patrimoniales, especialmente en instituciones con recursos tecnológicos limitados [5]. Esta problemática resulta particularmente relevante en el contexto colombiano, donde existen restricciones metodológicas y tecnológicas en la gestión del patrimonio arqueológico.

En este sentido, surge la necesidad de integrar enfoques computacionales que fortalezcan los procesos de análisis y la toma de decisiones en la evaluación de autenticidad arqueológica. La inteligencia artificial (IA) se presenta como una alternativa prometedora, al permitir el análisis automatizado de datos y el reconocimiento de patrones en imágenes complejas.

De acuerdo con lo anterior, el presente estudio analiza la viabilidad de uso de técnicas de inteligencia artificial (IA) en la identificación de autenticidad en piezas cerámicas arqueológicas. Metodológicamente, se desarrolló una revisión sistemática de la literatura siguiendo el enfoque PRISMA, con el fin de identificar avances, tendencias y limitaciones, garantizando transparencia y reproducibilidad en el proceso

La búsqueda se realizó en bases de datos como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect y Google Scholar. Se identificaron 628 registros iniciales y, tras la aplicación de criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 30 estudios para el análisis.

Los resultados evidencian el uso predominante de técnicas como el aprendizaje automático y las redes neuronales convolucionales para la clasificación, el reconocimiento de patrones y el análisis de imágenes arqueológicas [1]. Asimismo, la integración de la IA con el conocimiento arqueológico fortalece la gestión del patrimonio y mejora la identificación de autenticidad [4], [7], [15].

Sin embargo, no se identifican estudios que aborden la aplicación de técnicas de inteligencia artificial en Colombia, particularmente en el contexto del Alto Magdalena lo que evidencia una importante brecha de investigación.

II METODOLOGÍA

La presente investigación se fundamenta en una revisión sistemática de la literatura (RSL) orientada a analizar el uso de técnicas de inteligencia artificial en la identificación de autenticidad de artefactos arqueológicos. Para su desarrollo, se adoptó el enfoque metodológico basado en el esquema PICO, el cual permitió estructurar el proceso de búsqueda y análisis de la información [2].

En este marco, la población (P) estuvo constituida por colecciones arqueológicas, limitándose el análisis a información correspondiente exclusivamente a piezas cerámicas. La intervención (I) comprendió el uso de técnicas de inteligencia artificial, incluyendo machine learning, deep learning, redes neuronales y visión por computador, mientras que la comparación (C) se basó en métodos tradicionales sustentados en el juicio experto. Finalmente, los resultados (O) se enfocaron en la precisión en la autenticidad, caracterización y análisis de las piezas.

A partir de lo anterior, se definieron tres preguntas de investigación orientadas a evaluar: (i) desempeño de los modelos de IA en términos de precisión, (ii) integración del contexto arqueológico en estos modelos, y (iii) limitaciones y desafíos para su implementación.

Se construyó la siguiente ecuación de búsqueda estructurada mediante operadores booleanos, integrando términos relacionados con inteligencia artificial, ciencia de datos, arqueología y colecciones museológicas [2]. (“Artificial Intelligence” OR “Machine Learning” OR “Deep Learning”) AND (“Archaeology” OR “Archaeological Collections” OR “Cultural Heritage”) AND (“Data Science” OR “Big Data” OR “Computational Modeling”).

La inclusión de términos relacionados con colecciones museológicas y patrimonio cultural responde a la necesidad de contextualizar la revisión en escenarios reales como el Museo Arqueológico Medardo García, permitiendo identificar soluciones tecnológicas aplicables a la gestión y análisis de este tipo de colecciones.

El proceso de selección de estudios se estructuró conforme a la metodología PRISMA, como se ilustra en la Figura 1.

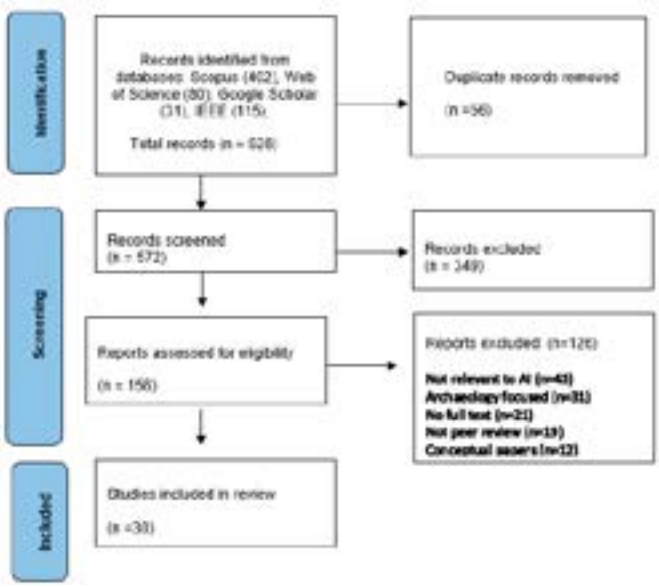


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de estudios

Finalmente, se seleccionaron 30 estudios para el análisis cualitativo, los cuales cumplieron con los criterios de inclusión definidos, incluyendo publicaciones entre 2019 y 2026, en idiomas inglés y español, artículos revisados por pares y con disponibilidad de texto completo.

Asimismo, estos estudios fueron evaluados considerando aspectos como la claridad del problema, el objetivo de investigación, la metodología empleada, la calidad de los datos,

la validación del modelo y su aplicabilidad en contextos reales, en línea con criterios utilizados en estudios de ciencia de datos [2].

Por otra parte, se excluyeron aquellos estudios que no se enmarcaban en el contexto arqueológico, que no estaban relacionados con piezas cerámicas o que no incorporaban técnicas de inteligencia artificial.

En consecuencia, el proceso de selección y análisis se orientó a identificar investigaciones relevantes que aportaran evidencia significativa sobre el uso de inteligencia artificial en la validación de autenticidad y la gestión de colecciones arqueológicas, garantizando la rigurosidad y validez de la revisión sistemática, en concordancia con enfoques metodológicos estructurados ampliamente utilizados en la literatura científica [2].

III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados evidencian un crecimiento significativo en la aplicación de técnicas de inteligencia artificial en el análisis de artefactos arqueológicos, especialmente en tareas de clasificación, reconocimiento de patrones y validación de autenticidad [4], [7], [15].

Las redes neuronales convolucionales (CNN) han demostrado alta precisión en la clasificación de imágenes complejas, consolidándose como una de las técnicas más utilizadas en visión por computador [7], [15]. Asimismo, modelos más avanzados como redes generativas adversarias (GAN) y arquitecturas de atención han ampliado las capacidades de análisis en contextos arqueológicos [13], [14].

El uso de herramientas de visión por computador permite mejorar procesos como la segmentación, extracción de características y análisis automatizado de imágenes [5]. De igual forma, los enfoques multimodales, que integran datos visuales, tridimensionales y contextuales, han mostrado mejoras en la precisión de los modelos [11], [17].

A pesar de estos avances, persisten limitaciones importantes, especialmente en la disponibilidad de conjuntos de datos etiquetados y en la interpretabilidad de los modelos, lo cual representa un desafío relevante en el campo de la inteligencia artificial [5].

En el contexto colombiano, se evidencia una brecha entre los avances tecnológicos y su aplicación en instituciones museológicas, lo que resalta la necesidad de desarrollar soluciones adaptadas a contextos específicos. En este sentido, se destaca la importancia de diseñar modelos que integren análisis automatizado y validación experta, garantizando su aplicabilidad y pertinencia cultural.

Estos hallazgos son consistentes con tendencias recientes en la aplicación de inteligencia artificial en patrimonio cultural, donde se destaca el crecimiento de enfoques computacionales en tareas de clasificación y análisis de objetos arqueológicos [6], [10].

La Tabla 1 presenta la clasificación de las técnicas de inteligencia artificial identificadas en los estudios analizados. Se evidencia una predominancia de enfoques de aprendizaje automático (66,7 %), lo que sugiere su amplia aplicabilidad en problemas con datos estructurados dentro del contexto arqueológico. Asimismo, las técnicas de aprendizaje profundo se orientan principalmente al procesamiento de imágenes, mientras que la inteligencia artificial explicable adquiere relevancia en la interpretación de resultados y el apoyo a la toma de decisiones por parte de expertos.

TABLA I. TÉCNICAS DE IA EN ARQUEOLOGÍA

Técnicas de IA en Arqueología			
Técnica	***Cantidad***	***Utilidad***	***Limitaciones***
Aprendizaje automático (ML)	20	Clasificación de cerámica, análisis de patrones	Requiere grandes volúmenes de datos etiquetados; sensibilidad a la calidad de los datos; menor desempeño en escenarios complejos y heterogéneos
Aprendizaje profundo	5	Reconocimiento de imágenes (fragmentos, cerámica)	Generación de patrones artificiales no válidos arqueológicamente, riesgo de sesgos o falsos positivos en procesos de autenticidad, así como requiere grandes datasets, alta demanda computacional, riesgo de sobreajuste, baja interpretabilidad y dependencia de calidad visual.
IA Explicable (XAI)	3	Interpretación de decisiones en clasificación	Riesgo de simplificar excesivamente decisiones complejas. Adopción limitada, incremento de complejidad metodológica y mejora de transparencia más que de precisión.
Heurísticas y métodos mixtos	2	Integración de conocimiento experto arqueológico	Formalizar explícitamente el conocimiento arqueológico, su aún escasa implementación práctica en este campo y las dificultades para lograr una interoperabilidad efectiva entre reglas simbólicas y datos visuales.

La literatura revisada evidencia un predominio de enfoques centrados en la clasificación visual de artefactos arqueológicos, mientras que los modelos orientados a la autenticidad arqueológica integral, multimodal y contextualizada aún presentan un desarrollo limitado, particularmente en contextos latinoamericanos.

El estudio del patrimonio arqueológico en Colombia se ha fundamentado en enfoques cronológicos relativos y absolutos, apoyados en análisis tipológicos, estilísticos y tecnológicos de los materiales, así como en métodos de datación como el radiocarbono (C-14). Esto evidencia una oportunidad de

transferencia metodológica hacia enfoques computacionales, más que una ausencia total de conocimiento disciplinar.

Si bien estos métodos han sido fundamentales para la construcción del conocimiento arqueológico, presentan limitaciones asociadas a la dependencia del juicio experto, la variabilidad interpretativa y la limitada escalabilidad frente al manejo de grandes volúmenes de datos [5], [18].

En el ámbito institucional, aunque el Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH) ha desarrollado modelos de datos para el registro y documentación del patrimonio arqueológico en el marco de la Ley 397 de 1997, estos se orientan principalmente a la estructuración de la información. En consecuencia, presentan limitaciones en interoperabilidad, integración de datos y uso de herramientas analíticas avanzadas [5].

Los resultados de la revisión sistemática evidencian una concentración de estudios en Europa, Asia y Estados Unidos, sin identificar investigaciones aplicadas al contexto colombiano ni específicamente a la cultura del Alto Magdalena.

En colecciones como las del Museo Arqueológico Medardo García en Isnos (Huila), estas metodologías no han sido implementadas de manera sistemática, lo que limita el desarrollo de modelos integrales capaces de articular autenticación, clasificación, análisis de conservación y evaluación contextual del patrimonio arqueológico.

En este sentido, se identifica una brecha significativa entre el potencial de la inteligencia artificial y su aplicación efectiva en la gestión del patrimonio arqueológico.

Esta situación limita el fortalecimiento de capacidades institucionales y la incorporación de prácticas de analítica digital en el sector arqueológico, afectando procesos clave como la trazabilidad de bienes culturales, la detección de falsificaciones y el control del tráfico ilícito de patrimonio.

Aunque diversos estudios reportan resultados favorables en la clasificación automatizada de objetos arqueológicos mediante redes neuronales convolucionales y modelos de aprendizaje profundo, la mayoría se concentra en tareas de reconocimiento visual y clasificación tipológica, dejando en segundo plano la validación contextual de autenticidad.

Asimismo, se identifican limitaciones metodológicas relacionadas con el uso de conjuntos de datos reducidos, poca diversidad cultural en las muestras analizadas y escasa incorporación del conocimiento experto arqueológico dentro de los modelos computacionales.

De igual manera, los resultados reportados suelen centrarse en métricas de desempeño técnico, sin profundizar en la interpretabilidad de los modelos ni en su aplicabilidad en contextos museológicos reales. Estas limitaciones evidencian la necesidad de enfoques integradores que articulen técnicas avanzadas de inteligencia artificial con criterios de autenticidad arqueológica contextualizados para el patrimonio colombiano.

IV CONCLUSIONES

Se identifican aportes relevantes en la sistematización de enfoques, herramientas y modelos aplicados en estudios previos, lo que permite identificar tendencias, vacíos de investigación y oportunidades de desarrollo en el ámbito del patrimonio arqueológico.

Se evidencia la necesidad de avanzar hacia modelos que integren no solo datos visuales, sino también información contextual y conocimiento experto, lo cual es fundamental para una adecuada interpretación arqueológica.

Los modelos híbridos que combinan inteligencia artificial con validación experta representan una solución prometedora para mejorar la trazabilidad, la toma de decisiones y la gestión de colecciones en museos arqueológicos.

En particular, la contextualización de esta revisión en el Museo Arqueológico Medardo García evidencia la viabilidad de implementar soluciones basadas en inteligencia artificial en entornos museológicos reales.

Esto representa una oportunidad para fortalecer la gestión del patrimonio arqueológico, mejorar los procesos de autenticidad y promover la incorporación de tecnologías emergentes en instituciones culturales.

La revisión permitió evidenciar una brecha significativa entre los avances en clasificación automatizada y la necesidad de modelos de autenticidad arqueológica contextualizados para el patrimonio colombiano

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce el acompañamiento de mi director y el aporte de los docentes investigadores, quienes contribuyeron con sus conocimientos y orientaciones durante el desarrollo de este proceso investigativo.

Asimismo, expreso el agradecimiento a la coordinadora del Museo Arqueológico Medardo García por facilitar el acceso a la información y al contexto de estudio, elementos fundamentales para la realización del presente trabajo.

Finalmente, mi especial reconocimiento a la memoria de mi padre Medardo García, quien se desempeñó como gestor de patrimonio cultural y contribuyó significativamente a la preservación y conservación de la cultura del Alto Magdalena a nivel nacional e internacional. Su legado constituye una fuente de inspiración para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

[1] G. Barone, P. Mazzoleni, G. V. Spagnolo, and S. Raneri, “Artificial neural network for the provenance study of archaeological ceramics using clay sediment database,” *Journal of Cultural Heritage*, vol. 38, pp. 147–157, 2019.

[2] V. Croce, G. Caroti, A. Piemonte, L. De Luca, and P. Véron, “H-BIM and artificial intelligence: Classification of architectural heritage for semi-automatic Scan-to-BIM reconstruction,” 2023.

[3] G. Caspari and P. Crespo, “Convolutional neural networks for archaeological site detection,” Journal of Archaeological Science, 2019.

[4] A. Chetouani, S. Treuillet, M. Exbrayat, and S. Jesset, “Classification of engraved pottery sherds mixing deep-learning features by compact bilinear pooling,” *Pattern Recognition Letters*, vol. 131, pp. 1–7, 2020.

[5] P. M. A. García, A. Sarcina, I. Y. B. Pedreros, Á. M. Bacca, J. A. G. Torres, and J. C. Botero, *Métodos para la caracterización de la cerámica arqueológica*, vol. 47. Tunja, Colombia: Editorial de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), 2021.

[6] M. García, "Así es Isnos," entrevista, 6 de diciembre de 2018.

[7] M. L. Gualandi, G. Gattiglia, and F. Anichini, "An open system for collection and automatic recognition of pottery through neural network algorithms," *Heritage*, vol. 4, no. 1, pp. 140–159, 2021.

[8] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 5th ed. McGraw-Hill Educación, 2010.

[9] N. López and I. Sandoval, *Métodos y técnicas de investigación cuantitativa y cualitativa*, 2016.

[10] M. E. Hatir, M. Barstuğan, and İ. İnce, "Deep learning-based weathering type recognition in historical stone monuments," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 45, pp. 193–203, 2020.

[11] K. Lambers, W. B. Verschoof-van der Vaart, and Q. P. Bourgeois, "Integrating remote sensing, machine learning, and citizen science in Dutch archaeological prospection," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 7, p. 794, 2019.

[12] N. MacLeod, "The quantitative assessment of archaeological artifact groups: Beyond geometric morphometrics," *Quaternary Science Reviews*, vol. 201, pp. 319–348, 2018.

[13] P. R. Márquez-Gutiérrez, C. L. García-Mata, and I. Robledo-Vega, "Sistemas neuro-simbólicos: cerrando la brecha entre el aprendizaje basado en datos y el razonamiento lógico," *Revista ELECTRO*, vol. 46, no. 1, pp. 266–271, 2024.

[14] M. Á. Montero González, "Validación y detección de imágenes generadas por inteligencia artificial," 2025.

[15] L. M. Pawlowicz and C. E. Downum, "Applications of deep learning to decorated ceramic typology and classification: A case study using Tusayan White Ware from Northeast Arizona," *Journal of Archaeological Science*, vol. 130, p. 105375, 2021.

[16] N. A. Rasheed and M. J. Nordin, "Archaeological fragments classification based on RGB color and texture features," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 76, no. 3, 2015.

[17] A. Resler, R. Yeshurun, F. Natalio, and R. Giryes, "A deep-learning model for predictive archaeology and archaeological community detection," *Humanities and Social Sciences Communications*, vol. 8, no. 1, 2021.

[18] D. E. C. Ruíz, "Análisis de imágenes de sitios y piezas arqueológicas con OpenCV en lugares remotos," 2024.

Sobre los autores

Sandra Milena García Córdoba: Ingeniero de Sistemas, Especialista en Auditoría de Sistemas de Información. Magíster en Evaluación y Aseguramiento de la Calidad de la Educación, Estudiante Doctorado en Tecnologías de Información, Docente Ocasional UNAD,Investigador grupo DAVINCI UNAD. sandram.garcia@unad.edu.co

Sixto Enrique Campaña Bastidas: Ingeniero de Sistemas, Especialista en redes y servicios. telemáticos, Magíster en Software Libre, Doctor en Ingeniería, Docente Asociado UNAD, Investigador grupo DAVINCI UNAD. sixto.campana@unad.edu.co

John Evert Barco Jimenez: Ingeniero Electrónico, Magíster En Ingeniería Áreas: Mecánica, Civil, Sistemas Y Computación, Eléctrica, Electrónica Y De Computadores, E Industrial, Doctor En Ingeniería Eléctrica Y Electrónica. Docente Ocasional UNAD,Investigador grupo DAVINCI UNAD. john.barco@unad.edu.co

Edna Rocío Bernal Monroy: Ingeniero de Sistemas y Computación, Magíster en Sistemas de Información, Doctora en Tecnologías de la Información y de la Comunicación, Docente Ocasional UNAD,Investigador grupo DAVINCI UNAD. edna.bernal@unad.edu.co

Paola Galíndez Muñoz: Antropóloga. Coordinadora Museo Arqueológico Medardo García. Alcaldía Municipal Isnos, Huila. isnos.museo@gmail.com

Inteligencia Artificial para la Autogestión Energética en Zonas Aisladas: Una Revisión Sistemática de Marcos Metodológicos, Enfoques de Modelado y Aplicaciones de IA

Alejandro Márquez-Bedoya
Departamento Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Universidad Nacional de Colombia
Manizales, Colombia
almarquezb@unal.edu.co

Sandra X. Carvajal-Quintero
Departamento Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Universidad Nacional de Colombia
Manizales, Colombia
sxcarvajalq@unal.edu.co

Dahiana López-García
Departamento Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Universidad Nacional de Colombia
Manizales, Colombia
dahlopezgar@unal.edu.co

Resumen*—Los sistemas de energía eléctrica en las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia y de diversas regiones en vías de desarrollo enfrentan desafíos de sostenibilidad asociados a su dependencia de combustibles fósiles, caracterizados por altos costos logísticos y limitaciones operativas. En este contexto, la integración de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) se ha consolidado como una alternativa para mejorar la cobertura y sostenibilidad del servicio eléctrico; sin embargo, su incorporación en redes aisladas de baja inercia introduce desafíos asociados a la estabilidad y gestión del sistema. Por tanto, ante la variabilidad de las FNCER, es necesario evolucionar hacia sistemas energéticos autogestionados con toma de decisiones autónoma. La metodología adoptada consiste en una revisión sistemática de literatura que evalúa marcos metodológicos, enfoques de modelado y aplicaciones de inteligencia artificial (IA) utilizadas en la operación y gestión de sistemas energéticos en zonas aisladas. La revisión evidencia que la escasez de datos históricos constituye una limitación para la implementación de los modelos de IA actuales, dado que estos requieren grandes volúmenes de información para su entrenamiento. Esta limitación se intensifica en las ZNI colombianas, donde la disponibilidad de datos históricos es estructuralmente limitada. En este sentido, se propone el desarrollo de marcos metodológicos híbridos que utilicen modelos de simulación genéricos para entrenar agentes inteligentes antes de su despliegue, con el fin de reducir el riesgo operativo y los costos de implementación. Finalmente, se enfatiza la relevancia de marcos regulatorios que reconozcan los servicios complementarios proporcionados por sistemas inteligentes de gestión; asimismo, se recomienda que el desarrollo de futuros modelos de IA para zonas rurales incorpore interfaces de usuario simplificadas que faciliten la supervisión y apropiación tecnológica en entornos rurales, en concordancia con la realidad sociotécnica del territorio.

Palabras clave—Autogestión Energética, Inteligencia Artificial, Zonas Aisladas.

I. Introducción

La transición energética global, impulsada por la necesidad de mitigar el cambio climático y cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible ha promovido la descarbonización de los sistemas eléctricos. De acuerdo con proyecciones, las metas a largo plazo exigen una reestructuración de las matrices energéticas, transitando de una dependencia de los combustibles fósiles hacia una penetración masiva de fuentes renovables [1]. En este escenario, las infraestructuras eléctricas están experimentando cambios desde arquitecturas de generación centralizadas, unidireccionales y jerarquizadas, hacia topologías distribuidas. La adopción de recursos energéticos distribuidos (DER) no solo reduce la huella de carbono, sino que redefine los paradigmas de flujo de potencia, exigiendo nuevas estrategias de gestión para garantizar la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico en diferentes escalas operativas [2].

La digitalización ha impulsado la evolución de las redes convencionales hacia el concepto de redes inteligentes. Estas se caracterizan por la integración de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) con la infraestructura eléctrica de potencia [3]. La incorporación de sensores e infraestructura de medición avanzada (AMI) permite un flujo bidireccional no solo de energía, sino de datos en tiempo real [4]. Esta transformación digital otorga a las redes la capacidad de observabilidad continua y de respuesta dinámica ante perturbaciones. Sin embargo, la conexión masiva de dispositivos y la gran volumetría de los datos generados introducen desafíos computacionales, requieren la evolución de las arquitecturas de procesamiento centralizado hacia la computación que posibilite una toma de decisiones descentralizada, resiliente y de baja latencia en nodos locales de la red [5].

En contraste con las tendencias globales de digitalización y descarbonización, el contexto nacional de Colombia presenta desafíos estructurales, evidenciados en la crisis de sostenibilidad de sus Zonas No Interconectadas (ZNI). Mientras el Sistema Interconectado Nacional (SIN) posee una matriz de generación mayoritariamente fundamentada en recursos hídricos, las ZNI, que abarcan más del 50% del territorio nacional, operan bajo condiciones de extrema vulnerabilidad y aislamiento [6]. Según informes del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas [7], estas regiones atienden a poblaciones geográficamente dispersas con una capacidad instalada altamente dependiente de la generación térmica a base de diésel [8].

Esta dependencia fósil genera desafíos en sostenibilidad ambiental, económica y técnica. Las emisiones específicas en

las ZNI ascienden a 855 gCO2eq/kWh, una cifra que supera en más de cuatro veces el factor de emisión del SIN, estimado en 203 gCO2eq/kWh [9]. Económicamente, los diagnósticos exponen que el costo de prestación del servicio en estas zonas es superior al del sistema central por la compleja logística de transporte de combustibles, lo que condena los esquemas tarifarios a una dependencia de los subsidios estatales [6], [10].

Para mitigar esta crisis de insostenibilidad, la política energética colombiana ha priorizado la transición hacia la integración de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), particularmente mediante la conformación de microrredes aisladas [8]. No obstante, la inserción de FNCER en redes aisladas desencadena vulnerabilidades operativas críticas asociadas a la pérdida de inercia del sistema [11]. Los generadores síncronos convencionales proporcionan inercia rotacional física y amortiguamiento electromecánico, variables fundamentales para absorber los desbalances transitorios entre la generación y la demanda [11], [12], [13].

Al reemplazar estas máquinas por FNCER, las cuales se acoplan a la red a través de interfaces de electrónica de potencia, la inercia del sistema se reduce drásticamente. Estas redes exhiben una respuesta de frecuencia altamente sensible y volátil frente a la naturaleza estocástica e intermitente de la irradiación solar o la velocidad del viento [14]. Esto implica que variaciones abruptas en el recurso primario o en el perfil de carga pueden desencadenar elevadas tasas de cambio de frecuencia, comprometiendo los márgenes de estabilidad de tensión y precipitando escenarios de desconexión de carga o el colapso total del sistema en forma de apagones en cascada [13].

Para abordar la complejidad de estas dinámicas, no son sostenibles los enfoques analíticos reduccionistas, siendo imperativo adoptar una perspectiva de sistemas complejos [15]. Una microrred aislada de alta penetración renovable no constituye una versión a escala reducida de un sistema de potencia mayor, sino un sistema adaptativo complejo caracterizado por interdependencias no lineales donde operan bucles de retroalimentación estocásticos y comportamientos emergentes [16]. En este entorno, los métodos de control clásicos, tales como los controladores proporcional-integral (PI) o el control convencional, poseen limitaciones teóricas y prácticas [17]. Las estrategias de control deterministas dependen de parámetros fijos y modelos matemáticos linealizados que asumen condiciones de operación cuasi-estacionarias. Dada la variación de las variables meteorológicas y la topología de la red, los controladores tradicionales son incapaces de adaptar su parametrización en tiempo real, sometiendo al sistema a oscilaciones sostenidas y desviaciones críticas [18].

Frente a la inoperancia de los enfoques convencionales ante la intermitencia y la incertidumbre, la autogestión fundamentada en técnicas de inteligencia artificial (IA) emerge como la respuesta para desarrollar un agente de control que pueda aprender políticas de despacho óptimas a través de la interacción continua con el entorno estocástico, formulando el problema bajo la estructura de un proceso de decisión [13], [19].

En el contexto de microrredes aisladas de baja inercia, algoritmos avanzados como el Soft Actor-Critic (SAC) o las Redes Convolucionales de Grafos (GCN) otorgan a la IA la capacidad de aproximar funciones de valor en espacios de estado y de considerar la topología espacial de la red [13], [20]. Investigaciones recientes sostienen que el aprendizaje continuo y el meta-aprendizaje permiten a estos agentes inteligentes predecir perfiles de carga, adaptarse con escasez de datos, gestionar activos de almacenamiento y ejecutar respuestas rápidas de frecuencia [21], [22]. La IA actúa así como un inyector de inercia virtual modulando el sistema sin requerir intervención humana ni enlaces de comunicación de alta fiabilidad con servidores en la nube [22].

La transición energética en territorios geográficamente aislados exige una conceptualización tecnológica que fusione la descentralización de los recursos renovables con la inteligencia computacional [23]. Este artículo tiene como objetivo proponer una arquitectura de control y optimización fundamentada en IA adaptativa para la autogestión de microrredes aisladas en las ZNI de Colombia. A través del despliegue de modelos de aprendizaje por refuerzo profundo, se busca mostrar cómo el control estocástico basado en datos logra mitigar la vulnerabilidad estructural, maximizando la capacidad de alojamiento de las FNCER, reduciendo los costos operativos y garantizando la resiliencia sistémica en entornos de incertidumbre.

II. METODOLOGIA

Se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura siguiendo un enfoque estructurado en la Figura 1. El objetivo de este proceso fue identificar metodologías y aplicaciones de IA que superen las limitaciones de la optimización tradicional y que demuestren ser viables bajo las severas restricciones técnicas y socioeconómicas inherentes a los sistemas aislados.

Esta revisión sistemática se fundamentó en una arquitectura de búsqueda estructurada en tres niveles de descriptores booleanos. El primer grupo se centró en métodos de IA, priorizando estudios debido a su capacidad para la toma de decisiones autónoma en entornos dinámicos de baja telemetría. El segundo grupo delimitó el entorno operativo, utilizando términos como redes aisladas y ZNI en lugar de microrredes, con el fin de capturar las restricciones de estabilidad y baja inercia permanentes. Finalmente, el tercer grupo integró el concepto de autogestión y control de frecuencia como puente entre la técnica algorítmica y la gestión de recursos en sitio.

En la etapa de selección de artículos se enfocó específicamente en cómo los marcos metodológicos evaluaban y resolvían las restricciones propias de las comunidades no interconectadas. Desde la perspectiva socioeconómica se seleccionaron aquellos marcos que integraban variables como la falta de habilidades técnicas locales, la baja densidad poblacional, las barreras institucionales y el limitado nivel de ingresos de los usuarios; reconociendo que los fallos en la electrificación rural raramente son intrínsecos a la tecnología, sino a modelos de negocio insostenibles y a una escasa apropiación comunitaria. Por lo tanto, se priorizaron enfoques de análisis multicriterio y dinámicas de sistemas que modelan la sostenibilidad no solo desde el costo nivelado de la energía (LCOE), sino considerando la gobernanza local y el impacto socioambiental.



Fig. 1. Metodología de búsqueda.

La selección de aplicaciones de IA para la gestión de recursos se condicionó a su capacidad para operar bajo restricciones técnicas. En ecosistemas aislados, los recursos renovables integrados mediante electrónica de potencia reducen la inercia rotacional del sistema, volviéndolo propenso a colapsos de frecuencia y tensión ante fluctuaciones menores [11]. Se excluyeron los sistemas de IA que requieren alta capacidad de cómputo en la nube o grandes bases de datos históricos (Big Data), ya que estas zonas carecen de conectividad confiable a internet. En su lugar, se seleccionaron investigaciones fundamentadas en aprendizaje por refuerzo (RL) autónomo y sistemas multiagente descentralizados (Edge Computing), los cuales permiten a los controladores aprender de su entorno dinámico mediante ensayo y error sin depender de modelos matemáticos precisos o parámetros fijos, logrando optimizar el despacho económico y el control de frecuencia en tiempo real [24].

III. Resultados de la Revisión

A continuación, se presentan las tablas de síntesis derivadas de la revisión sistemática de literatura, diseñadas para consolidar la taxonomía de los algoritmos de IA y las dimensiones críticas de modelado requeridas para las Zonas No Interconectadas (ZNI).

TABLE I. Algoritmos de IA para la Gestión

Aplicación en la Microrred	Algoritmos de IA / Optimización	Requerimiento de Datos y Características Operativas	Ref.
Control de Frecuencia y Tensión (LFC)	Aprendizaje por Refuerzo Profundo (DRL), Soft Actor-Critic (SAC), Proximal Policy Optimization (PPO), Graph Convolutional Neural Networks (GCN).	Interacción y Topología: Libre de modelo (model-free). No requiere bases de datos históricas masivas; aprende mediante ensayo y error continuo (Experience Replay) iterando sobre el estado de la red (inercia, topología nodal) en tiempo real.	[14], [19], [25]
Pronóstico (Demanda, Clima y Fallas)	Long Short-Term Memory (LSTM), Autoencoders (AE), Transformers, Support Vector Machines (SVM), Meta-Learning.	Series Temporales y Adaptabilidad: Los modelos clásicos exigen Big Data (meses de registros históricos y meteorológicos). En redes aisladas, el Meta-Learning y los Autoencoders permiten extraer características y adaptarse con pocos datos (Small Data).	[26], [27], [28]
Optimización y Gestión de Energía (EMS)	Algoritmos Bioinspirados/Meta heurísticas (PSO, GWO, ACO), Programación Cuadrática Secuencial (SQP), Sistemas Multiagente (MAS).	Incertidumbre y Restricciones: Requiere datos de entrada estocásticos (probabilidad de irradiación solar, restricciones de operación de baterías) y modelado de costos de penalización. Operan bajo arquitecturas de Edge Computing (procesamiento local).	[18], [29], [30]

La Tabla 1 demuestra que los algoritmos de IA poseen una robustez analítica y predictiva para el control; Se destaca que para el Control de Frecuencia y Tensión, la literatura prioriza enfoques de Aprendizaje por Refuerzo Profundo (DRL) como SAC y PPO, cuya naturaleza libre de modelo permite aprender políticas de control mediante la interacción directa, eliminando la necesidad de modelos matemáticos precisos de la red que suelen ser inexistentes en las ZNI. Asimismo, en el área de pronóstico la transición hacia el Meta-Learning y los Autoencoders, se destacan técnicas que permiten el entrenamiento con pocos datos, resolviendo la barrera estructural de la escasez de registros históricos. Finalmente, la gestión energética mediante sistemas multiagente y Edge Computing garantiza que la optimización ocurra de manera descentralizada y local, asegurando la resiliencia del sistema incluso ante fallos en los enlaces de comunicación externa.

Por otro lado, la Tabla 2 revela las restricciones técnicas, económicas y logísticas inherentes a las ZNI. Al contrastar

ambas dimensiones la mayoría de los modelos de IA y aprendizaje profundo están diseñados bajo el paradigma de gran cantidad de datos y conectividad en la nube (Cloud Computing), asumiendo una disponibilidad ininterrumpida de bases de datos históricas de alta resolución, telemetría y una inercia de red estable [31].

TABLE II. DIMENSIONES DE MODELADO

Dimensión de Modelado	**Variables Críticas**	**Implicaciones en Sistemas Aislados**	**Ref.**
Técnico-Operativa	Continuidad y Confiabilidad: Estabilidad de redes de baja inercia, capacidad de alojamiento (Hosting Capacity), energía no suministrada (EENS), degradación de baterías (SoH/SoC).	La variabilidad estocástica de las fuentes renovables y la incapacidad de depender de una red principal obligan a que el modelo priorice la resiliencia técnica antes que la simple minimización de costos. Se exige control adaptativo frente a la intermitencia.	[8], [32], [33]
	Flexibilidad Operativa: Respuesta a la demanda, desplazamiento de carga inteligente (Load Shifting), reconfiguración topológica rápida.	La incapacidad de expandir generación rápidamente requiere gestionar la carga de los usuarios para emular "almacenamiento virtual", mitigando picos de demanda.	[28], [34]
Económica y Logística	Costos Logísticos y de Combustible (OPEX): Transporte aéreo/fluvial de diésel, costos de repuestos en aislamiento geográfico, Mantenimiento y Operación (O&M).	El Costo Unitario de prestación del servicio es hasta dos o tres veces superior al del sistema interconectado. La penalización por transporte de combustible fósil debe ser una restricción central en el algoritmo.	[6], [35]
	Costos de Capital y Tarifas (CAPEX): Costo Nivelado de la Energía (LCOE), dependencia de subsidios (FAZNI, FOES), capacidad de pago de la población.	El modelo debe incorporar la baja capacidad de pago de los usuarios, exigiendo esquemas de negocio que incluyan servicios auxiliares y maximicen la vida útil de los activos costosos (como las baterías de litio) para evitar el colapso financiero a mediano plazo.	[36], [37]

La transición de los sistemas eléctricos convencionales hacia arquitecturas descentralizadas en las Zonas No Interconectadas (ZNI) exige un cambio de paradigma en el diseño de las lógicas de control. Las redes aisladas de alta penetración renovable no son pequeños sistemas de potencia tradicionales, sino sistemas adaptativos complejos caracterizados por interdependencias no lineales, bucles de retroalimentación estocásticos y restricciones operativas severas. En este ecosistema, los enfoques de modelado deterministas y los controladores clásicos resultan insuficientes. Para superar estas barreras, la IA y específicamente el Aprendizaje por Refuerzo Profundo (DRL), emerge como el núcleo algorítmico capaz de promover la autogestión energética. En la Figura 2 se ilustra la arquitectura conceptual de este enfoque propuesto.

La Figura 2 revela una jerarquía de flujo de información donde la capa de percepción condiciona la precisión de la capa de inteligencia. Este análisis permite inferir que la autogestión no es un proceso puramente algorítmico, sino una respuesta adaptativa a las restricciones físicas del territorio.

En este contexto, es imperativo reconocer las limitaciones de la autonomía plena. La IA, aunque capaz de optimizar el despacho en milisegundos, requiere de la intervención humana estratégica en fases donde la definición de las funciones de recompensa en agentes de aprendizaje, la validación de los límites de seguridad operativa y la retroalimentación basada en el conocimiento local son necesarias. La tecnología debe actuar como un facilitador supervisado, asegurando que la validación y el ajuste final permanezcan bajo el criterio de expertos y la comunidad.



Fig. 2. Arquitectura de Autogestión

A. *Operación bajo Restricciones Severas*

El primer bloque de la arquitectura modela las condiciones de frontera del sistema [32]. En el contexto de las ZNI de Colombia, que abarcan aproximadamente el 53% del territorio nacional y atienden a poblaciones altamente dispersas, la operación de microrredes se ve sometida a un acoplamiento entre variables técnicas y socioeconómicas [8]. Desde la perspectiva técnica, la inserción de FNCER acopladas mediante inversores electrónicos suprime la inercia rotacional y el amortiguamiento electromecánico inherente a los generadores síncronos diésel [38]. Esta baja inercia provoca que fluctuaciones transitorias en la irradiación solar o variaciones abruptas en el perfil de carga desencadenen tasas de cambio de frecuencia críticas[39].

Los enfoques tradicionales, como el control predictivo basado en modelos (MPC) o las rutinas de optimización enfrentan limitaciones drásticas en estos escenarios debido al retardo computacional y la incapacidad de converger en tiempo real sobre hardware local [40].

Desde la perspectiva socioeconómica los modelos matemáticos deben parametrizar restricciones asociadas al alto costo logístico del suministro de combustibles, la baja capacidad de pago de la población y el bajo índice de desarrollo humano. A diferencia de los sistemas interconectados, la función objetivo en una ZNI no puede reducirse a la maximización de utilidades en mercados mayoristas; el algoritmo debe priorizar la continuidad del servicio y la supervivencia técnica de activos costosos como los sistemas BESS para evitar el colapso económico a mediano plazo [41].

B. *Escasez de Datos (Small Data) en Colombia*

Una de las barreras estructurales significativas para el despliegue de soluciones basadas en IA en el contexto colombiano es la ausencia de AMI y la conectividad inestable [42]. Los modelos de Aprendizaje Profundo (Deep Learning) convencionales son arquitecturas Data-Hungry, exigiendo historiales masivos y telemetría ininterrumpida que son inviables en ecosistemas aislados [31].

El entrenamiento de redes neuronales profundas requiere bases de datos extensas para evitar el sobreajuste e identificar patrones no lineales subyacentes [43]. Si se implementara un enfoque de aprendizaje supervisado directo, la política de control colapsaría ante eventos no observados en los datos de entrenamiento fenómeno conocido como deriva de concepto originando puntos de consigna inválidos que amenazarían la estabilidad integral de la microrred [44].

C. *Modelado Híbrido Genérico*

Para afrontar los desafíos de escasez de datos, la arquitectura propone en su núcleo el modelado híbrido genérico [21]. Este enfoque abandona la dependencia de series temporales históricas y transita hacia el uso de simulaciones dinámicas para crear entornos de entrenamiento sintéticos interactivos [45].

Bajo este esquema se formula el problema de gestión de la microrred como un proceso de decisión de markov (MDP) parcialmente observable [21]. El entorno simulado encapsula las ecuaciones que determinan los flujos de potencia, las dinámicas de los inversores, las restricciones de red y la degradación de las baterías [46]. Mediante plataformas de simulación en tiempo real acopladas a códigos de aprendizaje automático, el entorno computacional ejecuta un entrenamiento [47].

El agente de control interactúa millones de veces con este gemelo digital, sometiéndose a una inyección de ruido estocástico deliberado para aprender políticas robustas que no dependen de pronósticos perfectos y puedan resistir fallos topológicos y caídas de carga [19].

D. *Entrenamiento de Agentes IA*

En la etapa de Entrenamiento de Agentes IA, la arquitectura despliega algoritmos de aprendizaje por refuerzo profundo (DRL) [2]. A diferencia del Q-Learning tabular que sufre frente la dimensionalidad, los algoritmos basados en la arquitectura actor-crítico proporcionan aproximaciones de funciones eficientes mediante redes neuronales profundas en espacios de estado continuos [14].

Destacan algoritmos de política estocástica como el SAC y la optimización de política próxima (PPO) [48]. El algoritmo SAC maximiza un objetivo que incorpora tanto la recompensa esperada como la entropía de la política, forzando al agente a explorar de manera exhaustiva para evitar la convergencia prematura hacia óptimos locales [14].

Para lograr la autonomía de decisión ante las variaciones dinámicas de la red, los marcos metodológicos se expanden mediante el Meta-Aprendizaje y GCN [22]. El Meta-Aprendizaje entrena a un agente para identificar sesgos inductivos compartidos entre fallas, adaptándose instantáneamente a nuevas condiciones dinámicas ejecutando control tolerante a fallas sin reentrenamientos masivos [22].

La integración de Redes GCN permite al agente comprender la topología espacial de la red, garantizando que las inyecciones de potencia no infrinjan los límites térmicos de los conductores ni las restricciones de tensión [20].

E. *Control de Frecuencia Adaptativo y Respuesta Rápida*

En la etapa de salida la inteligencia algorítmica se traduce en acciones físicas sobre los inversores y despachadores mediante el control de frecuencia adaptativo (LFC) [11]. En redes desprovistas de inercia mecánica, la IA actúa como un controlador secundario y primario virtual rápido [13].

Bajo el marco del DRL, la función de recompensa del agente se diseña matemáticamente para penalizar las desviaciones del error de control de área (ACE) y minimizar el índice de error absoluto integral (ITAE) [49].

A través del enfoque impulsado por datos, el agente monitorea continuamente la desviación de frecuencia y mapea instantáneamente estas variables hacia consignas de inyección de potencia activa en milisegundos [14]. Esta inyección emula una inercia virtual adaptativa superando a los reguladores PI de ganancia fija, ya que previene fluctuaciones oscilatorias y detiene rápidamente el hundimiento de la frecuencia antes de que se requieran esquemas de desconexión de carga [50].

F. *Gestión de Almacenamiento y Carga*

El segundo vector operativo es la optimización multiobjetivo enfocada en la viabilidad económica y la mitigación de las restricciones socioeconómicas de la entrada [47]. El agente

inteligente aprende a ejecutar el despacho económico distribuido y la gestión de la flexibilidad de la demanda [51].

La función de valor del algoritmo penaliza severamente el consumo de combustible diésel, las emisiones de CO2 y la degradación prematura de los sistemas BESS [52].

Para contrarrestar el desgaste de los bancos de baterías, el modelo de recompensa evalúa la profundidad de descarga (DoD) y promueve un equilibrio en el Estado de Carga (SoC) entre múltiples unidades distribuidas [36].

El sistema debe desplegar estrategias de Peak Shaving y Load Shifting, orquestando aparatos diferibles como bombeo de agua rural para absorber picos de las FNCER, erradicando vertimientos de energía limpia [53]. Además, mediante aprendizaje por refuerzo multigente (MARL), los nodos negocian dinámicamente el despacho basados únicamente en su observabilidad local, eliminando el desafío de la latencia de comunicaciones [4].

IV. Discusión

A. *La Integración de la Inteligencia Artificial en las ZNI*

La transición energética en las ZNI de Colombia no puede abordarse desde una perspectiva exclusivamente técnica centrada en la simple sustitución de activos; requiere una transformación sociotécnica. Abandonar la dependencia de los combustibles fósiles (diésel) hacia sistemas híbridos renovables es no solo económicamente viable, sino operativamente indispensable para mitigar el alto costo de la prestación del servicio y la contaminación. Sin embargo, este proceso debe ser ejecutado de forma progresiva, apoyado por políticas de "cero diésel" hacia el futuro [10]. Es en este ecosistema de transición donde la integración de la IA debe concebirse bajo un paradigma de escalabilidad y adaptabilidad gradual.

En las etapas iniciales de la electrificación rural, las microrredes se caracterizan por escasez de datos históricos, telemetría precaria y una infraestructura de telecomunicaciones inestable o nula. Por lo tanto, intentar implementar algoritmos dependientes de arquitecturas centralizadas en la nube resulta inviable. Como sugieren los modelos teóricos, la IA debe integrarse localmente utilizando algoritmos de DRL y Meta-Aprendizaje [2]. Esta integración gradual permite que el sistema algorítmico inicie con funciones diagnósticas y evolucione hacia un control prescriptivo. A través del aprendizaje continuo, el agente inteligente asimila las dinámicas estocásticas de su entorno particular como la intermitencia solar local y los picos de demanda comunitaria sin requerir reentrenamientos masivos. Así, la red evoluciona desde un sistema físico estático hacia una infraestructura inteligente que dinamiza el despacho económico y protege los activos de almacenamiento de manera autónoma [21].

B. *Relevancia de los Marcos Regulatorios*

El mayor desafío para garantizar la sostenibilidad a mediano y largo plazo de las microrredes aisladas con IA no es tecnológico, sino regulatorio. Históricamente, el marco normativo colombiano ha estructurado la prestación del servicio bajo una rígida separación de actividades (generación, transmisión, distribución y comercialización), un modelo diseñado para el SIN que a menudo resulta inviable para topologías rurales descentralizadas [8].

Con el tiempo, el estado ha promulgado iniciativas para modernizar este esquema. La Ley 1715 de 2014 abrió la puerta a la integración de las FNCER en las ZNI, mientras que la Ley 2099 de 2021 fortaleció los fondos públicos e introdujo exenciones fiscales clave [54]. Más recientemente, la Ley 2294 de 2023 (Plan Nacional de Desarrollo) y el Decreto Reglamentario 2236 de 2023 introdujeron un hito fundamental: la figura legal de las "Comunidades Energéticas", habilitando a los habitantes a organizarse para generar, comercializar y gestionar su propia energía de forma descentralizada [55].

A pesar de estos avances, existe un vacío crítico frente a la remuneración operativa de las redes inteligentes. La propuesta de modelo de negocio actual conlleva a que la electrificación rural no sobrevivirá económicamente si los ingresos se limitan exclusivamente a la facturación por energía consumida (kWh). Es imperativo diseñar e implementar marcos regulatorios que incentiven y remuneren financieramente los servicios complementarios autónomos, tales como el control de frecuencia y la regulación de tensión local [36].

En redes de baja inercia, características de las ZNI operadas con FNCER, la estabilidad es baja. En este punto, la IA aporta un valor técnico, ya que el algoritmo actúa sin intervención humana regulando la inyección de potencia activa o reactiva en milisegundos, emulando inercia virtual o gestionando el desplazamiento de cargas flexibles para evitar apagones [19]. Es necesario un marco regulatorio moderno que promueva la evolución de las resoluciones CREG 038 de 2018 o CREG 174 de 2021 que asigne un valor monetario a la estabilidad aportada por la IA. Dicha actualización promueve estos servicios autónomos diversifica los flujos de ingresos, atrae inversión privada y asegura que el agente inteligente sea una herramienta de rentabilidad económica directa para la comunidad [56].

C. *Necesidad de Interfaces Simplificadas*

La sofisticación algorítmica de la IA y la robustez regulatoria resultan insostenibles si la comunidad receptora no logra apropiarse de la tecnología. Investigaciones enfocadas en el fracaso de proyectos de electrificación en países en desarrollo revelan que los proyectos fuera de red colapsan en los primeros meses de operación. Las causas comúnmente no son defectos del hardware; el fracaso obedece a deficiencias en la gestión y mantenimiento, la escasa participación comunitaria y una nula apropiación social [57].

Al proponer arquitecturas de autogestión basadas en IoT para áreas rurales el sistema debe ejecutarse de forma local y utilizar plataformas de código abierto con interfaces de usuario intuitivas. Esto garantiza que la información vital se visualice de manera fácilmente interpretable. Esto requiere un nivel mínimo de inteligencia en la red, salvaguardando la privacidad de la información y garantizando la operatividad sin conexión a internet [58]. Los modelos de gestión integral requieren plataformas digitales que doten al usuario local de las capacidades necesarias para identificar por sí mismo fallas menores o comprender el nivel de carga de sus baterías, fomentando la autogestión [32].

Una interfaz de usuario limpia y culturalmente adaptada permite que un gestor comunitario pueda observar las recomendaciones predictivas de la IA y tomar decisiones activas sobre el despacho de sus recursos. Esto aumenta la automatización, eleva el índice de confianza y garantiza la sostenibilidad a largo plazo que solo se logra mediante la participación.

V. Conclusiones

La integración de modelos de simulación dinámica con algoritmos de inteligencia artificial resuelve desafíos de gestión y control en ZNI. Al suplir la escasez de datos históricos con entornos de simulación enriquecidos con ruido, la arquitectura logra entrenar agentes informados por la física y la topología de la red. Una vez desplegados en hardware, estos algoritmos ejecutan respuestas estocásticas no lineales en tiempo real que mitigan la inestabilidad de las redes de baja inercia, suprimen los costos logísticos derivados del uso ineficiente de combustibles fósiles, y protegen la salud de los activos de almacenamiento. Este sistema de autogestión propone mejoras a las redes aisladas de Colombia en infraestructuras autónomas, resilientes y económicamente sostenibles a largo plazo.

Esta revisión sistemática permite identificar tres capas esenciales para la autonomía (Percepción, Inteligencia y Gestión), así como la superioridad de los mecanismos híbridos de simulación frente a la escasez de datos. La literatura evidencia que la autogestión energética es el pilar para la estabilidad de frecuencia en sistemas de baja inercia.

Se sugiere que la descentralización de la inteligencia reduce los costos logísticos operativos al minimizar el error en el pronóstico de demanda. Sin embargo, se detecta una brecha en la estandarización de indicadores para la gestión de la demanda en entornos rurales dispersos.

Esta investigación forma parte de un proyecto doctoral en curso en la Universidad Nacional de Colombia. Las líneas futuras se centrarán en la validación de estos modelos mediante estudios de caso reales en las ZNI colombianas, profundizando en el análisis de costos operativos, flexibilidad de la red y el impacto de mecanismos avanzados de gestión de la demanda

Agradecimiento

Los autores agradecen el apoyo al proyecto titulado "Identificación de Estrategias y Criterios para la Electrificación Sostenible en comunidades Rurales Aisladas de Economías Emergentes", código HERMES 62627, ejecutado a través de la Vicedecanatura de Investigación y Extensión de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Referencias

[1] IEA, "World Energy Outlook 2024," 2024.

[2] B. Gülmez, "Artificial intelligence-driven smart grid optimization: A comprehensive review of machine learning, renewable integration, and cybersecurity applications," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 30, p. 101849, May 2026, doi: 10.1016/j.ecmx.2026.101849.

[3] K. Ukoba, K. O. Olatunji, E. Adeoye, T.-C. Jen, and D. M. Madyira, "Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: Review and future prospects," *Energy & Environment*, vol. 35, no. 7, pp. 3833–3879, Nov. 2024, doi: 10.1177/0958305X241256293.

[4] D. Naware and A. Mitra, "Data-Driven Technology Applications in Planning, Demand-Side Management, and Cybersecurity for Smart Household Community," *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, vol. 5, no. 10, pp. 4868–4883, Oct. 2024, doi: 10.1109/TAI.2024.3417389.

[5] M. M. Forootan, I. Larki, R. Zahedi, and A. Ahmadi, "Machine Learning and Deep Learning in Energy Systems: A Review," *Sustainability*, vol. 14, no. 8, p. 4832, Apr. 2022, doi: 10.3390/su14084832.

[6] A. R. Zabala, D. López-García, S. X. Carvajal-Quintero, and A. A. Manrique, "A Comprehensive Review of Sustainability in Isolated Colombian Microgrids," *Tecnura*, vol. 25, no. 70, pp. 126–145, Jun. 2021, doi: 10.14483/22487638.18619.

[7] Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas - IPSE, "REPORTE PRESTACION DEL SERVICIO ZONAS NO INTERCONECTADAS," 2023.

[8] A. Rodriguez Zabala, D. López-García, S. X. Carvajal-Quintero, and A. Arango Manrique, "A Comprehensive Review of Sustainability in Isolated Colombian Microgrids," *Tecnura*, vol. 25, no. 70, pp. 126–145, Oct. 2021, doi: 10.14483/22487638.18619.

[9] UPME, "Circular Externa No. 028-2020: Respuesta a comentarios 2018 y socialización prepublicación documentos selección inversionista Planta Regasificación del Pacífico," 2020.

[10] E. Garces, C. J. Franco, J. Tomei, and I. Dyner, "Sustainable electricity supply for small off-grid communities in Colombia: A system dynamics approach," *Energy Policy*, vol. 172, p. 113314, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113314.

[11] H. Bevrani, H. Golpîra, A. R. Messina, N. Hatziargyriou, F. Milano, and T. Ise, "Power system frequency control: An updated review of current solutions and new challenges," *Electric Power Systems Research*, vol. 194, p. 107114, May 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107114.

[12] Rekha Regar, Raunak Jangid, and Kapil Parikh, "Load Frequency Control of Two Area System Using Genetic Algorithm," *International Journal of Engineering Research and*, vol. V6, no. 04, Apr. 2017, doi: 10.17577/IJERTV6IS040198.

[13] P. Aslami, T. Aryal, N. Bhujel, H. M. Rekabdarkolaee, Z. Wang, and T. M. Hansen, "Reinforcement Learning-Based Fast Frequency Response Using Energy Storage for Remote Microgrids," *IET Energy Systems Integration*, vol. 8, no. 1, Jan. 2026, doi: 10.1049/esi2.70030.

[14] Z. Wu, Z. Lv, X. Huang, and Z. Li, "Data driven frequency control of isolated microgrids based on priority experience replay soft deep reinforcement learning algorithm," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 2484–2492, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2023.12.052.

[15] S. Pfenninger, A. Hawkes, and J. Keirstead, "Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 74–86, May 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.02.003.

[16] M. R. Saavedra M., C. H. de O. Fontes, and F. G. M. Freires, "Sustainable and renewable energy supply chain: A system dynamics overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 247–259, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.033.

[17] C. Zhang, X. Dou, L. Wang, Y. Dong, and Y. Ji, "Distributed Cooperative Voltage Control for Grid-Following and Grid-Forming Distributed Generators in Islanded Microgrids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 589–602, Jan. 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3158306.

[18] P. C. Okonkwo *et al.*, "Solar PV systems under weather extremes: Case studies, classification, vulnerability assessment, and adaptation pathways," Jun. 01, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.egyr.2024.12.067.

[19] M. Wu, D. Ma, K. Xiong, and L. Yuan, "Deep Reinforcement Learning for Load Frequency Control in Isolated Microgrids: A Knowledge Aggregation Approach with Emphasis on Power Symmetry and Balance," *Symmetry (Basel).*, vol. 16, no. 3, p. 322, Mar. 2024, doi: 10.3390/sym16030322.

[20] X. Ma, W. Zhen, H. Ren, G. Zhang, K. Zhang, and H. Dong, "A Method for Fault Localization in Distribution Networks with High Proportions of Distributed Generation Based on Graph Convolutional Networks," *Energies (Basel).*, vol. 17, no. 22, p. 5758, Nov. 2024, doi: 10.3390/en17225758.

[21] S. Totaro, I. Boukas, A. Jonsson, and B. Cornélusse, "Lifelong control of off-grid microgrid with model-based reinforcement learning," *Energy*, vol. 232, p. 121035, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121035.

[22] J. Li and Y. Cheng, "Deep Meta-Reinforcement Learning-Based Data-Driven Active Fault Tolerance Load Frequency Control for Islanded Microgrids Considering Internet of Things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 6, pp. 10295–10303, Mar. 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3325482.

[23] R. F. Colmenares-Quintero, G. Maestre-Gongora, O. C. Valderrama-Riveros, M. Baquero-Almazo, and K. E. Stansfield, "A Data-Driven Architecture for Smart Renewable Energy Microgrids in Non-Interconnected Zones: A Colombian Case Study," *Energies (Basel).*, vol. 16, no. 23, p. 7900, Dec. 2023, doi: 10.3390/en16237900.

[24] J. Li and T. Zhou, "Bio-inspired distributed load frequency control in Islanded Microgrids: A multi-agent deep reinforcement learning approach," *Appl. Soft Comput.*, vol. 166, p. 112146, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.asoc.2024.112146.

[25] W. Guo, H. Du, T. Han, S. Li, C. Lu, and X. Huang, "Learning-driven load frequency control for islanded microgrid using graph networks-based deep reinforcement learning," *Front. Energy Res.*, vol. 12, Dec. 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1517861.

[26] R. Wazirali, E. Yaghoubi, M. S. S. Abujazar, R. Ahmad, and A. H. Vakili, "State-of-the-art review on energy and load forecasting in microgrids using artificial neural networks, machine learning, and deep learning techniques," *Electric Power Systems Research*, vol. 225, p. 109792, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109792.

[27] F. F. Fadoul, A. A. Hassan, and R. Çağlar, "Integrating autoencoder and decision tree models for enhanced energy consumption forecasting in microgrids: A meteorological data-driven approach in Djibouti," *Results in Engineering*, vol. 24, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103033.

[28] A. Shahid, R. Ahmadiahangar, A. Rosin, A. Blinov, T. Korõtko, and D. Vinnikov, "Leveraging the machine learning techniques for demand-side flexibility – A comprehensive review," Jan. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.epsr.2024.111185.

[29] M. Mao, P. Jin, N. D. Hatziargyriou, and L. Chang, "Multiagent-Based Hybrid Energy Management System for Microgrids," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, pp. 1–1, 2014, doi: 10.1109/TSTE.2014.2313882.

[30] Y. Shang *et al.*, "Stochastic dispatch of energy storage in microgrids: An augmented reinforcement learning approach," *Appl. Energy*, vol. 261, p. 114423, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114423.

[31] M. Mishra, J. Nayak, B. Naik, and A. Abraham, "Deep learning in electrical utility industry: A comprehensive review of a decade of research," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 96, p. 104000, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.engappai.2020.104000.

[32] P. Lillo, L. Ferrer-Martí, Á. Fernández-Baldor, and B. Ramírez, "A new integral management model and evaluation method to enhance sustainability of renewable energy projects for energy and sanitation services," *Energy for Sustainable Development*, vol. 29, pp. 1–12, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.esd.2015.08.003.

[33] I. Ioannou, S. Javaid, Y. Tan, and V. Vassiliou, "Autonomous Reinforcement Learning for Intelligent and Sustainable Autonomous Microgrid Energy Management," *Electronics (Basel).*, vol. 14, no. 13, p. 2691, Jul. 2025, doi: 10.3390/electronics14132691.

[34] S. Watson, D. Bian, N. Sahraei, A. G. Winter, T. Buonassisi, and I. M. Peters, "Advantages of operation flexibility and load sizing for PV-powered system design," *Solar Energy*, vol. 162, pp. 132–139, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.01.022.

[35] I. Granit, "What makes Colombia's indigenous peoples adopt microgrids? Social acceptance and financial constraints in renewable energy diffusion," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 101, p. 103132, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.erss.2023.103132.

[36] A. Arango-Manrique, D. López-García, C. Arango-Lemoine, and S. X. Carvajal-Quintero, "Business Model Proposal for Energy Transition towards Operational and Economic Sustainability for Rural Electrification: Colombian Case," *Sustainability*, vol. 13, no. 8, p. 4308, Jun. 2021, doi: 10.3390/su13084308.

[37] R. Khalid, S. Landini, G. Das Valasai, F. Khalid, and P. Sandwell, "Towards equitable and inclusive energy systems for remote off-grid communities: A socio-technical assessment of solar power for village Helario in Tharparkar, Pakistan," *Renewable and Sustainable Energy Transition*, vol. 4, p. 100067, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.rset.2023.100067.

[38] P. Pourbeik *et al.*, "A Generic Model for Inertia-Based Fast Frequency Response of Wind Turbines and Other Positive-Sequence Dynamic Models for Renewable Energy Systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 39, no. 1, pp. 425–434, Mar. 2024, doi: 10.1109/TEC.2023.3315058.

[39] W. Cui, Y. Jiang, and B. Zhang, "Reinforcement Learning for Optimal Primary Frequency Control: A Lyapunov Approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 2, pp. 1676–1688, Mar. 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3176525.

[40] M. Jayachandran and G. Ravi, "Decentralized model predictive hierarchical control strategy for islanded AC microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 170, pp. 92–100, May 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.01.010.

[41] A. Fajardo *et al.*, "Business models and access to finance for mini grid development in sub-Saharan Africa," *Energy for Sustainable Development*, vol. 85, p. 101666, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.esd.2025.101666.

[42] R. F. Colmenares-Quintero, G. Maestre-Gongora, O. C. Valderrama-Riveros, M. Baquero-Almazo, and K. E. Stansfield, "A Data-Driven Architecture for Smart Renewable Energy Microgrids in Non-Interconnected Zones: A Colombian Case Study," *Energies (Basel).*, vol. 16, no. 23, p. 7900, Dec. 2023, doi: 10.3390/en16237900.

[43] T. Cheng, R. Chen, N. Lin, T. Liang, and V. Dinavahi, "Machine-Learning-Reinforced Massively Parallel Transient Simulation for Large-Scale Renewable-Energy-Integrated Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, doi: 10.1109/TPWRS.2024.3409729.

[44] M. Pourshirazi, M. Simab, A. Mirzaee, and B. Fani, "Leveraging Meta-Learning for Enhanced False Data Injection Detection in Smart Grids: The ONF-ML Approach," *IET Renewable Power Generation*, vol. 19, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1049/rpg2.70016.

[45] Y.-C. Hsu, Y.-H. Hung, and C.-Y. Lee, "Robust ensemble forecasting and deep reinforcement learning for energy management on islanded microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 173, p. 111405, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.ijepes.2025.111405.

[46] G. H. Galvez *et al.*, "Optimization of autonomous hybrid systems with hydrogen storage: Life cycle assessment," *Int. J. Energy Res.*, vol. 36, no. 6, pp. 749–763, May 2012, doi: 10.1002/er.1830.

[47] M. Kumar and B. Tyagi, "A machine learning-based stochastic optimal energy management framework for a renewable energy-assisted isolated microgrid system," *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 19, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1080/15567249.2023.2294869.

[48] L. L. Xie, Y. Li, P. Fan, L. Wan, K. Zhang, and J. Yang, "Research on load frequency control of multi-microgrids in an isolated system based on the multi-agent soft actor-critic algorithm," *IET Renewable Power Generation*, vol. 18, no. 7, pp. 1230–1246, May 2024, doi: 10.1049/rpg2.12782.

[49] J. Li and T. Zhou, "Prior Knowledge Incorporated Large-Scale Multiagent Deep Reinforcement Learning for Load Frequency Control of Isolated Microgrid Considering Multi-Structure Coordination," *IEEE Trans. Industr. Inform.*, vol. 20, no. 3, pp. 3923–3934, Mar. 2024, doi: 10.1109/TII.2023.3316253.

[50] A. B. Akinwola and A. Alkuhayli, "Walrus Optimization-Based Adaptive Virtual Inertia Control for Frequency Regulation in Islanded Microgrids," *Electronics (Basel).*, vol. 14, no. 20, p. 3980, Oct. 2025, doi: 10.3390/electronics14203980.

[51] W. Liu, P. Zhuang, H. Liang, J. Peng, and Z. Huang, "Distributed Economic Dispatch in Microgrids Based on Cooperative Reinforcement Learning," *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2192–2203, Jun. 2018, doi: 10.1109/TNNLS.2018.2801880.

[52] S. Jayaraj, T. P. I. Ahamed, M. P. Abraham, E. A. Jasmin, and S. M. Sulthan, "Reinforcement learning for energy management of an islanded microgrid: Analysis of state, state space and reinforcement function," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 38, p. 101362, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.segan.2024.101362.

[53] L. Meng, C. Zhang, Y. Ren, B. Zhang, and C. Lv, "Mixed-integer linear programming and constraint programming formulations for solving distributed flexible job shop scheduling problem," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 142, p. 106347, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106347.

[54] J. Fabio and Z. Parra, "Propuesta de Esquema de Negocio para fomentar la sustitución o complementariedad de la generación con Diésel y reducir los costos de prestación," Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2022.

[55] Ministerio de Minas y Energía - MME, "Metodología General Estrategia Nacional Comunidades Energéticas," 2024, *Bogota*.

[56] A. Rodriguez Zabala, "Incentivos para la promoción de la electrificación sostenible en la Zona No Interconectada de Colombia," Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2022.

[57] E. Andrea and D. Rueda, "Factores que afectan la supervivencia de los proyectos de energía eléctrica en las zonas no interconectadas: Lecciones para Colombia de la experiencia internacional," Maestria, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2022.

[58] D. Flores-Martin, J. Rojo, E. Moguel, J. Berrocal, and J. M. Murillo, "Smart Nursing Homes: Self-Management Architecture Based on IoT and Machine Learning for Rural Areas," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2021, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.1155/2021/8874988.

Representatividad Estructural en el Análisis de Datos Geriátricos: Hacia un Modelo de Mitigación de Desbalanceo en el Marco del Proyecto VITALIA

Amanda Milena Santacruz
Escuela de Ingenierías – Doctorado en Ingeniería
Universidad Pontificia Bolivariana
Medellín - Colombia
amanda.santacruz@upb.edu.co

Leonardo Betancur
Escuela de Ingenierías – Doctorado en Ingeniería
Universidad Pontificia Bolivariana
Medellín - Colombia
leonardo.betancur@upb.edu.co

Sixto Enrique Campana
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería - ECBTI
Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
Pasto - Colombia
sixto.campana@unad.edu.co

Giovanna Rosas
Escuela de Ciencias de la Salud - ECISA
Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
Pasto - Colombia
giovana.rosas@unad.edu.co

***Resumen*—** La Geriatría Predictiva es una nueva tendencia que busca anticipar eventos críticos en personas mayores, tales como caídas o deterioro cognitivo, entre otros, mediante el uso de Inteligencia Artificial. Pero en este contexto, los modelos resultantes suelen presentar sesgos debido al desbalanceo extremo de las clases en los conjuntos de datos clínicos. En el desarrollo de los objetivos de la tesis doctoral relacionada con un modelo de preprocesamiento para evitar el desbalanceado de datos en conjuntos de datos de personas mayores y en el marco de ejecución del proyecto VITALIA, se postula que la dificultad técnica no reside únicamente en la escasez numérica de registros de la clase minoritaria, sino en un problema de representatividad estructural y muestreo mal condicionado, donde la información relevante queda solapada o distorsionada en el espacio métrico.

Acorde a lo anterior, este trabajo analiza las técnicas de diagnóstico y mitigación de desbalanceo en el preprocesamiento, encontrando que los métodos convencionales de sobremuestreo generalmente tienden introducir ruido perjudicial. Como alternativa, se propone una línea de solución basada en el refinamiento estructural, que utiliza técnicas de limpieza de vecindad como Edited Nearest Neighbors (ENN) y la preservación de patrones mediante Manifold Alignment. En la investigación de la tesis doctoral y en el avance del proyecto VITALIA se ha considerado el uso de referentes internacionales para validaciones cruzadas de la propuesta, pero el núcleo de esta investigación se basa en datos reales recolectados de personas mayores en centros geriátricos de los departamentos de Nariño (Fundación San José), Cauca (Fundación Años Maravillosos) y Valle del Cauca (Fundación Cottolengo.

A parte del estudio de las técnicas de preprocesamiento convencionales, el fin de la investigación se dirige hacia el diseño de una solución que propenda por estabilizar la estructura del dataset antes del entrenamiento del modelo. Para avanzar en el fin propuesto, en este estudio se han analizado métricas intrínsecas de estabilidad, como el K-Condition Number y medidas de continuidad estructural, con el fin de lograr que la clase minoritaria sea matemáticamente representativa. A nivel de geriatría con lo que se está trabajando se busca que los eventos clínicos de baja frecuencia, pero de alto impacto para la vida de las personas mayores, sean detectados con precisión.

Finalmente, esta investigación, que relaciona la ingeniería aplicada busca transformar el preprocesamiento de datos en una etapa de curaduría topológica. Mediante la integración de la analítica de datos con la realidad sociodemográfica del suroccidente colombiano, el proyecto VITALIA y la tesis doctoral en desarrollo, pretenden avanzar en el desarrollo de una herramienta de soporte a la decisión clínica que sea éticamente responsable y técnicamente robusta, promoviendo un envejecimiento saludable y una atención geriátrica preventiva y personalizada.

***Palabras clave*—** *VITALIA, Geriatría predictiva, Desbalanceo estructural, Muestreo mal condicionado, Representatividad de datos, Refinamiento estructural, IA en Salud.*

I. Introducción

El envejecimiento acelerado de la población constituye uno de los desafíos más críticos del siglo XXI para los sistemas de salud pública. En Colombia, se proyecta que para 2050 cerca del 28% de la población superará los 60 años, con una concentración importante en la región Pacífico, que comprende los departamentos de Nariño, Cauca, Valle del Cauca y Chocó, donde las desigualdades estructurales en el acceso a servicios de salud agravan la situación (DANE, 2021; Ministerio de Relaciones Exteriores, 2022). En este contexto, la geriatría predictiva surge como un enfoque interdisciplinario que integra la Inteligencia Artificial (IA) con datos clínicos para anticipar eventos críticos como caídas, deterioro cognitivo y readmisiones hospitalarias.

El proyecto VITALIA, que comprende el desarrollo de un modelo predictivo basado en inteligencia artificial para el monitoreo y prevención de la discapacidad en personas mayores de la región Pacífico de Colombia, nace precisamente para abordar esta brecha. Liderado por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) en alianza con la Universidad del Valle, con participantes de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), y las Fundaciones San José, Años Maravillosos y Cottolengo, el proyecto busca construir un dataset especializado y validado, e implementar modelos de IA ajustados al contexto

sociodemográfico regional, bajo principios de justicia algorítmica y protección de datos.

En el desarrollo de la investigación, un obstáculo técnico fundamental que constituye la base del proyecto es: el desbalanceo extremo de clases en los conjuntos de datos clínicos geriátricos, donde, los eventos de mayor relevancia clínica son: caídas, síndromes de fragilidad, discapacidad funcional, entre otros, y que son precisamente los menos representados en los registros disponibles, con tasas de desbalanceo que pueden oscilar entre 100:1 y 10000:1. En este contexto, los métodos convencionales de preprocesamiento no logran resolver el problema de forma satisfactoria; sino que por el contrario, pueden introducir ruido estructural que distorsiona las relaciones fundamentales del conjunto de datos, comprometiendo la fiabilidad clínica de los modelos resultantes.

Este trabajo presenta el marco conceptual y la propuesta metodológica que articula la tesis doctoral que apoya el proyecto en ejecución, con el fin de diseñar una solución de preprocesamiento basada en refinamiento estructural que propenda por una representatividad matemática de la clase minoritaria sin afectar la integridad topológica del dataset.

II. Marco Teórico y Revisión de Literatura

A. *Desbalanceo de Clases en Datos Clínicos Geriátricos*

El desbalanceo de clases ocurre cuando una o más categorías en el conjunto de datos presentan una representación significativamente menor que las demás. En el contexto geriátrico, este problema tiene mayor relevancia: la discapacidad, la fragilidad y los eventos adversos son condiciones de baja frecuencia pero de alto impacto clínico. La Tasa de Desbalanceo (Imbalance Ratio, IR), definida como la razón entre la cardinalidad de la clase mayoritaria y la minoritaria, puede alcanzar valores extremos en registros de caídas por acelerometría (donde el evento puede durar segundos frente a horas de actividad normal) o en modelos de readmisión hospitalaria (donde solo el 10-15% de los pacientes geriátricos reingresan en 30 días).

Las consecuencias de ignorar este desbalanceo son (Rajkomar et al., 2018; Lu et al., 2019):

- Errores y sesgos clínicos, con exceso de falsos negativos que generan diagnósticos erróneos
- Problemas en la atención médica, al desestimar patrones de condiciones menos comunes.
- Problemas en la toma de decisiones, con alertas no confiables que comprometen la eficacia de las intervenciones tempranas.

B. *Muestreo Mal Condicionado (MMC): El problema central doctoral:*

El Muestreo Mal Condicionado (MMC) va más allá de la simple escasez numérica de la clase minoritaria. Se refiere al uso de técnicas de preprocesamiento que no logran balancear correctamente las clases, generando datos irrelevantes o perdiendo información crítica. Sus causas principales son (Koziarski & Woźniak, 2024):

1) uso incorrecto de técnicas de sobremuestreo sintético;

2) submuestreo excesivo con pérdida de información;

3) reducción de dimensionalidad mal aplicada que elimina variables importantes;

4) normalización excesiva que borra diferencias críticas entre clases.

La propuesta doctoral que atañe este documento identifica que la dificultad no reside solo en la cantidad de ejemplos, sino en un problema de calidad y fidelidad estructural: la información relevante de la clase minoritaria queda solapada o distorsionada en el espacio métrico, haciendo que los modelos no puedan aprender los patrones clínicos. Esta perspectiva diferencia fundamentalmente la propuesta de los enfoques existentes

C. *Estado del Arte: Soluciones existentes y sus limitaciones*

La literatura científica ha propuesto diversas soluciones al desbalanceo de datos, que pueden clasificarse en tres grandes grupos:

1. *Métodos de Sobremuestreo Sintético:* En este grupo el referente es un método denominado SMOTE (Chawla et al., 2002) , que corresponde a un algoritmo que genera nuevas instancias sintéticas mediante interpolación entre vecinos de la clase minoritaria. En la misma línea se encuentra otra opción denominada ADASYN (He et al., 2008), que es un algoritmo que extiende este enfoque de forma adaptativa, generando más muestras en las regiones de mayor dificultad de clasificación. Sin embargo, ambos métodos presentan limitaciones críticas:
    a. Introducción de ruido cuando los datos sintéticos no respetan los límites de decisión entre clases;
    b. Generación de ejemplos en áreas no representativas del espacio de características;
    c. Pérdida de la estructura topológica del dataset original;
    d. Inestabilidad en escenarios de desbalanceo severo o extremo (Ghosh et al., 2024; Johnson & Khoshgoftaar, 2019).
2. *Métodos de Submuestreo:* En este grupo, se referencian técnicas como: Tomek Links, Edited Nearest Neighbors (ENN) y NearMiss, las cuales buscan limpiar la clase mayoritaria eliminando instancias redundantes o ruidosas. Aunque estos métodos son menos propensos a introducir ruido, su aplicación puede resultar en pérdida excesiva de información en contextos de desbalanceo extremo.
3. *Métodos Híbridos y Ensembles*: En este tercer grupo se encuentran combinaciones como: SMOTE+ENN, SMOTETomek, y enfoques de ensemble como SMOTEBoost, los cuales intentan subsanar las debilidades individuales. A pesar de esto, la investigación doctoral de Koziarski (2021) y las revisiones de Krawczyk (2016) confirman que el problema del desbalanceo severo en contextos clínicos sigue siendo un problema abierto, especialmente cuando se trata de preservar la estructura informativa original del dataset. Acorde a lo anterior, En la tabla 1, se puede observar la comparación entre los enfoques

mencionados, relacionando su principal debilidad y vacío que se propende abordar en la tesis doctoral que se está realizando.

TABLA 1. COMPARACIÓN DE ENFOQUES EXISTENTES FRENTE A LA PROPUESTA DOCTORAL

Enfoque	***Métodos representativos***	***Principal Debilidad***	***Vacío Abordado Tesis***
Sobremuestreo Sintético	SMOTE, ADASYN Borderline-SMOTE	Introduce ruido estructural, viola límites de decisión.	Preservación de la topología en el espacio geométrico
Submuestreo	Tomek Links, ENN, NearMiss	Perdida de información valiosa	Refinamiento sin eliminar patrones minoritarios.
Híbridos	SMONTE+ENN, SMOTETomek, SMOTEBoost	Combinan debilidades de ambos enfoques	Curaduría topológica antes del entrenamiento
Reducción de dimensionalidad	PCA, tSNE, UMAP	Puede eliminar señal de clase minoritaria	Reducción preservadora de estructura

III. PROYECTO VITALIA: CONTEXTO CON DATOS REALES

A. Descripción del Proyecto

VITALIA es un proyecto de investigación en alianza con varias Instituciones. Su objetivo general es desarrollar un modelo predictivo basado en IA que, sustentado en un dataset especializado y contextualizado, permita monitorear y predecir la discapacidad en personas mayores de la región del Pacífico colombiano, mejorando su calidad de vida. La alianza interinstitucional que conforma el proyecto, articula experticia en inteligencia artificial y ciencia de datos (UNAD – Grupos Davinci y AequitasLab), validación clínica geriátrica (Universidad del Valle – Grupo de Gerontología y Geriatría), datos históricos especializados (Fundación Cottolengo), contextos reales de implementación (Fundaciones San José y Años Maravillosos), y validación metodológica doctoral (UPB Medellin). Esta sinergia busca lograr la pertinencia clínica, rigor técnico y aplicabilidad social de los resultados.

B. Problema Central del proyecto y articulación con la Tesis Doctoral

El problema central del proyecto en ejecución es la inexistencia de datasets o conjuntos de datos especializados, interoperables y representativos para el monitoreo predictivo de la discapacidad en personas mayores de la región Pacífico, así como la ausencia de modelos de IA ajustados al contexto local. Acorde a lo anterior la tesis doctoral en desarrollo aporta directamente a la solución de este problema desde la etapa de preprocesamiento: mientras que el proyecto de investigación con las entidades aliadas construyen el dataset y el modelo predictivo, la tesis desarrolla el modelo de mitigación de desbalanceo que propende por la calidad y representatividad estructural del dataset antes del entrenamiento.

La relación es de complementariedad esencial: sin un preprocesamiento robusto que preserve la representatividad de los eventos clínicos de baja frecuencia (fragilidad, discapacidad, caídas), ningún modelo predictivo de IA, por sofisticado que sea, puede ofrecer inferencias clínicamente válidas y equitativas para la población mayor del Pacífico colombiano.

C. Alineación objetivos Proyecto en ejecución y Tesis Doctoral

La complementariedad entre el proyecto VITALIA y la tesis doctoral no es circunstancial, responde a una arquitectura que se ha analizado y en la que cada objetivo específico encuentra en la investigación doctoral un aporte técnico concreto que busca ayudar en su alcance y desarrollo metodológico. Esta relación se articula en dos direcciones simultáneas: la tesis doctoral se nutre del contexto real, los datos y la validación clínica que el proyecto provee; y este se beneficiará del modelo de preprocesamiento que la tesis busca aportar antes del entrenamiento de cualquier clasificador de IA. A continuación se relaciona la articulación mencionada:

OE1 de VITALIA: Construir un dataset representativo**:** La construcción de un dataset especializado con variables clínicas, funcionales, sociales y ambientales de personas mayores del Pacífico colombiano es el insumo primario de la investigación doctoral. Sin embargo, la simple recolección de datos no garantiza su usabilidad en modelos de IA, ante esto la tesis doctoral en desarrollo interviene precisamente aportando el modelo de mitigación de desbalanceo que busca convertir ese dataset recolectado en un dataset estructuralmente representativo.

El K-Condition Number y las métricas de continuidad estructural que se están trabajando en la tesis son los indicadores que permitirán certificar que el dataset del proyecto en ejecución cumple los requisitos matemáticos de estabilidad antes de ser utilizado para el entrenamiento. La contribución doctoral a este objetivo es, por tanto, de carácter fundacional: sin ella, el dataset puede existir pero no ser confiable para la predicción clínica.

OE2 de VITALIA: Identificar variables críticas e indicadores multidimensionales: La selección y validación de variables predictoras de discapacidad exige no solo conocimiento geriátrico experto, sino evidencia computacional de que esas variables mantienen su relevancia estadística después del preprocesamiento. La tesis doctoral busca aportar el análisis comparativo de importancia de variables, mediante SHAP (SHapley Additive exPlanations) y LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations), antes y después de aplicar técnicas de rebalanceo.

Si el preprocesamiento altera la jerarquía de variables críticas, los modelos aprenderán relaciones distorsionadas respecto a la realidad clínica. La tesis propenderá para que las variables identificadas por los expertos geriátricos de la Universidad del Valle conserven su peso informativo a lo largo de todo el pipeline de datos.

OE3 de VITALIA: Diseñar modelos predictivos de IA ajustados al contexto regional: Un modelo predictivo es tan bueno como los datos con los que se entrena. La propuesta de refinamiento estructural de la tesis, basada en la combinación de Edited Nearest Neighbors (ENN) para limpieza de fronteras de decisión y Manifold Alignment para preservación de la geometría local de la clase minoritaria, busca entregar al pipeline de modelado de VITALIA un conjunto de datos de mayor calidad intrínseca. Esto se espera se vea reflejado en mejores métricas de clasificación en escenarios de desbalanceo severo: mayor Matthews Correlation Coefficient (MCC), mayor AUC-PR (Área bajo la curva Precisión-Recall) y mayor coherencia clínica de las predicciones. En términos prácticos, el modelo que se desarrolle se espera que detecte con mayor precisión los eventos de fragilidad y discapacidad de baja frecuencia pero de alto impacto en la vida de las personas mayores del suroccidente colombiano.

OE4 de VITALIA: Validar modelos predictivos en entornos reales de atención: La validación en campo, que se hará en las instalaciones de la Fundación San José (Pasto, Nariño), la Fundación Años Maravillosos (Popayán, Cauca) y la Fundación Cottolengo (Cali, Valle del Cauca, será el escenario de prueba más exigente tanto para VITALIA como para la tesis doctoral. En este contexto, la investigación doctoral buscará aportar el análisis de robustez y equidad algorítmica (fairness), donde se evaluará si el modelo de preprocesamiento introduce o amplifica disparidades entre subgrupos demográficos, ya sea por edad, género o condición socioeconómica, mediante métricas como Demographic Parity, Equal Opportunity y Equalized Odds.

Un modelo que funcione bien en promedio pero discrimine sistemáticamente a subgrupos vulnerables de la región no cumple los criterios éticos ni clínicos del proyecto. Por lo anterior, la tesis en desarrollo busca proporcionar las herramientas metodológicas para detectar y corregir estos sesgos antes de la implementación piloto.

OE5 de VITALIA: Promover apropiación social, transferencia y escalabilidad: Los recursos didácticos, que se construyan sobre el dataset resultante de la investigación, permitirá que el equipo interdisciplinario del proyecto, los profesionales de salud de las fundaciones aliadas y la comunidad académica comprendan, repliquen y critiquen cada decisión del pipeline de preprocesamiento. Adicionalmente, en el desarrollo de la investigación se ha venido trabajando con código abierto y la documentación técnica bajo licencia abierta, lo que propende por contribuir a la infraestructura científica necesaria para la geriatría predictiva en Colombia y América Latina, respondiendo simultáneamente al mandato de apropiación social y al requisito de comunicación del paradigma Design Science Research que guía la tesis.

La Tabla II sintetiza esta articulación, evidenciando que la relación entre el proyecto en ejecución y la tesis doctoral no es de subordinación sino de interdependencia productiva: dado que el primero provee el problema real, los datos y el contexto clínico; mientras que la tesis doctoral provee el rigor matemático, la solidez metodológica y las herramientas de transferencia que hacen que los resultados a obtener sean técnicamente válidos, clínicamente coherentes y socialmente responsables.

TABLA I1. COMPARACIÓN DE ENFOQUES EXISTENTES FRENTE A LA PROPUESTA DOCTORAL

Objetivo VITALIA	***Descripción VITALIA***	***Aporte Tesis Doctoral***	***Beneficio para la Comunidad***
OE1 Construir dataset robusto y representativo	Integración y armonización de datos clínicos, funcionales, sociales y ambientales de personas mayores de Nariño, Cauca y Valle del Cauca	Modelo de mitigación de desbalanceo que certifica la representatividad estructural del dataset mediante K-Condition Number y métricas de continuidad estructural, antes del entrenamiento	Busca que los datos recolectados en los centros geriátricos aliados sean matemáticamente confiables para la predicción clínica, evitando que eventos de alta relevancia como caídas o fragilidad queden invisibles para el modelo
OE2 Identificar variables críticas multidimensionales	Selección y validación con expertos en geriatría, salud pública y disciplinas afines de las variables predictoras de discapacidad	Análisis comparativo de importancia de variables mediante SHAP y LIME antes y después del preprocesamiento, logrando que la jerarquía clínica de los predictores se preserve a lo largo del pipeline de datos	Buscar que las decisiones del modelo reflejen el conocimiento geriátrico experto y no artefactos del preprocesamiento, fortaleciendo la confianza del personal de salud en las predicciones
OE3 Diseñar modelos predictivos de IA ajustados al contexto regional	Desarrollo y validación de algoritmos capaces de anticipar discapacidad, fragilidad y eventos adversos en la población mayor del Pacífico colombiano	Refinamiento estructural basado en ENN y Manifold Alignment que entrega al pipeline de modelado datos de mayor calidad intrínseca, mejorando MCC, AUC-PR y coherencia clínica de las predicciones	Permitirá detectar con mayor precisión eventos clínicos de baja frecuencia pero alto impacto en personas mayores del suroccidente colombiano, contribuyendo a una atención preventiva y personalizada
OE4 Validar modelos en entornos reales de atención	Implementación piloto en Fundación San José (Pasto), Fundación Años Maravillosos (Popayán) y	Análisis de robustez y equidad algorítmica (fairness) mediante Demographic	Buscar que el modelo no discrimine sistemáticamente a subgrupos vulnerables de

Objetivo VITALIA	*Descripción VITALIA*	*Aporte Tesis Doctoral*	*Beneficio para la Comunidad*
	Fundación Cottolengo (Cali), con evaluación iterativa del desempeño clínico y operativo	Parity, Equal Opportunity y Equalized Odds por subgrupos demográficos, detectando y corrigiendo sesgos antes de la implementación	la región por edad, género o condición socioeconómica, cumpliendo los criterios éticos y clínicos indispensables para su adopción institucional
OE5 Promover apropiación social, transferencia y escalabilidad	Publicaciones, eventos científicos, talleres interdisciplinarios y documentación técnica abierta para instituciones del sector salud y la comunidad	Transferir las herramientas metodológicas del pipeline al equipo VITALIA, a los profesionales de salud aliados y a la comunidad académica	Construye capacidad técnica local en geriatría predictiva, democratiza el acceso a herramientas de IA explicable en salud, y aporta a la infraestructura científica abierta de Colombia y América Latina

IV. Propuesta Metodológica: Refinamiento Estructural del Dataset

A. *Paradigma Design Science Research (DSR)*

La investigación doctoral ha adoptado el paradigma Design Science Research (DSR) (Hevner et al., 2004; López-Villanueva et al., 2025) como marco metodológico. DSR constituye una estructura para la creación y evaluación de artefactos innovadores, en este caso, un modelo de preprocesamiento formal, que propende por resolver problemas reales en contextos científicos y aplicados. Sus seis fases se alinean directamente con los objetivos de la investigación doctoral en desarrollo:

- Identificación del problema y motivación (OE1): Diagnóstico del MMC en datos geriátricos.
- Definición de objetivos para la solución (OE1–OE2): Análisis de técnicas existentes y sus limitaciones.
- Diseño y desarrollo (OE2–OE3): Diseño del modelo de preprocesamiento basado en refinamiento estructural.
- Demostración (OE3): Implementación computacional y aplicación preliminar.
- Evaluación (OE4): Comparación cuantitativa con métodos existentes y pruebas de robustez.
- Comunicación: Publicaciones, ponencias y transferencia de conocimiento.

B. *Tesis Doctoral: Curaduría Topológica del Preprocesamiento:*

La investigación propuesta en la tesis Doctoral, busca transformar el preprocesamiento de datos en una etapa de curaduría topológica. En lugar de generar datos sintéticos para satisfacer al algoritmo, se propone corregir las distorsiones estructurales introducidas por procesos de preprocesamiento inadecuados. El modelo se propone operar en tres niveles:

1. *Normalización Robusta*: Se aplicará normalización basada en estadísticas resistentes a valores atípicos (rango intercuartílico) para buscar que la dispersión de la clase minoritaria no se pierda durante el escalamiento. Esto es crítico en datos geriátricos donde los outliers frecuentemente representan patologías reales, no errores de medición.
2. *Reducción de Dimensionalidad Preservadora de la Estructura*: El análisis mediante técnicas como SVD/PCA y t-SNE/UMAP, en los avances preliminares ha permitido identificar que los componentes menores que habitualmente se descartan como ruido pueden contener señal relevante para la clase minoritaria. Por lo anterior, la propuesta busca incorporar un protocolo de evaluación de los componentes antes de cualquier reducción, utilizando el K-Condition Number como métrica de estabilidad y el test de Kolmogorov-Smirnov para verificar la preservación distribucional.
3. *Refinamiento por Limpieza de Vecindad y Manifold Alignment*: En lugar de generar datos sintéticos ruidosos, el modelo propuesto busca utilizar Edited Nearest Neighbors (ENN) para eliminar instancias ambiguas de la clase mayoritaria que contaminan las fronteras de decisión, y Manifold Alignment para preservar la geometría local de la clase minoritaria durante el rebalanceo. Este enfoque propende para que los eventos clínicos de baja frecuencia sean matemáticamente representativos sin distorsionar la distribución real.

C. *Métricas de evaluación:*

Dado que la propuesta doctoral se ha diseñado para que actúe en el preprocesamiento y no en el modelo final, las métricas de evaluación que se ha planeado utilizar son de naturaleza intrínseca y extrínseca:

- Métricas intrínsecas de estabilidad estructural: K-Condition Number, Silhouette Score, test KS por variable.
- Métricas de clasificación en desbalanceo: MCC (Matthews Correlation Coefficient), AUC-PR (curva Precisión-Recall), F1-score, Cohen's Kappa
- Métricas de coherencia clínica: validación a priori de relaciones esperadas (mayor glucosa → mayor riesgo) usando SHAP y LIME
- Métricas de equidad algorítmica (fairness): Demographic Parity, Equal Opportunity, Equalized Odds por subgrupos demográficos

- Robustez: pruebas con inyección de ruido gaussiano y variación de ratios de desbalanceo (1:2 hasta 1:40)

V. Resultados Preliminares y Discusión

A. *Diagnóstico del Desbalanceo en el Contexto Geriátrico*

El análisis exploratorio realizado sobre datasets de referencia (Datos Sabe Colombia, entre otros) permite identificar que el uso de métodos convencionales de sobremuestreo como SMOTE alteran significativamente la jerarquía de importancia de las variables clínicas. Cuando se comparan los rankings de importancia de variables (Feature Importance) antes y después de aplicar SMOTE, se observan cambios sustanciales en el orden relativo de predictores importantes, lo que permite inferir que el preprocesamiento está modificando las relaciones estadísticas originales del dataset, es decir no simplemente está balanceando las clases.

Por otra parte, la proyección de datos sintéticos generados por SMOTE en el espacio PCA y t-SNE ha permitido identificar que una proporción significativa de las nuevas instancias generadas se ubica en regiones de frontera o en zonas no representativas de la distribución real de la clase minoritaria. El test de Kolmogorov-Smirnov aplicado variable por variable confirma diferencias distribucionales significativas ($p < 0.05$) en varias características clínicas después del sobremuestreo.

B. *Propiedades del Modelo de Refinamiento Estructural*

Con el desarrollo de la tesis doctoral se espera que al aplicar el enfoque de curaduría topológica se logre:

- Que el K-Condition Number reduzca significativamente respecto a SMOTE, indicando mayor estabilidad numérica;
- Que el Silhouette Score post-preprocesamiento mejore la separabilidad entre clases sin recurrir a interpolación sintética;
- Que la coherencia clínica (medida mediante SHAP y validación a priori) sea superior: las variables que el modelo identifique como predictoras se alineen mejor con el conocimiento médico experto en geriatría.

C. *Implicacones para VITALIA*

Si se aporta con lo anteriormente mencionado, traerá como implicaciones directas para VITALIA: un dataset geriátrico del Pacífico colombiano procesado con un modelo de refinamiento estructural que puede producir modelos predictivos con característica de:

- Detectar con mayor precisión los eventos de baja frecuencia pero alto impacto (fragilidad, discapacidad)
- Serán más equitativos con respecto a subgrupos demográficos (edad, género, etnia)
- Ofrecerán explicaciones clínicamente coherentes a los profesionales de salud en los centros geriátricos aliados, tales como la Fundación San José (Pasto), la Fundación Años Maravillosos (Popauyán) y la Fundación Cottolengo (Cali).

D. *Implicacones Éticas*

La integración responsable de IA en el monitoreo geriátrico exige un compromiso explícito con la justicia algorítmica. El proyecto VITALIA opera bajo la Resolución 8430 de 1993 (Colombia), la Ley 1581 de 2012 de Protección de Datos Personales, y los estándares internacionales GDPR, con aval ético de los comités de las entidades aliadas.

El modelo de preprocesamiento propuesto incorpora el análisis de fairness como componente metodológico central: se evalúa si el rebalanceo introduce disparidades en Demographic Parity, Equal Opportunity y Equalized Odds entre subgrupos por edad y otros factores demográficos relevantes. Esta dimensión ética es especialmente crítica en el contexto del Pacífico colombiano, donde la diversidad sociocultural y las brechas de acceso a servicios de salud hacen que un modelo sesgado pueda profundizar desigualdades estructurales en lugar de reducirlas.

Los principios bioéticos de autonomía, beneficencia, no maleficencia y justicia guían todas las fases del proyecto: desde el consentimiento informado en la recolección de datos primarios, hasta la anonimización, el acceso restringido y la comunicación transparente de hallazgos a participantes y autoridades.

VI. Conclusiones

Este trabajo ha presentado la articulación entre el proyecto VITALIA y la tesis doctoral en desarrollo, mostrando cómo el problema del Muestreo Mal Condicionado (MMC) en datos clínicos geriátricos constituye un obstáculo técnico central que compromete la validez de cualquier modelo predictivo de IA aplicado a la discapacidad en personas mayores.

La propuesta de curaduría topológica del preprocesamiento, basada en normalización robusta, reducción de dimensionalidad preservadora de la estructura, y refinamiento mediante ENN y Manifold Alignment, propende por ofrecer una alternativa fundamentada a los métodos convencionales de sobremuestreo.

Esta propuesta pretende mejorar las métricas de clasificación en contextos de desbalanceo severo, buscando preservar la coherencia clínica y la equidad algorítmica, condiciones fundamentales para que los modelos de IA sean útiles y confiables en entornos de atención geriátrica real.

Los trabajos que siguen en el desarrollo del proyecto VITALIA y la Tesis Doctoral son los siguiente:

- Aplicación del modelo sobre los datos primarios recogidos en los centros geriátricos aliados del proyecto VITALIA.
- Validación cruzada con datasets estructurados.
- Integración del preprocesamiento como componente del pipeline de decisión clínica en los centros de atención geriátrica de la región.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), la Universidad del Valle, la Fundación San

José de Pasto, la Fundación Años Maravillosos de Popayán y la Fundación Cottolengo de Cali por su compromiso institucional con el proyecto VITALIA. Se reconoce especialmente a las personas mayores y sus familias que participan en la investigación, cuya colaboración hace posible avanzar hacia una geriatría predictiva más equitativa y digna.

REFERENCES

[1] Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique. Journal of Artificial Intelligence Research, 16, 321–357. https://doi.org/10.1613/jair.953

[2] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2021). Adulto mayor en Colombia. Características generales. Gobierno de Colombia.

[3] Ghosh, K., Bellinger, C., Corizzo, R., Branco, P., Krawczyk, B., & Japkowicz, N. (2024). The class imbalance problem in deep learning. Machine Learning, 113(7), 4845–4901. https://doi.org/10.1007/s10994-022-06268-8

[4] Gholampour, S. (2024). Impact of nature of medical data on machine and deep learning for imbalanced datasets: clinical validity of SMOTE is questionable. Machine Learning and Knowledge Extraction, 6(2), 827–841

[5] He, H., Bai, Y., Garcia, E. A., & Li, S. (2008). ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning. IEEE IJCNN 2008, 1322–1328. https://doi.org/10.1109/IJCNN.2008.4633969

[6] Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. MIS Quarterly, 28(1), 75–105.

[7] Johnson, J. M., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). Survey on deep learning with class imbalance. Journal of Big Data, 6(1), 27. https://doi.org/10.1186/s40537-019-0192-5

[8] Koziarski, M. (2021). Imbalanced data preprocessing techniques utilizing local data characteristics [Tesis doctoral]. AGH University of Science and Technology. https://arxiv.org/abs/2111.14120

[9] Koziarski, M., & Woźniak, M. (2024). Local neighborhood encodings for imbalanced data classification. Machine Learning, 1–29. https://doi.org/10.1007/s10994-024-06521-2

[10] Krawczyk, B. (2016). Learning from imbalanced data: Open challenges and future directions. Progress in Artificial Intelligence, 5(4), 221–232. https://doi.org/10.1007/s13748-016-0094-0

[11] López-Villanueva, D., Palau, R., & Santiago, R. (2025). Analizando alternativas metodológicas para la investigación educativa: Design Science Research (DSR). UTE Teaching & Technology, (1), e4062.

[12] Lu, Y., Cheung, Y. M., & Tang, Y. Y. (2019). Bayes imbalance impact index: A measure of class imbalanced data for classification. IEEE TNNLS, 31(9), 3525–3539.

[13] Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. NeurIPS 2017, 30.

[14] Ministerio de Relaciones Exteriores de Colombia. (2022). Personas mayores. Asuntos sociales. Gobierno de Colombia.

[15] Rajkomar, A., Hardt, M., Howell, M. D., Corrado, G., & Chin, M. H. (2018). Ensuring fairness in machine learning to advance health equity. Annals of Internal Medicine, 169(12), 866–872.

[16] Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). "Why should I trust you?": Explaining the predictions of any classifier. KDD 2016, 1135–1144.

[17] Slówik, A. (2022). Out-of-distribution generalisation in machine learning [Tesis doctoral]. University of Cambridge. https://doi.org/10.17863/CAM.101537

[18] van der Maaten, L., & Hinton, G. (2008). Visualizing data using t-SNE. Journal of Machine Learning Research, 9, 2579–2605.

[19] World Health Organization. (2021). Decade of Healthy Ageing: Baseline report. WHO

Diseño y fabricación por extrusión de material de aletas porosas de zirconia para biorreactores de rotación/perfusión

Yamid Gonzalo Reyes Florez
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
ygreyesf@unal.edu.co

Carlos Alberto Narváez Tovar
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
canarvaezt@unal.edu.co

Alejandro Garcia Rodriguez
Facultad de Ingeniería
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
agarcia.r01@javeriana.edu.co

***Resumen*— Los biorreactores de rotación/perfusión requieren plataformas que combinen estabilidad estructural, paso de fluido e interacción biológica inicial. Las arquitecturas TPMS ofrecen alta conectividad y gran área superficial, mientras que la zirconia aporta estabilidad química y mecánica; sin embargo, sigue sin resolverse cómo integrar diseño arquitectónico, procesamiento por extrusión de material y biofuncionalización superficial en aletas porosas delgadas destinadas a estos sistemas. Este trabajo presenta una propuesta doctoral orientada al desarrollo de aletas porosas de zirconia fabricadas por extrusión de material, considerando el efecto del debinding y sinterizado sobre la arquitectura final y la incorporación de estrategias de funcionalización basadas en polidopamina y péptidos RGD. Se espera establecer una ruta de diseño y fabricación para plataformas reutilizables con potencial aplicación en entornos dinámicos de cultivo celular.**

Palabras clave—zirconia porosa, extrusión de material, TPMS, biofuncionalización superficial, biorreactores de rotación/perfusión.

I. Introducción

Los sistemas de cultivo celular dinámico han adquirido relevancia en bioingeniería e ingeniería de tejidos debido a que permiten reproducir condiciones más cercanas al entorno fisiológico que los cultivos estáticos convencionales. En particular, los biorreactores de perfusión favorecen el transporte convectivo de nutrientes, la remoción de metabolitos y una distribución más homogénea de las células dentro de estructuras tridimensionales, por lo que constituyen una alternativa de interés cuando se requiere mejorar la transferencia de masa en plataformas porosas [1].

En este contexto, las arquitecturas porosas tridimensionales cumplen un papel central, ya que el soporte no solo debe proporcionar superficie para la adhesión celular, sino también permitir el paso de fluido y conservar estabilidad estructural durante la operación. Entre las geometrías propuestas para andamios y plataformas porosas, las superficies mínimas triplemente periódicas, TPMS, han recibido atención por su continuidad geométrica, su alta relación superficie/volumen, su menor concentración de esfuerzos frente a retículas convencionales y su mayor permeabilidad potencial, características que las convierten en candidatas atractivas para sistemas donde coinciden requerimientos de flujo e interacción superficial [2].

De manera paralela, la zirconia representa un material de interés para este tipo de aplicaciones por su estabilidad química, resistencia mecánica, resistencia al desgaste y biocompatibilidad. Estas propiedades la hacen atractiva como sustrato estructural con potencial de reutilización. Sin embargo, la traducción de una geometría porosa diseñada a una pieza cerámica funcional no es directa. En manufactura aditiva por extrusión de material, la calidad final depende no solo del diseño CAD, sino también de la formulación del feedstock, la extrusión, el debinding y el sinterizado, etapas en las que pueden aparecer contracción, alabeo, defectos interlaminares, vacíos en intersecciones de trayectorias y pérdida de fidelidad geométrica [3], [4], [5], [6].

En zirconia fabricada por fused filament fabrication o rutas equivalentes de material extrusion, la literatura reciente ha mostrado que la selección del sistema ligante y de la estrategia de debinding es crítica para evitar defectos durante la remoción del binder y conservar la integridad del cuerpo verde [4], [6]. Asimismo, se ha reportado que variables como el espesor de capa, la estrategia de deposición, la acumulación térmica y la arquitectura del filamento influyen de manera importante sobre la densidad final, la rugosidad, la resistencia mecánica y la presencia de defectos característicos en piezas sinterizadas [3], [5], [6]. Por tanto, en componentes delgados y porosos, la arquitectura final no puede analizarse de forma separada del procesamiento.

A pesar de sus ventajas estructurales, la zirconia presenta una limitación importante para aplicaciones biofuncionales: su superficie es bioinerte y no promueve por sí misma una interacción eficiente con células y biomoléculas. Por esta razón, la ingeniería de superficies se vuelve necesaria si se busca que el sustrato no solo conserve estabilidad geométrica, sino que además ofrezca mejores condiciones para la adhesión biológica inicial. En este sentido, se han propuesto estrategias de biofuncionalización de zirconia basadas en polidopamina y biomoléculas de adhesión, así como modificaciones con proteínas como fibronectina, con resultados favorables en términos de respuesta celular inicial [7], [8].

Bajo este panorama, persiste un vacío en la articulación entre diseño arquitectónico TPMS, procesamiento cerámico por extrusión de material y biofuncionalización superficial de zirconia cuando el objetivo no es un andamio genérico, sino una aleta porosa delgada destinada a operar como plataforma

reutilizable en biorreactores de rotación/perfusión. En consecuencia, este trabajo presenta una propuesta de investigación doctoral orientada al desarrollo de aletas porosas de zirconia fabricadas por extrusión de material, planteando como problema central la relación entre arquitectura diseñada, arquitectura final tras el procesamiento térmico y capacidad de modificación superficial para su uso potencial en sistemas dinámicos de cultivo celular.

II. Planteamiento Del Problema

Los biorreactores de rotación/perfusión exigen plataformas que combinen tres condiciones simultáneas: estabilidad geométrica, capacidad de paso de fluido y posibilidad de interacción biológica inicial. El problema no es solo disponer de un material resistente o de una geometría porosa atractiva, sino desarrollar una plataforma que mantenga esas tres funciones dentro de un mismo sistema [1].

Las arquitecturas TPMS ofrecen ventajas geométricas para estructuras porosas, pero su desempeño potencial depende de que la geometría diseñada pueda conservarse después de la fabricación. En aletas delgadas de zirconia fabricadas por extrusión de material, esta condición sigue siendo incierta, ya que el debinding y el sinterizado pueden alterar la continuidad de la red porosa, la fidelidad dimensional y la funcionalidad de flujo [2].

A esta dificultad del proceso se suma una limitación del material: aunque la zirconia posee propiedades estructurales favorables, su superficie bioinerte restringe la interacción inicial con células y biomoléculas. Por ello, el desarrollo de la plataforma no puede resolverse únicamente desde el diseño geométrico ni desde la manufactura, sino que requiere incorporar también una estrategia de biofuncionalización superficial [7], [8].

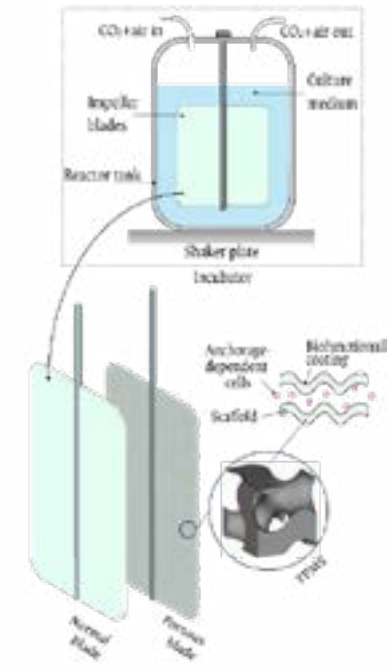


Fig. 1. Esquema conceptual de aletas porosas de zirconia basadas en arquitecturas TPMS como plataformas reutilizables en biorreactores de rotación/perfusión.

En consecuencia, el problema central de esta investigación consiste en establecer cómo integrar diseño arquitectónico tipo TPMS, procesamiento por extrusión de material y biofuncionalización superficial en aletas porosas delgadas de zirconia, de manera que la arquitectura final conserve funcionalidad estructural y de flujo y pueda emplearse como plataforma reutilizable en biorreactores de rotación/perfusión.

III. Pregunta De Investigación E Hipótesis

A. *Pregunta de investigación*

¿Cómo afectan la arquitectura porosa y el procesamiento por extrusión de material la integridad estructural final, la funcionalidad de flujo, la capacidad de biofuncionalización superficial y el desempeño potencial como plataforma reutilizable de aletas delgadas de zirconia destinadas a sistemas de biorreactores de rotación/perfusión?

B. *Hipótesis*

Si aletas porosas de zirconia basadas en arquitecturas TPMS son fabricadas mediante extrusión de material dentro de una ventana adecuada de procesamiento térmico, entonces podrán preservar una arquitectura funcional, permitir estrategias de biofuncionalización superficial y constituirse en plataformas reutilizables con potencial aplicación en sistemas de biorreactores de rotación/perfusión.

C. *Objetivo general*

Desarrollar aletas porosas de zirconia fabricadas por extrusión de material, estableciendo la relación entre diseño arquitectónico, procesamiento térmico y biofuncionalización superficial para su uso como plataformas reutilizables en sistemas de biorreactores de rotación/perfusión.

D. *Objetivos específicos*

- Diseñar aletas delgadas de zirconia con arquitecturas porosas basadas en TPMS, definiendo parámetros geométricos relacionados con porosidad, tortuosidad y capacidad de paso de fluido.
- Determinar el efecto del debinding y el sinterizado sobre el control geométrico y dimensional de aletas porosas de zirconia fabricadas por extrusión de material.
- Evaluar una estrategia de biofuncionalización superficial orientada a favorecer la adhesión inicial de células anclaje-dependientes sobre superficies de zirconia.

IV. Fundamento Teórico

A. *Arquitecturas porosas y TPMS*

Las arquitecturas porosas tridimensionales son un componente fundamental en el diseño de plataformas para cultivo celular y sistemas de transporte de masa, ya que la geometría del sustrato condiciona simultáneamente la superficie disponible para interacción celular, la interconectividad de la red porosa y la circulación interna de fluido [1], [2]. En este contexto, las superficies mínimas triplemente periódicas, TPMS, han recibido una atención creciente debido a que ofrecen continuidad geométrica, alta relación superficie/volumen,

menor concentración de esfuerzos y mayor permeabilidad potencial que muchas retículas convencionales [2].

Desde el punto de vista del diseño, las TPMS permiten construir estructuras tipo sheet mediante el engrosamiento de superficies implícitas periódicas, conservando una topología continua y una red porosa altamente conectada. Vijayavenkataraman et al. mostraron que, en superficies como Primitive, Gyroid y Diamond, variables como tamaño de celda, porosidad, tamaño de poro y espesor de pared pueden integrarse dentro de un esquema paramétrico de optimización orientado a requisitos funcionales específicos [2].

B. Extrusión de material cerámico

La manufactura aditiva por extrusión de material se ha consolidado como una de las rutas más prometedoras para la fabricación de cerámicas complejas, debido a su menor costo relativo, flexibilidad geométrica y compatibilidad con formulaciones termoplásticas altamente cargadas con polvo cerámico [4], [9]. En esta familia de procesos, el componente se conforma capa a capa a partir de un feedstock compuesto por partículas cerámicas y un sistema ligante, y posteriormente se somete a etapas de debinding y sinterizado para remover el binder y densificar la pieza [3], [4].

No obstante, la extrusión de material cerámico no depende únicamente del diseño CAD. Cano et al. mostraron que, para zirconia procesada por fused filament fabrication, el sistema ligante debe cumplir simultáneamente requisitos de homogeneidad, viscosidad, resistencia mecánica del filamento e idoneidad para el debinding, ya que ciclos térmicos prolongados pueden generar grietas y ampollas por atrapamiento de productos de pirólisis. En ese mismo trabajo, una formulación con zirconia y debinding intermedio por solvente permitió disolver 55.4 wt.% del binder y generar una porosidad interconectada de 29 vol.%, favoreciendo el debinding térmico posterior [4].

La literatura reciente también ha mostrado que variables como el tipo de feedstock, el espesor de capa, la estrategia de deposición y la acumulación térmica influyen de manera decisiva en la calidad final de la zirconia impresa. Shen et al. fabricaron zirconia por FDM con feedstock granular altamente cargado y reportaron defectos característicos en las uniones entre filamentos, así como una fuerte influencia de la acumulación térmica sobre la calidad superficial [3]. Huang et al. mostraron que la reducción del espesor de capa incrementa la densidad relativa y mejora propiedades mecánicas de zirconia extruida y sinterizada [5]. De forma complementaria, Guan et al. describieron defectos interlaminares y vacíos triangulares en trayectorias de FFF, además de obtener zirconia con densidad relativa de 99.1% y resistencia a flexión cercana a 493 MPa [6].

C. Zirconia como sustrato estructural reutilizable

La zirconia es una cerámica avanzada de interés por su estabilidad química, resistencia al desgaste, resistencia mecánica y buen desempeño en aplicaciones estructurales y biomédicas [5], [6]. Estas propiedades justifican su consideración como sustrato estructural para plataformas con potencial de reutilización.

Sin embargo, en arquitecturas porosas delgadas fabricadas por extrusión de material, su viabilidad no depende únicamente de las propiedades intrínsecas del material, sino de la capacidad de conservar una geometría funcional después del debinding y sinterizado. Por ello, en esta investigación la zirconia se asume como un sustrato estructural cuya pertinencia debe evaluarse en relación con el diseño arquitectónico y el procesamiento [3], [4], [5], [6].

D. Biofuncionalización superficial

Aunque la zirconia presenta biocompatibilidad general, su superficie bioinerte limita la adhesión inicial de células y biomoléculas [7], [8]. Por esto, la biofuncionalización superficial constituye un componente necesario cuando se busca emplearla como plataforma activa y no solo como soporte estructural.

Una de las estrategias más versátiles reportadas consiste en emplear polidopamina como capa intermedia reactiva. Yang et al. desarrollaron una ruta de biofuncionalización de zirconia mediante polidopamina y péptidos RGD, y mostraron que esta aproximación mejoró la adhesión, extensión y proliferación de fibroblastos gingivales humanos sobre zirconia, precisamente a partir de una superficie originalmente bioinerte [7]. Por otra parte, Aung et al. funcionalizaron zirconia con fibronectina y reportaron mejoras en bioactividad y respuesta osteogénica de células tipo osteoblasto, reforzando la idea de que la modificación superficial puede transformar la respuesta biológica inicial del material [8].

En esta investigación, la biofuncionalización no se plantea como una etapa accesoria, sino como parte del desarrollo integral de la plataforma, en la medida en que la funcionalidad final dependerá tanto de la arquitectura obtenida como de la respuesta superficial del sustrato [7], [8].

V. Metodología Propuesta

La Fig 2. resume el flujo metodológico propuesto para el desarrollo de aletas porosas de zirconia fabricadas por extrusión de material. La metodología integra las etapas de diseño arquitectónico, fabricación, procesamiento térmico, caracterización y biofuncionalización superficial, con el fin de evaluar la viabilidad de la plataforma para su uso en biorreactores de rotación/perfusión.



Fig. 2. Flujo metodológico propuesto para el desarrollo de aletas porosas de zirconia.

A. *Diseño arquitectónico*

La investigación se iniciará con el diseño paramétrico de aletas porosas de zirconia basadas en arquitecturas tipo TPMS, considerando su potencial para ofrecer continuidad geométrica, alta relación superficie/volumen y trayectorias internas de flujo. Esta etapa buscará definir configuraciones compatibles con una geometría delgada tipo aleta y, al mismo tiempo, con una red porosa continua susceptible de ser fabricada por extrusión de material. Para ello, se considerarán variables geométricas asociadas con porosidad, tamaño de celda, espesor de pared, tamaño de poro y tortuosidad, con el fin de establecer una ventana inicial de diseño que articule funcionalidad geométrica y factibilidad de manufactura [2].

La selección de las configuraciones TPMS no se orientará únicamente por criterios formales, sino por su relación con el paso de fluido y con la preservación de una arquitectura funcional después del procesamiento cerámico. En este sentido, el diseño se planteará como una etapa de definición de parámetros de entrada para la fabricación, más que como una simple generación de geometrías. Este enfoque es coherente con estudios previos en andamios TPMS y con la lógica de diseño planteada en la propuesta doctoral, donde la arquitectura constituye el primer eje de integración entre geometría, procesamiento y funcionalidad [2].

B. *Fabricación por extrusión de material*

Una vez definidas las geometrías preliminares, se propondrá la fabricación de prototipos mediante extrusión de material cerámico. Esta etapa contemplará el uso de feedstocks basados en zirconia y sistemas ligantes compatibles con el conformado capa a capa, siguiendo como referencia la literatura reciente en zirconia fabricada por fused filament fabrication, material extrusion con feedstock granular y zirconia recubierta con binder [3], [4], [5], [6].

La fabricación incluirá tres momentos principales: conformado del cuerpo verde, debinding y sinterizado. En el primero, se buscará establecer parámetros de extrusión e impresión compatibles con la estabilidad del filamento o del feedstock, la calidad de deposición y la conservación de los detalles geométricos de la aleta porosa. En el segundo, se analizará la remoción del binder mediante rutas térmicas o combinadas con debinding por solvente, teniendo en cuenta que esta etapa resulta crítica en zirconia procesada por FFF, debido al riesgo de grietas, ampollas, deformación y pérdida de integridad geométrica [3], [4]. Finalmente, el sinterizado se considerará como la etapa responsable de la densificación y de la consolidación final de la pieza, pero también como una fuente potencial de contracción, alabeo y modificación de la arquitectura abierta [3], [4], [5], [6].

El objetivo metodológico de esta fase no será únicamente obtener piezas impresas, sino establecer la relación entre los parámetros de fabricación y la conservación de la arquitectura diseñada. En consecuencia, la fabricación se entenderá como una etapa de validación de manufacturabilidad, orientada a identificar una ventana de proceso viable para aletas porosas de zirconia delgadas.

C. *Caracterización geométrica y estructural*

La tercera etapa de la metodología se orientará a la caracterización de las estructuras obtenidas después del procesamiento térmico. Esta fase buscará comparar la arquitectura diseñada con la arquitectura final, con énfasis en variables como fidelidad geométrica, contracción, alabeo, continuidad de la red porosa, porosidad abierta y defectos asociados a la deposición y al sinterizado. La necesidad de esta etapa se sustenta en que la literatura sobre zirconia por material extrusion ha mostrado la aparición de defectos interlaminares, vacíos triangulares en intersecciones de trayectorias, acumulación térmica local y modificaciones de la geometría final que afectan de manera directa el desempeño del componente [5].

Además de la caracterización geométrica y microestructural, se plantea una evaluación funcional preliminar de la arquitectura porosa en términos de su aptitud para permitir el paso de fluido a través de la aleta. Dado que el objetivo final es el uso en biorreactores de rotación/perfusión, esta fase buscará determinar si la arquitectura fabricada conserva las trayectorias internas y la conectividad necesarias para un comportamiento compatible con sistemas dinámicos. En esta investigación, la funcionalidad de flujo no se presentará como un resultado ya demostrado, sino como un criterio de evaluación previsto dentro de la ruta metodológica.

D. *Biofuncionalización superficial y evaluación preliminar*

La etapa final de la metodología se enfocará en la modificación superficial de las estructuras de zirconia con el fin de superar la bioinercia del material y favorecer la interacción inicial con células anclaje-dependientes. Como ruta de trabajo se propone una estrategia de biofuncionalización basada en polidopamina y biomoléculas de adhesión, particularmente péptidos RGD, teniendo en cuenta que este enfoque ha mostrado capacidad para mejorar la adhesión, extensión y proliferación celular sobre zirconia [7]. De manera complementaria, estudios con proteínas como fibronectina también respaldan la pertinencia de incorporar tratamientos superficiales sobre zirconia cuando se busca mejorar la bioactividad inicial del sustrato [8].

En esta investigación, la biofuncionalización se plantea como una fase integrada al desarrollo de la plataforma y no como una etapa independiente del diseño y la fabricación. Por ello, la evaluación biológica preliminar se orientará a verificar la adhesión celular inicial como criterio de factibilidad del concepto de plataforma reutilizable. Dado el estado actual del proyecto, esta fase se presenta como parte de la metodología propuesta y no como una validación experimental ya realizada. Su función dentro del manuscrito es mostrar de manera explícita que la plataforma final deberá articular estabilidad estructural, funcionalidad geométrica y actividad superficial dentro de una misma ruta de investigación.

TABLE I. VARIABLES DE DISEÑO, FABRICACIÓN Y EVALUACIÓN CONSIDERADAS EN LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

Categoría	Variables consideradas	Propósito dentro del estudio
Diseño arquitectónico (TPMS)	Tipo de superficie TPMS (Gyroid, Diamond, Primitive), tamaño de celda, porosidad global, espesor de pared, tortuosidad	Definir arquitecturas porosas continuas compatibles con geometría tipo aleta y favorecer el paso de fluido y la extensión superficial
Geometría de la aleta	Espesor global, relación longitud/espesor, orientación de la arquitectura	Adaptar arquitecturas TPMS a componentes delgados con estabilidad geométrica en operación dinámica
Fabricación por extrusión de material	Tipo de feedstock, espesor de capa, estrategia de deposición, orientación de impresión	Evaluar la manufacturabilidad de aletas porosas y su influencia sobre la fidelidad geométrica inicial
Debinding	Ruta térmica, debinding por solvente (si aplica), velocidad de calentamiento	Minimizar defectos asociados a la remoción del binder y preservar la continuidad de la red porosa
Sinterizado	Temperatura máxima, tiempo de sostenimiento, tasa de calentamiento/enfriamiento	Controlar la densificación, contracción y estabilidad dimensional de las aletas porosas
Caracterización geométrica	Contracción dimensional, fidelidad geométrica, porosidad abierta, continuidad de poros	Comparar arquitectura diseñada y arquitectura final tras el procesamiento térmico
Evaluación funcional preliminar	Conectividad porosa, aptitud para paso de fluido	Verificar compatibilidad de la arquitectura final con sistemas de rotación/perfusión
Biofuncionalización superficial	Polidopamina, péptidos RGD, proteínas de adhesión	Superar la bioinercia de la zirconia y favorecer la adhesión celular inicial
Evaluación biológica preliminar	Adhesión celular inicial	Explorar la factibilidad del concepto de plataforma biofuncional reutilizable

VI. CONTRIBUCIONES ESPERADAS Y ALCANCE

La principal contribución esperada de esta investigación consiste en integrar, dentro de una misma ruta de desarrollo, el diseño arquitectónico de estructuras porosas tipo TPMS, la manufactura aditiva cerámica por extrusión de material y la biofuncionalización superficial orientada a aplicaciones en biorreactores de rotación/perfusión. Esta integración busca superar una visión fragmentada del problema, en la cual la geometría, el procesamiento y la funcionalidad superficial son abordados de forma aislada.

Se espera que el trabajo contribuya a establecer criterios de diseño y fabricación para aletas porosas de zirconia delgadas, identificar los principales efectos del procesamiento térmico sobre su arquitectura final y proponer una estrategia de modificación superficial compatible con la naturaleza reutilizable del sustrato. En este sentido, el alcance del estudio no se limita a la fabricación de una geometría específica, sino a la formulación de una ruta metodológica transferible para el desarrollo de plataformas cerámicas porosas destinadas a entornos dinámicos de cultivo celular.

El trabajo se presenta en esta etapa como una propuesta doctoral en desarrollo. Por tanto, el alcance actual se centra en la formulación del problema, la definición de la hipótesis, la justificación técnica y el planteamiento de la metodología, más que en la presentación de resultados experimentales concluidos. Esta delimitación es importante para mantener coherencia entre el estado real de la investigación y los aportes que se esperan obtener en las fases posteriores del proyecto.

VII. CONCLUSIONES

Este manuscrito presenta una propuesta de investigación doctoral orientada al desarrollo de aletas porosas de zirconia fabricadas por extrusión de material para su aplicación en biorreactores de rotación/perfusión. El planteamiento parte de la necesidad de disponer de plataformas sólidas, porosas y potencialmente reutilizables que integren funcionalidad de flujo, estabilidad geométrica y posibilidad de modificación biológica.

La investigación propuesta articula tres componentes principales: el diseño arquitectónico de estructuras TPMS, el procesamiento cerámico por manufactura aditiva y la biofuncionalización superficial de zirconia. La hipótesis central plantea que, bajo una ventana adecuada de diseño y procesamiento, estas aletas porosas podrían preservar una arquitectura funcional y constituirse en plataformas con potencial de uso en sistemas dinámicos de cultivo celular.

En consecuencia, el valor de este trabajo en su estado actual radica en estructurar una ruta de investigación técnicamente coherente para abordar un problema interdisciplinario que involucra ciencia de materiales, manufactura aditiva e ingeniería de superficies. Las etapas posteriores del proyecto estarán dirigidas a la validación experimental de los supuestos aquí formulados y a la consolidación de una ventana viable de diseño y fabricación.

REFERENCES

[1] D. A. Gaspar, V. Gomide, y F. J. Monteiro, “The role of perfusion bioreactors in bone tissue engineering.”, *Biomatter*, vol. 2, núm. 4, pp. 167–175, 2012, doi: 10.4161/BIOM.22170.

[2] S. Vijayavenkataraman, L. Zhang, S. Zhang, J. Y. H. Fuh, y W. F. Lu, “Triply Periodic Minimal Surfaces Sheet Scaffolds for Tissue Engineering Applications: An Optimization Approach toward Biomimetic Scaffold Design”, *ACS Appl. Bio Mater.*, vol. 1, núm. 2, pp. 259–269, ago. 2018, doi: 10.1021/ACSABM.8B00052.

[3] T. Shen, H. Xiong, Z. Li, L. Zhang, y K. Zhou, “Fused deposition fabrication of high-quality zirconia ceramics using granular feedstock”, *Ceram. Int.*, vol. 47, núm. 24, pp. 34352–34360, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.348.

[4] S. Cano *et al.*, “Additive manufacturing of zirconia parts by fused filament fabrication and solvent debinding: Selection of binder formulation”, *Addit.*

Manuf., vol. 26, pp. 117–128, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.01.001.

[5] R. Huang *et al.*, "Material extrusion and sintering of binder-coated zirconia: Comprehensive characterizations", *Addit. Manuf.*, vol. 45, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102073.

[6] Z. Guan, X. Yang, P. Liu, X. Xu, Y. Li, y X. Yang, "Additive manufacturing of zirconia ceramic by fused filament fabrication", *Ceram. Int.*, vol. 49, núm. 17, pp. 27742–27749, 2023, doi: 10.1016/j.ceramint.2023.05.230.

[7] Z. Yang *et al.*, "Biofunctionalization of zirconia with cell-adhesion peptides via polydopamine crosslinking for soft tissue engineering: effects on the biological behaviors of human gingival fibroblasts and oral bacteria", *RSC Adv.*, vol. 10, núm. 11, pp. 6200–6212, feb. 2020, doi: 10.1039/C9RA08575K.

[8] L. M. Aung *et al.*, "Functionalization of zirconia ceramic with fibronectin proteins enhanced bioactivity and osteogenic response of osteoblast-like cells", *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/FBIOE.2023.1159639.

[9] R. Spina y L. Morfini, "Material Extrusion Additive Manufacturing of Ceramics: A Review on Filament-Based Process", *Materials 2024, Vol. 17, Page 2779*, vol. 17, núm. 11, jun. 2024, doi: 10.3390/ma17112779.

Influencia del polvo de residuo cerámico (PRC) en las propiedades de un suelo expansivo

Lesly Nathalie López Valiente
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC)
Grupo de Investigación en Ingenieria Sismica y amenazas Geombientales GIISAG
Tunja, Boyaca
https://orcid.org/0000-0001-6551-4756

Carlos Javier Sainea Vargas
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC)
Grupo de Investigación en Ingenieria Sismica y amenazas Geombientales GIISAG
Tunja, Boyaca
https://orcid.org/0000-0001-5434-0746

Yaneth Pineda Triana
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC)
Grupo de investigación en integridad y evaluación de materiales (GIEM)
Tunja, Boyaca
https://orcid.org/0000-0002-5561-9412

Resumen—Los suelos expansivos en Ingeniería Civil representan una problemática importante debido a los cambios volumétricos que experimentan ante variaciones en el contenido de humedad, generando daños en estructuras y obras de infraestructura.

En este contexto, el uso de residuos de materiales de construcción como alternativa de estabilización se ha convertido en una opción sostenible y de interés investigativo.

El presente estudio evalúa la eficiencia de la incorporación de polvo de residuo cerámico (PRC) en las propiedades índice de un suelo fino con alto potencial de expansión. La investigación corresponde a la segunda fase de un proyecto experimental compuesto por cuatro etapas, orientado al análisis del comportamiento físico y mecánico de mezclas suelo–PRC, en la fase que presenta en este documento se realizaron ensayos de caracterización física y granulométrica sobre el suelo natural y mezclas con diferentes contenidos de PRC.

Los resultados evidencian una disminución progresiva del límite líquido y del índice de plasticidad conforme aumenta el porcentaje de PRC, así como modificaciones en la distribución granulométrica del material. Estos cambios indican una mejora en la estabilidad del suelo y una reducción de su potencial expansivo. Los hallazgos preliminares permiten concluir que el PRC presenta un comportamiento favorable como agente estabilizante, constituyéndose en una alternativa técnica y ambientalmente viable para el mejoramiento de suelos expansivos.

Palabras clave—Suelo expansivo, polvo de residuo cerámico, propiedades índices, limite líquido, distribución granulométrica, materiales sostenibles.

I. INTRODUCCIÓN

El comportamiento del suelo es un factor determinante en la estabilidad y durabilidad de las estructuras, en especial los suelos expansivos presentan un desafío crítico en ingeniería civil, pues su tendencia al cambio volumétrico al variar su contenido de agua, condición que genera asentamientos diferenciales y daños estructurales en edificaciones y obras civiles. En Colombia, el crecimiento urbano exige cada vez más terrenos aptos para la construcción, lo cual ha llevado a la exploración de técnicas de mejoramiento de suelos que reduzcan los costos y los impactos ambientales.

Este proyecto tiene como objetivo evaluar la eficiencia de la incorporación de polvo de residuo cerámico (PRC) en las propiedades índice de un suelo fino con potencial de expansión alto, resultados obtenidos dentro de la fase 2 de 4 del proyecto en general. El PRC, compuesto principalmente de carbonatos y silicatos derivados de arcillas y feldespatos, se presenta como una opción innovadora y sostenible para mejorar las propiedades del suelo, en especial sus propiedades índices, capacidad portante y su reducción al cambio volumétrico. Aunque investigaciones internacionales han demostrado la efectividad del PRC en suelos similares, pero en las mismas no se cuenta con registros en la literatura de la granulometría del PRC ni este enfoque se ha explorado a nivel nacional ni local.

Los suelos expansivos generan una problemática mundial ocasionando alrededor de 9.000 millones de dólares anuales de pérdidas estructurales, lo que se considera mayor a los daños ocasionados por fenómenos naturales [1]. Es por esto que el estudio de suelos expansivos impone retos ingenieriles, ya que han sido responsables de daños en pequeñas y grandes obras civiles. La revisión de la información permitió establecer que los suelos con estas características, al experimentar cambios en el contenido del agua, generan en las cimentaciones asentamientos diferenciales, en los muros de contención, relajamiento de esfuerzo y empujes que generan daños importantes. Esto sucede usualmente en puentes y demás estructuras rígidas provocando un agrietamiento y falla de los materiales que las componen (concreto reforzado) .[2]

Diversos estudios han señalado que la estabilización de estos suelos mediante residuos industriales y materiales reciclados constituye una alternativa sostenible y técnicamente viable para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.[3]. En este contexto, se plantea el uso de polvo de residuo cerámico (PRC)

como material estabilizante, considerando su potencial para modificar el comportamiento del suelo expansivo y reducir su susceptibilidad a la expansión. [4]

La metodología desarrollada comprende la caracterización física y granulométrica del suelo natural y del PRC, así como la evaluación de mezclas con diferentes porcentajes de adición de residuo cerámico. Entre las variables analizadas se incluyen el límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, distribución granulométrica y potencial de expansión, parámetros ampliamente utilizados para determinar el comportamiento geotécnico de suelos expansivos. Este enfoque metodológico permite analizar la influencia del contenido de PRC sobre las propiedades del suelo y establecer su viabilidad como alternativa de mejoramiento, con base en antecedentes reportados en la literatura especializada.

II. MATERIALES Y METODOLOGIA

A. Tipo de suelo

El suelo objeto de estudio corresponde a un suelo limoso de alta plasticidad MH, suelo clasificado como expansivo, con un porcentaje de expansión del 60% de acuerdo al ensayo de expansión libre en probeta. El suelo se extrajo de la ciudad de Tunja perteneciente a la formación Bogotá, se obtuvo mediante la realización de perforación directa tipo apique, de los ensayos de límites de Atterberg se tiene un límite liquido de 102,70 % y limite plásticos de 58,52%.

B. Material estabilizante (Polvo de residuo ceramico PRC)

El polvo de residuo cerámico (PRC) fue extraído de la ladrillera la Cascada ubicada en la ciudad de Tunja, material que está compuesto por carbonatos y silicatos, compuestos que buscan mejorar la resistencia y reducir la plasticidad del suelo expansivo.

Las investigaciones sobre el PRC sugieren que puede ser una alternativa eficaz y ambientalmente sostenible, contribuyendo también a la reducción de desechos industriales. Sin embargo, la efectividad del PRC en suelos locales, como los presentes en Colombia, no ha sido ampliamente investigada.

C. Ensayos realizados

Durante la fase en estudio se realizaron ensayos de caracterización del suelo, citados en la tabla 1.

TABLA 1. ENSAYOS REALIZADOS

Tipo de ensayo	Norma	Objetivo
Granulometría	ASTM D7928 / D6913	Para determinar la distribución de partículas en el suelo por medio de hidrómetro y el PRC por medio de tamizado.
Límites de Atterberg	ASTM D4318	Para clasificar el suelo y determinar su plasticidad.
Densidad de partículas	ASTM D854	Para conocer la densidad relativa del suelo.

D. Dosificaciones

Para está etapa el número de réplicas se analizó utilizando el método basado en la varianza, con un nivel de confianza, desviación estándar y diferencia mínima deseada analizada de acuerdo con la revisión del estado del arte de literatura reciente que reflejan datos experimentales, con este procedimiento se determinó un número total de tres (3) replicas por cada dosificación de PRC.

La preparación de mezclas de suelo natural + PRC se realizó en diferentes proporciones. Mezclas con incrementos del 10% de PRC en peso del suelo hasta un 50% de PRC más suelo.

III. RESULTADOS

A. Definición de variales

Los límites de Atterberg y la gravedad específica constituyen variables dependientes relevantes para analizar el comportamiento de suelos expansivos tratados con polvo de residuo cerámico (PRC), debido a su relación con las características mineralógicas, la interacción agua-suelo y la susceptibilidad al cambio volumétrico. En particular, parámetros como el límite líquido y límite plástico son ampliamente utilizados como indicadores indirectos del potencial expansivo de los suelos finos, ya que valores elevados de plasticidad suelen asociarse con una mayor capacidad de absorción de agua y, en consecuencia, con mayores deformaciones volumétricas.

Los parámetros antes mencionados permiten evaluar de manera indirecta la influencia del PRC sobre el comportamiento expansivo del suelo, constituyéndose en indicadores geotécnicos útiles para analizar el efecto del

tratamiento y la posible mejora de las propiedades físicas del material.

B. Granulometria

Con el fin de determinar la variación granulométrica del suelo objeto de estudio y de las diferentes mezclas elaboradas, se realizó el ensayo de hidrómetro, obteniéndose los resultados presentados en la Fig. 1.

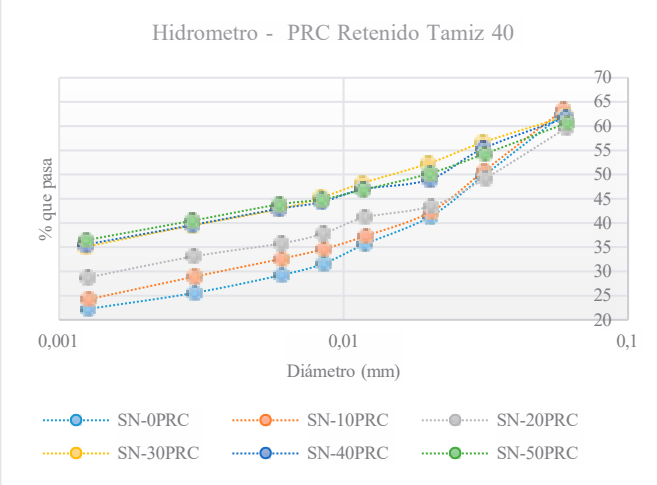


Figura 1. Curva granulometría suelos natural, suelo + % de PRC retenido tamiz 40.

En la fig. 1 los resultados muestran que la incorporación de material retenido (PRC) en el tamiz 40 genera un incremento progresivo en el porcentaje que pasa para todos los diámetros de partículas analizados, donde la fracción de arcilla asciende desde un 22% en el suelo natural hasta un 36% en la mezcla al 50%, (SN-50PRC). A lo largo del rango de limos, se observa un desplazamiento ascendente de las curvas que mantiene una tendencia paralela, alcanzando una convergencia en el extremo superior del ensayo, donde todas las muestras se estabilizan en un rango entre el 60% y 64%.

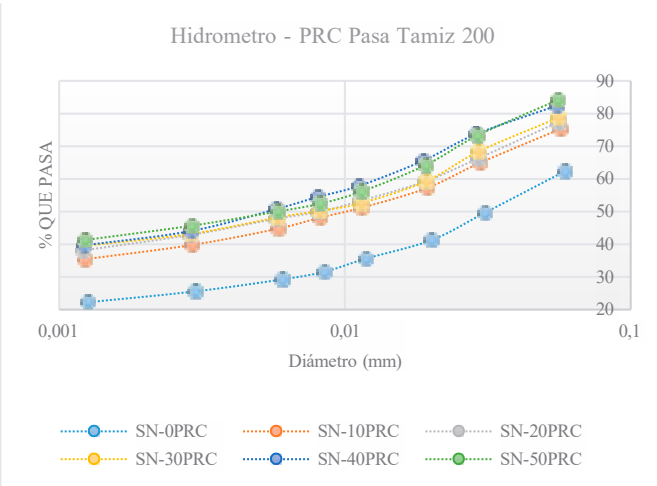


Figura 2. Curva granulometría suelo + % de PRC pasa tamiz 200.

En la fig. 2 los resultados reflejan un aumento proporcional elevando el contenido de partículas de tamaño arcilla de un 22% a un 41% en la dosificación más alta. A diferencia de la primera serie, no existe una convergencia en los diámetros mayores, sino que el porcentaje que pasa por el tamiz No. 200 se dispara significativamente, escalando del 62% original hasta un 84% para la mezcla al 50%. Este comportamiento evidencia que la adición de material que pasa el tamiz 200 altera profundamente la gradación del suelo, incrementando la densidad de partículas finas de manera más severa que la adición de retenido No. 40.

Se presenta en la tabla 2, la nomenclatura utilizada para cada mezcla

TABLA 2. Codificación

No. De mezcla	Observación
SN-0PRC	Suelo natural
SN-10PRC	Suelo natural + 10% de PRC
SN-20PRC	Suelo natural + 20% de PRC
SN-30PRC	Suelo natural + 30% de PRC
SN-40PRC	Suelo natural + 40% de PRC
SN-50PRC	Suelo natural + 50% de PRC
PRC-R40	PRC retenido tamiz 40
PRC-P200	PRC pasa tamiz 200

De acuerdo a lo observado en la fig.3 el suelo en su estado natural (SN) inicia con un LL elevado de 103%, indicativo de una alta plasticidad. Al llegar a la mezcla SN-50PRC el valor desciende apreciablemente hasta un 64%.

Se observa que la adición de material que Pasa el Tamiz No. 200 (puntos grises) genera una reducción del límite líquido ligeramente más acentuada en las fases iniciales en comparación con el material Retenido en Tamiz No. 40 (puntos azules), aunque ambos convergen hacia el final del tratamiento.

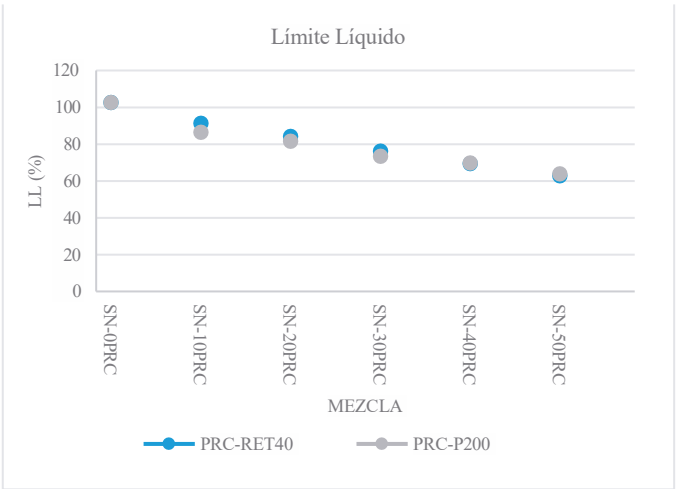


Figura 3. Limite Liquido

En la fig. 4. El valor del límite de contracción asciende desde un 19.5% en el estado natural hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 29.8% en la mezcla de suelo natural más 50 % de PRC. Este incremento es favorable, ya que un límite de contracción más alto indica que el suelo requiere perder menos agua para dejar de contraerse, lo que reduce su potencial de agrietamiento.

Ambas series de datos se mantienen prácticamente con un comportamiento similar durante todo el ensayo, lo que demuestra que tanto el material retenido como el pasante influyen de manera semejante en la reducción de los cambios volumétricos por pérdida de humedad.

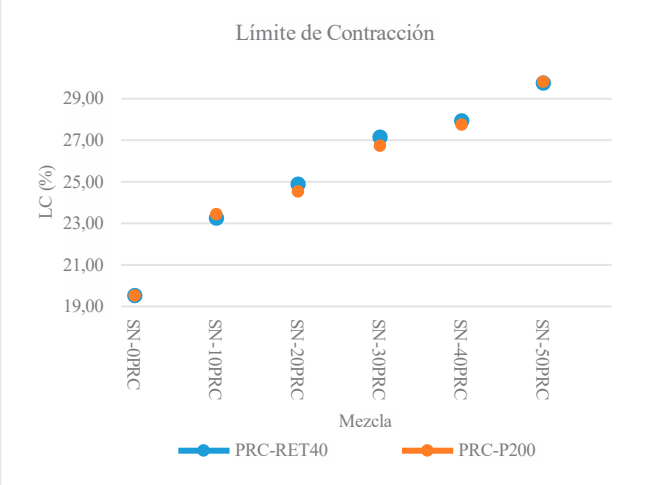


Figura 4. Límite de contracción

En la fig. 5 se tiene divergencia notable en los puntos intermedios de la gráfica (específicamente en las mezclas SN-30PRC y SN-40PRC). El material Retenido en el Tamiz No. 40 provoca una caída más pronunciada del LP (43% en la mezcla SN-40PRC) en comparación con el material que Pasa el Tamiz No. 200 (45.5%).

Esto indica que el material más grueso (Retenido No. 40) es más efectivo para reducir el rango plástico del suelo de manera acelerada antes de llegar a la saturación de la mezcla.

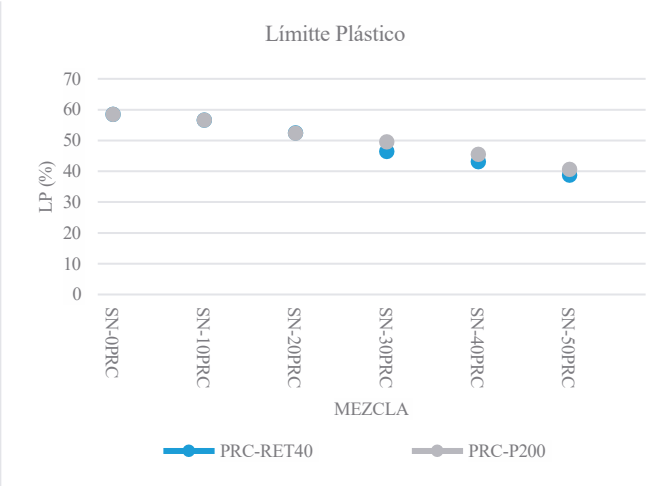


Figura 5. Límite de plástico

Para la fig.6 el suelo en su estado natural presenta una gravedad específica inicial de 2.81, lo cual es característico de suelos con presencia de minerales pesados o arcillas de alta densidad.

Para la mezcla de suelo con PRC retenido en tamiz 40 la adición de este material genera una reducción gradual y más estable de la densidad de los sólidos.

A partir de la mezcla SN-30PRC, se observa una divergencia clara entre ambos materiales. El PRC que pasa el Tamiz No. 200 reduce la gravedad específica de forma más drástica que el material retenido en el Tamiz No. 40, lo que sugiere que el material fino adicionado tiene una densidad de partículas intrínsecamente menor que la fracción gruesa.

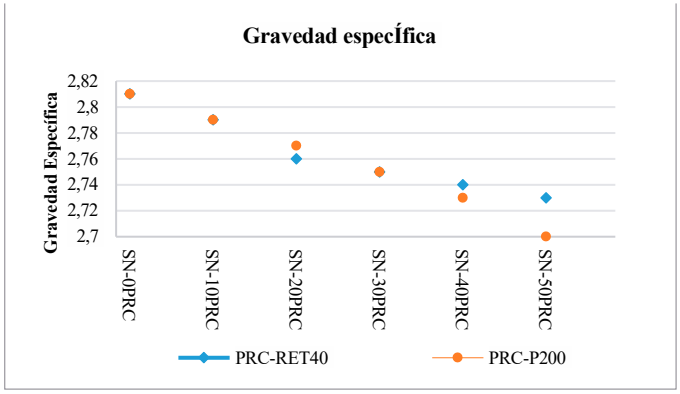


Figura 6. Gravedad especifica.

.

IV. ANALISIS DE RESULTADOS

En cuanto a la condición granulométrica al incorporar PRC Retenido No. 40, se está creando una estructura más equilibrada; las arenas funcionan como un soporte que reduce la presencia de las arcillas. En cambio, con el Pasa No. 200, se está saturando la matriz con limos, condición que aumenta la superficie específica de la mezcla, lo que significa que habrá mucha más área de contacto entre partículas pequeñas, incrementando la sensibilidad del suelo ante la presencia de humedad.

La caída drástica del límite líquido indica que el PRC adicionado está modificando la actividad de esas arcillas. Ya que se está reemplazando partículas que interactúan mayor con el agua por partículas de minerales más inertes. El resultado técnico es un suelo mucho más estable.

El aumento del límite de contracción del 19% al 30% es una mejora del suelo, ya que un suelo con límite de contracción bajo presenta mayor susceptibilidad a experimentar cambios volumétricos, en contraste al incrementar el valor de límite de contracción el suelo reduce su potencial de expansión. En la práctica, esto se traduce en una cimentación o una subrasante que no se va a deformar excesivamente, ni a generar grietas de tensión cuando lleguen las temporadas de sequía.

Las mezclas logran un mejoramiento a la granulometría conllevando esto a la reducción del potencial de expansión y contracción del suelo. Al disminuir el límite Líquido y aumentar

el límite de contracción, se ha generado un mejoramiento en el suelo reduciendo los riesgos por cambios volumétricos.

V. CONCLUSIONES

La adición de PRC (tanto retenido No. 40 como pasa No. 200) redujo drásticamente el Límite Líquido desde un estado de alta plasticidad (103%) a valores más manejables (aprox. 64%), disminuyendo la sensibilidad del suelo ante variaciones de humedad.

El incremento del Límite de Contracción (del 19.5% al 30%) indica que el suelo alcanza su volumen mínimo con mayor contenido de humedad, Lo que puede tener aplicaciones en obras viales o cimentaciones superficiales, en donde se contribuiría a reducir la ocurrencia de agrietamientos, condición que también se evidencia en el límite liquido ya que este desciende mejorando las condiciones de plasticidad del suelo objeto de estudio.

La adición de PRC que pasa el tamiz No. 200 eleva el porcentaje de partículas menores a 0.07 mm hasta un 84%, lo cual, aunque reduce la plasticidad, aumenta la superficie específica y podría afectar la permeabilidad del suelo.

El descenso en la gravedad específica de 2.81 a 2.70 evidencia que el material original, de alta densidad, ha sufrido cambios mineralógicos, lo que conlleva a reducir el peso propio de la estructura de suelo.

En las mezclas con PRC retenido No. 40, el suelo tiende a estabilizar su gradación en los diámetros mayores (0.07 mm), lo que facilita el control de calidad en obra al tener una respuesta granulométrica más predecible.

En conjunto, se espera que la incorporación de las mezclas contribuya al mejoramiento del comportamiento del suelo expansivo, favoreciendo una reducción de su susceptibilidad a los cambios volumétricos y promoviendo condiciones más adecuadas para su posible utilización como subrasante o relleno controlado. No obstante, estos aspectos corresponden a resultados esperados de la investigación.

VI. REFERENCIAS

[1] J. L. Gonzáles-Rufino, O. Chávez-Alegría, J. L. Gonzáles-Rufino, y O. Chávez-Alegría, «Evaluación de la expansión en suelos presaturados», *Ing. Investig. Tecnol.*, vol. 22, n.º 4, dic. 2021, doi: 10.22201/fi.25940732e.2021.22.4.027.

[2] A. R. Estabragh, M. Moghadas, y A. A. Javadi, «Mechanical behaviour of an expansive clay mixture during cycles of wetting and drying inundated with different quality of water», *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 19, n.º 3, pp. 278-289, mar. 2015, doi: 10.1080/19648189.2014.960098.

[3] R. I. Kusuma, E. Mina, W. Fathonah, y A. A. Bilhaq, «The Influence of Marble Waste Powder on Clay Soil Stabilization», *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 13, n.º 2, pp. 487-493, abr. 2023, doi: 10.18517/ijaseit.13.2.17200.

[4] B. R. Reis, A. L. S. Vasconcelos, A. M. M. Silva, F. D. Andreote, y A. C. Azevedo, «Changes in soil bacterial community structure in a short-term trial with different silicate rock powders», *Chem. Biol. Technol. Agric.*, vol. 11, n.º 1, Art. n.º 1, dic. 2024, doi: 10.1186/s40538-024-00586-w.

Ciberseguridad en Subestaciones Digitales: De la Caracterización del Sistema IEC 61850 al Despliegue de Controles de Mitigación

Oscar Andrés Tobar-Rosero
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Automática
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
Medellín, Colombia
oatobarr@unal.edu.co

Ivar Fernando Gómez-Pedraza
Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones
Institución Universitaria ITM
Medellín, Colombia
Ivar.Gomez@gmail.com

Ernesto Perez-Gonzalez
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Automática
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
Medellín, Colombia
eperezg@unal.edu.co

John Willian Branch-Bedoya
Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
Medellín, Colombia
jwbranch@unal.edu.co

Abstract*—La digitalización de las subestaciones eléctricas ha fortalecido la interoperabilidad y la automatización, pero también ha incrementado la exposición cibernética de las funciones de protección y control dependientes de la comunicación. En entornos IEC 61850, mensajes y servicios como GOOSE y la sincronización temporal desempeñan un papel crítico en el bus de proceso, lo que hace especialmente relevantes los ataques a la capa de comunicación por su potencial impacto operacional. Este artículo expone una metodología de mitigación cibernética para subestaciones digitales, basada en la caracterización del sistema de comunicaciones y en la derivación de controles desplegables sobre la infraestructura convencional de red. La propuesta se estructura en tres etapas: caracterización de dispositivos, interfaces, flujos críticos y comportamiento del tráfico; derivación de reglas de unicidad y consistencia para mensajes y publicadores IEC 61850; y traducción de dichas reglas en controles de comunicación como restricción de admisión, delimitación del alcance comunicacional, validación de mensajes y soporte de monitoreo. La metodología se valida en un entorno experimental representativo de una bahía de subestación digital compuesta por dispositivos electrónicos inteligentes, merging units, un switch gestionable y un servidor de tiempo, evaluando escenarios de reconocimiento de tráfico, suplantación de mensajes GOOSE y afectación de los servicios de sincronización. Los resultados muestran que, sin restricciones de comunicación, el atacante puede observar patrones críticos y preparar ataques con potencial de impacto operacional. Tras la aplicación de controles derivados del comportamiento real del sistema, el entorno se vuelve más restrictivo y resiliente, lo que reduce la visibilidad del atacante y limita la viabilidad del tráfico malicioso. El principal aporte es una ruta metodológica práctica y transferible para convertir el conocimiento del sistema de comunicación en medidas de mitigación compatibles con las restricciones operativas de las subestaciones digitales.

***Palabras Clave*— Subestaciones digitales; IEC 61850; ciberseguridad; suplantación de mensajes; infraestructura crítica.**

I. Introducción

La transición de subestaciones convencionales hacia subestaciones digitales ha redefinido la forma en que se ejecutan las funciones de protección, control, supervisión y automatización en los sistemas eléctricos modernos. La adopción del estándar IEC 61850 ha favorecido la interoperabilidad entre dispositivos inteligentes, la reducción del cableado punto a punto, la integración de información en tiempo real y una mayor flexibilidad arquitectónica en esquemas de bus de proceso y bus de estación [1], [2]. No obstante, esta evolución también ha trasladado funciones críticas del sistema eléctrico a entornos intensivos en comunicación Ethernet, sincronización de alta precisión e intercambio continuo de mensajes sensibles al tiempo, lo que incrementa la exposición cibernética de la infraestructura y exige mecanismos de protección acordes con los requerimientos operativos del sector eléctrico [2], [3].

A diferencia de otros entornos de TI, en una subestación digital las comunicaciones no solo transportan información administrativa o de supervisión, sino que soportan acciones directamente asociadas con la continuidad del servicio, la selectividad de protección, la coordinación entre equipos y la integridad temporal de la operación. En este contexto, protocolos y servicios como GOOSE, Sampled Values, MMS y PTP cumplen un papel determinante en la ejecución de funciones de protección y control, pero originalmente no fueron concebidos con un enfoque de ciberseguridad nativa como criterio dominante de diseño [1], [4]. Por ello, cualquier afectación sobre la legitimidad de los mensajes, la disponibilidad del canal o la consistencia temporal de la información puede traducirse en consecuencias operativas relevantes.

La literatura reciente ha mostrado que las arquitecturas basadas en IEC 61850 son vulnerables a múltiples amenazas, entre ellas suplantación de mensajes, ataques de repetición, inyección de datos falsos, manipulación de tráfico multicast, denegación de servicio y ataques dirigidos a los mecanismos de sincronización [5], [6]. Entre estos escenarios, la suplantación de mensajes GOOSE destaca por su capacidad de inducir cambios de estado no autorizados, alterar la lógica de operación de los IED y comprometer funciones de protección en tiempos muy reducidos [7], [8]. De forma similar, la degradación o interrupción de los servicios de sincronización puede afectar el desempeño de equipos dependientes de referencia temporal, como las merging units, y deteriorar la consistencia de funciones críticas en el bus de proceso [6], [9]. En consecuencia, la ciberseguridad en subestaciones digitales no puede limitarse a la

protección perimetral o al monitoreo genérico de red; debe considerar la relación estrecha entre arquitectura, tráfico y comportamiento operativo.

En paralelo, durante los últimos años se han fortalecido distintas líneas de investigación alrededor de la ciberseguridad en subestaciones digitales. Existen trabajos orientados al análisis de vulnerabilidades de protocolos, propuestas centradas en IDS y clasificación de anomalías, estudios de modelado de amenazas y entornos experimentales que permiten reproducir ataques en escenarios controlados [2], [5], [7], [10]. Asimismo, la disponibilidad de datasets obtenidos en laboratorios físicos ha contribuido a mejorar la reproducibilidad de investigaciones relacionadas con ataques sobre tráfico GOOSE [11]. Sin embargo, todavía persiste una limitación importante: gran parte de estas contribuciones se concentran en identificar eventos anómalos, describir requisitos normativos o caracterizar amenazas, pero son menos frecuentes los trabajos que convierten el conocimiento detallado de la arquitectura y del comportamiento comunicacional en reglas operativas concretas que puedan implementarse directamente sobre la infraestructura de comunicación de la subestación [2], [7], [10].

Bajo esta perspectiva, el presente artículo propone un enfoque de mitigación cibernética orientado a la comunicación para subestaciones digitales, basado en la derivación de reglas de unicidad y consistencia a partir del comportamiento real de dispositivos y mensajes IEC 61850. La propuesta se valida experimentalmente en una bahía representativa de subestación digital enfocada en el bus de proceso, integrada por IED, merging units, un switch gestionable y un servidor de tiempo, sobre la cual se evalúan escenarios de reconocimiento de tráfico, suplantación de mensajes GOOSE e indisponibilidad asociada a servicios críticos de sincronización [11]. A diferencia de enfoques centrados únicamente en detección, esta investigación busca demostrar que la caracterización del sistema puede traducirse en medidas de restricción y control directamente desplegables, con potencial para disminuir la visibilidad del atacante, limitar la propagación de tráfico no autorizado y reforzar la resiliencia operativa del entorno.

A partir de ello, el aporte principal del trabajo consiste en articular tres dimensiones que usualmente aparecen separadas en la literatura: la comprensión del sistema de comunicación de la subestación, la formulación de reglas operativas derivadas del tráfico observado y la validación experimental de controles de mitigación aplicables sobre infraestructura convencional. Con este enfoque, el artículo pretende aportar una visión técnicamente rigurosa y al mismo tiempo transferible al sector eléctrico, útil tanto para investigación aplicada como para procesos de diseño, modernización y endurecimiento cibernético de subestaciones digitales.

II. Antecedentes y Brecha de Investigación

La ciberseguridad en subestaciones digitales ha evolucionado de manera importante en los últimos años; sin embargo, dicho avance no ha sido uniforme ni plenamente convergente. La literatura disponible muestra un desarrollo relevante en al menos cuatro frentes: análisis de vulnerabilidades y exposición protocolaria, detección de anomalías e intrusiones, entornos experimentales y datasets, y enfoques de modelado de amenazas o endurecimiento arquitectónico. En conjunto, estas líneas han fortalecido la comprensión del riesgo cibernético en entornos IEC 61850, pero no necesariamente han derivado en estrategias de protección aplicables de forma directa sobre la infraestructura de comunicación que opera en campo [1]–[3], [5], [7], [10].

Una primera línea de trabajo se ha concentrado en la arquitectura de comunicación de las subestaciones digitales y en las vulnerabilidades asociadas al uso de IEC 61850. Estudios de revisión y análisis técnico han mostrado que la migración desde esquemas cableados convencionales hacia buses de proceso y estación basados en Ethernet incrementa la complejidad operativa y amplía la superficie de ataque, especialmente en escenarios con múltiples fabricantes, alta interoperabilidad y comunicaciones críticas dependientes del tiempo [1]–[3]. En este marco, la literatura ha resaltado que servicios como GOOSE, Sampled Values, MMS y PTP no pueden analizarse únicamente como tráfico de red, sino como soportes de funciones de protección y control cuya alteración puede desencadenar efectos físicos y operativos sobre la subestación [2], [3].

Una segunda corriente ha estado orientada al desarrollo de IDS, clasificadores y mecanismos de detección de anomalías. Diversos estudios han utilizado atributos del tráfico IEC 61850, especialmente de mensajes GOOSE, para construir métodos basados en reglas, ventanas temporales, aprendizaje automático o redes neuronales recurrentes, con el fin de distinguir entre comportamiento legítimo y malicioso [5], [12]–[17]. Este grupo de trabajos ha aportado significativamente al reconocimiento de patrones anómalos y a la mejora de la visibilidad cibernética del sistema. No obstante, su énfasis principal suele estar en el desempeño de la detección, más que en la traducción de ese conocimiento en reglas determinísticas de control que puedan ser impuestas de manera directa sobre switches, dominios VLAN, puertos o restricciones de publicación y recepción [12]–[16].

Una tercera línea se relaciona con el uso de testbeds, co-simulación, emulación de tráfico y datasets experimentales. Esta área ha cobrado importancia porque la validez de muchas propuestas depende de escenarios reproducibles y de condiciones de tráfico cercanas a la operación real. En consecuencia, se han desarrollado plataformas híbridas, bancos de pruebas de laboratorio, herramientas de emulación de tráfico IEC 61850 y conjuntos de datos obtenidos a partir de infraestructuras físicas, particularmente para estudiar suplantación de GOOSE, dinámica temporal de mensajes y efectos de ataques en ambientes controlados [11], [13], [18]–[20]. Estas contribuciones son valiosas porque mejoran la reproducibilidad y reducen la dependencia de simulaciones excesivamente simplificadas; sin embargo, en muchos casos el foco sigue siendo la reproducción del ataque, la generación de evidencia o el entrenamiento de detectores, sin avanzar hasta la formulación de políticas de control operativas para la red de la subestación [11], [13], [19].

Una cuarta línea ha abordado el problema desde el modelado de amenazas, la evaluación de riesgo y el endurecimiento arquitectónico. En este grupo se ubican trabajos que proponen marcos de análisis para subestaciones según IEC 61850, consideran al atacante como un agente con conocimiento del

entorno y exploran las dependencias entre comunicaciones, la arquitectura y los efectos físicos. También se incluyen estudios sobre criterios mínimos de segmentación, control de acceso, monitoreo y diseño defensivo para sistemas de automatización de subestaciones [10], [21]–[24]. Este enfoque ha sido útil para comprender mejor la exposición sistémica de la subestación digital y para alinear la discusión con estándares y buenas prácticas del ámbito OT. No obstante, persiste una dificultad práctica: pasar de recomendaciones generales o de modelos de amenaza a mecanismos concretos, simples y auditables que puedan desplegarse sin comprometer la latencia, la interoperabilidad ni la mantenibilidad.

De forma transversal, la revisión de la literatura permite advertir una importante tensión metodológica. Por un lado, los enfoques basados en cumplimiento normativo y defensa en profundidad ofrecen lineamientos esenciales para estructurar la ciberseguridad del entorno OT [4], [25], [26]. Por otro lado, los métodos puramente basados en analítica avanzada o aprendizaje automático pueden alcanzar buen rendimiento en clasificación, pero a menudo requieren entrenamiento significativo, mayor complejidad de despliegue o mecanismos menos transparentes para la operación cotidiana [14], [16], [17]. En subestaciones digitales, donde los requerimientos de tiempo, trazabilidad técnica y operación determinística son especialmente exigentes, esta tensión resulta crítica. En consecuencia, no basta con detectar mejor; también es necesario restringir mejor.

En síntesis, aunque la literatura ha avanzado en detección, caracterización y modelado de amenazas, persiste una brecha concreta: son comparativamente pocos los trabajos que transforman el conocimiento detallado del sistema de comunicación en reglas operativas directamente desplegables sobre infraestructura convencional. Esta brecha, especialmente relevante en entornos con restricciones estrictas de latencia e interoperabilidad, motiva la propuesta presentada en este artículo.

Con base en esta brecha, el presente trabajo se sitúa en la intersección entre la caracterización del sistema, el diseño de reglas de control y la validación experimental de medidas de mitigación. En lugar de proponer únicamente un clasificador, un dataset o una revisión normativa, el artículo plantea una ruta para derivar reglas de unicidad y consistencia a partir del comportamiento real de dispositivos y mensajes IEC 61850, y traducirlas en controles desplegables sobre infraestructura convencional de red. Ese es el factor diferencial del trabajo: desplazar la discusión desde la sola observación del ataque hacia la reducción efectiva de su viabilidad operativa mediante controles de comunicación aplicables y verificables

III. METODOLOGÍA

La metodología propuesta transforma el conocimiento del sistema de comunicación de una subestación digital en controles de ciberseguridad desplegables sobre la infraestructura de red convencional. A diferencia de enfoques centrados en detección de anomalías, la propuesta parte de que una defensa efectiva requiere determinar qué dispositivos deben comunicarse, qué flujos son legítimos y bajo qué condiciones temporales puede considerarse válida una interacción crítica, orientándose así a la derivación de restricciones operativas directamente aplicables sobre el entorno [7], [25]. La propuesta se organiza en tres etapas secuenciales: i) caracterización del sistema de comunicación, ii) derivación de reglas de unicidad y consistencia, y iii) traducción de dichas reglas en controles concretos sobre la red, así se da lugar a una etapa final de resultados metodológicos (Fig 1.), enfocados en garantizar que el proceso sea replicable en otros entornos IEC 61850 [2], [11].

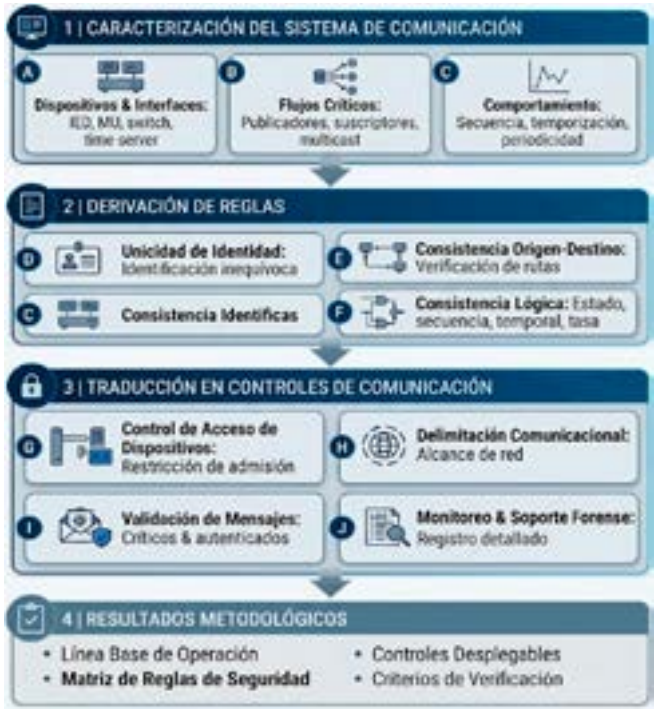


Fig. 1. Esquema general de la metodología aplicada

A. Caracterización del sistema de comunicación

La primera etapa consiste en elaborar una caracterización técnica del sistema de comunicación de la subestación digital. Esta fase no se limita al inventario de equipos, sino que integra información de arquitectura, funciones operativas, relaciones de publicación y suscripción, topología de comunicación, protocolos utilizados y comportamiento observable del tráfico en condiciones representativas de operación. El supuesto central es que la protección del entorno no puede apoyarse únicamente en controles genéricos, sino que debe fundamentarse en el conocimiento específico de los dispositivos conectados, sus identidades de comunicación y las lógicas funcionales que los sustentan [1], [2], [24].

La caracterización considera tres dimensiones: dispositivos (equipos conectados, interfaces y roles funcionales), flujos (mensajes publicados, origen, destino multicast y alcance operacional) y comportamiento (evolución temporal y secuencial del tráfico). Para mensajería GOOSE, los atributos relevantes incluyen:

- Dirección MAC de origen y destino
- gocbRef
- confRev
- stNum
- sqNum

- timeAllowedToLive
- marca temporal

En conjunto, dichos atributos describen tanto la estructura del paquete como su legitimidad operacional conforme a las normas IEC 61850-8-1 e IEC 62351-6 [4], [28]. El resultado de esta etapa es una línea base compuesta por: inventario de equipos y vínculos de red, mapa de flujos críticos, emisores autorizados y destinos válidos, y patrones de secuencia, periodicidad y temporización.

B. Derivación de reglas de unicidad y consistencia

Una vez caracterizado el sistema, la metodología avanza hacia la formulación de reglas operativas que establecen qué comportamiento debe considerarse legítimo en la red de la subestación. Estas reglas se basan en dos conceptos centrales: unicidad y consistencia. La unicidad permite verificar que ciertos atributos críticos estén asociados de manera exclusiva a dispositivos o flujos autorizados; la consistencia permite evaluar si el comportamiento del mensaje se mantiene coherente con la lógica esperada del sistema [7], [8], [11].

La primera familia de reglas corresponde a la unicidad de identidad. En condiciones normales de operación, un publicador autorizado debe estar vinculado a un dispositivo específico, a una interfaz conocida y a un punto de conexión previamente definido. Por tanto, un mismo flujo crítico no debería observarse desde múltiples orígenes no previstos. Esta regla es particularmente relevante en escenarios de suplantación, en los que un atacante intenta imitar atributos legítimos de publicación para inyectar tráfico malicioso en el mismo dominio de comunicación.

La segunda familia de reglas se refiere a la consistencia entre el origen y el destino. En entornos GOOSE, los grupos multicast y las relaciones de publicación y suscripción responden a una intención operativa definida por la arquitectura del sistema. En consecuencia, no basta con verificar quién emite el mensaje; también es necesario validar que dicho mensaje circule por la ruta prevista, hacia el dominio correspondiente y dentro del alcance funcional esperado. Esta regla permite reducir la propagación indebida de tráfico crítico y aporta un criterio adicional para identificar flujos ajenos a la lógica de la subestación.

La tercera familia de reglas aborda la consistencia entre el estado y la secuencia. En la norma IEC 61850, el campo stNum representa cambios en el estado del conjunto de datos, mientras que sqNum describe las retransmisiones dentro del mismo estado [28]. En condiciones legítimas, ambos parámetros siguen patrones interpretables y acotados. Por ello, la metodología propone verificar si las transiciones observadas son coherentes con eventos válidos, si la secuencia evoluciona de manera consistente y si no se presentan combinaciones contradictorias entre el estado, la secuencia y el contenido del mensaje. Esta dimensión es clave porque algunos ataques pueden respetar parte de la sintaxis del protocolo y, aun así, vulnerar la lógica operativa del flujo.

La cuarta familia corresponde a la consistencia temporal y de tasa. Incluso cuando un mensaje reproduce correctamente varios campos formales, puede seguir siendo ilegítimo si altera la periodicidad esperada, introduce ráfagas inusuales, excede los umbrales admisibles de tráfico o rompe la coherencia temporal del sistema. Este criterio es útil tanto para ataques de suplantación como para escenarios de degradación por inundación o denegación de servicio, especialmente en servicios sensibles a la sincronización.

Como resultado de esta segunda etapa, se obtiene una matriz de reglas que vincula cada observable relevante con una condición de legitimidad, un tipo de violación esperada y un objetivo de seguridad asociado. Esta matriz constituye el puente entre el análisis técnico del tráfico y la posterior definición de controles desplegables.

C. Traducción de reglas en controles de comunicación

La tercera etapa de la metodología consiste en convertir las reglas derivadas en mecanismos concretos de protección de la infraestructura de comunicaciones. De esta manera, se establece inicialmente la primera dimensión de control como la restricción de admisión de dispositivos. Las reglas de unicidad de identidad se traducen en mecanismos como seguridad por puerto, asociación de MAC autorizada, vinculación entre dispositivo e interfaz, y limitación de equipos permitidos por punto de conexión. El objetivo es impedir la incorporación de publicadores no autorizados o reducir la posibilidad de que un equipo ajeno emule la identidad de un emisor legítimo.

La segunda dimensión es la delimitación del alcance comunicacional. Las reglas de consistencia origen–destino pueden materializarse mediante segmentación lógica, separación de dominios, restricción de tráfico multicast y uso controlado de VLAN u otros mecanismos equivalentes. Con ello se busca evitar que los mensajes críticos circulen fuera del dominio funcional previsto, reducir la exposición lateral y contener la visibilidad del tráfico para actores no autorizados.

La tercera dimensión corresponde a la validación de los mensajes críticos. Las reglas asociadas a secuencia, estado y temporización pueden expresarse como listas blancas, filtros por flujo autorizado, validaciones de comportamiento esperado y umbrales de aceptación del tráfico. Esta capa no reemplaza las medidas criptográficas contempladas en IEC 62351-6, sino que las complementa desde la lógica de operación real del sistema, reforzando la capacidad de detectar o bloquear publicaciones que, aunque parezcan sintácticamente válidas, no cumplen con la coherencia funcional esperada.

La cuarta dimensión integra el monitoreo, el registro y el soporte forense. Aunque la propuesta tiene un enfoque de mitigación, no descarta el valor del monitoreo pasivo. Por el contrario, considera que el sistema debe registrar eventos que excedan umbrales de comportamiento permitido, cambios no esperados en la identidad de publicación, desviaciones de temporización o violaciones reiteradas de las reglas derivadas. Esto permite no solo reducir la viabilidad del ataque, sino también generar trazabilidad para el análisis posterior y la mejora continua de la política de control.

De esta manera se concluye la componente metodológica de la investigación, destacando, a su vez, el carácter transferible de la misma, que radica en que no depende de una única marca de IED, de una topología exclusiva ni de un solo tipo de ataque. Su lógica puede extenderse a otros entornos IEC 61850 siempre que

exista la capacidad de identificar dispositivos, flujos críticos y el comportamiento esperado del tráfico. Así, más que ofrecer una solución cerrada, la metodología plantea un procedimiento sistemático para derivar controles a partir de la realidad comunicacional de cada subestación, manteniendo la compatibilidad con las restricciones operativas propias de infraestructuras críticas.

La TABLA I resume las etapas de la metodología, sus propósitos, elementos clave y resultados esperados.

TABLA I. SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Etapa	Propósito	Elementos clave	Resultado
Caracterización del sistema	Construir la línea base del entorno de comunicación	Dispositivos e interfaces; flujos críticos; comportamiento del tráfico	Línea base de operación
Derivación de reglas	Definir condiciones de legitimidad del tráfico	Unicidad de identidad; consistencia origen–destino; estado, secuencia, temporización y tasa	Matriz de reglas
Traducción en controles	Convertir las reglas en medidas desplegables sobre la red	Admisión de dispositivos; delimitación del alcance comunicacional; validación de mensajes; monitoreo y registro	Controles desplegables
Verificación metodológica	Comprobar que los controles reducen la exposición y la viabilidad del ataque	Comparación antes/después; observación de tráfico; validación experimental	Criterios de verificación

D. Entorno experimental y diseño de validación

La validación de la metodología se llevó a cabo en un banco de pruebas representativo de una bahía de subestación digital (Fig. 2), compuesto por tres IEDs (protección principal y respaldos), dos merging units (MU), un switch gestionable y un servidor de tiempo, elementos fundamentales para el análisis comparativo con un sistema real en operación en un entorno controlado [27].



Fig. 1. Escenario para pruebas en ambiente controlado

1) Modelo de atacante

Se asumió un atacante con acceso interno al dominio de comunicación del bus de proceso, con capacidad de observar tráfico, reconocer identidades de publicación y construir tráfico malicioso con conocimiento parcial del sistema. Este supuesto es coherente con escenarios de amenaza en infraestructuras críticas, en los que equipos comprometidos, personal interno o terceros con acceso autorizado pueden convertirse en vectores de ataque [3], [10], [25].

2) Casos evaluados

Se definieron tres casos de evaluación y una fase posterior de verificación con controles activos: (i) reconocimiento pasivo del tráfico en el entorno sin restricciones, para determinar qué información puede observar un atacante interno; (ii) suplantación de mensajes GOOSE con inyección de estados falsos, evaluando si el receptor acepta el flujo malicioso; y (iii) degradación de servicios de sincronización temporal mediante DoS/DDoS dirigido a los recursos PTP, analizando el impacto sobre las MU (TABLA II). Los mismos casos se repitieron tras la aplicación de controles para comparar la exposición antes y después de la mitigación [11], [27].

TABLA II. RESUMEN DE LOS ESCENARIOS EXPERIMENTALES CONSIDERADOS

Escenario	Objetivo de evaluación	Riesgo o efecto analizado
Reconocimiento de tráfico	Verificar la exposición inicial del entorno	Obtención de información útil para preparar ataques
Suplantación de mensajes GOOSE	Evaluar la posibilidad de introducir mensajes no legítimos	Cambios de estado no autorizados
Afectación a servicios de sincronización	Analizar la sensibilidad del entorno a tráfico disruptivo	Degradación del canal de sincronización
Verificación posterior a la mitigación	Comparar el entorno antes y después de aplicar controles	Reducción de exposición y de factibilidad operativa

IV. RESULTADOS

Los siguientes apartados presentan los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios evaluados, siguiendo la secuencia previamente definida.

A. Reconocimiento de tráfico en el entorno base

En el entorno sin restricciones de comunicación, el atacante accedió sin impedimento a los flujos GOOSE activos, identificando direcciones MAC de origen y destino multicast, identificadores lógicos de flujo (gocbRef), valores de confRev, stNum y sqNum, así como los patrones de temporización y retransmisión asociados a cada publicador. Esta visibilidad fue suficiente para inferir la estructura funcional del sistema, los roles de cada IED y las condiciones de estado válidas, lo que proporcionó la información necesaria para preparar ataques de suplantación operacionalmente viables [11], [27].

B. Suplantación de mensajes GOOSE

El análisis procesó 1.644 paquetes GOOSE distribuidos en cuatro escenarios: operación estable (365), eventos legítimos de protección (401), envenenamiento simple (391) y envenenamiento complejo (487). Los escenarios legítimos no generaron falsas alarmas, lo que confirma la robustez de la línea base. En contraste, los escenarios de ataque produjeron 43 y 64

anomalías respectivamente (TABLA III). Así, se evidencia que el ataque simple generó una cantidad determinada de violaciones de la unicidad y la consistencia de la secuencia, mientras que el ataque combinado con falla expuso un número mayor de irregularidades, evidenciando patrones de stNum y sqNum inconsistentes con la lógica operativa esperada.

TABLA III ANÁLISIS DE TRÁFICO GOOSE EN ESCENARIOS DE PRUEBA CONSIDERADOS

Escenario	Paquetes analizados	Anomalías detectadas	Interpretación
Operación estable	365	0	Comportamiento normal con evolución consistente de estado y secuencia
Eventos legítimos de protección	401	0	Transiciones legítimas correctamente reconocidas como no maliciosas
Envenenamiento GOOSE simple	391	43	Inyección maliciosa con inconsistencias observables en estado, secuencia y temporización
Envenenamiento GOOSE complejo	487	64	Ataque mezclado con dinámica legítima, con mayor complejidad de interpretación

El comportamiento temporal del flujo bajo ataque mostró desviaciones marcadas respecto al patrón normal. Como indicador de regularidad, la razón R = T‿med / T‿max, que se aproxima a 1 bajo publicación periódica estable (R ≈ 0,998 en operación normal y con falla), descendió a R = 0,821 bajo ataque simple y a R = 0,220 bajo el escenario combinado de falla y ataque. Estas desviaciones pueden atribuirse directamente a las anomalías de publicación inducidas por el atacante y no a los controles aplicados, que operan en capas que no modifican la ruta de reenvío de los mensajes GOOSE.

La Fig. 3 muestra una captura de las pruebas ejecutadas, con una duración de 100 segundos, en la que se realizan 3 cambios de estado reales desde el IED 1, dando lugar a las respuestas correspondientes en los IED 2 y 3. Este comportamiento es afín a la ejecución de un comando de protección o de control en un sistema operativo real. No obstante, se incluye la ejecución de 3 ataques de suplantación, en los que igualmente se evidencia una respuesta efectiva en los IEDs 2 y 3, lo que deja en evidencia que fueron víctimas de suplantación.



Fig. 2. Pruebas con FDI en la mensajería GOOSE.

C. *Degradación de servicios de sincronización*

Sin controles activos, se ejecutaron tres eventos de ataque DoS en el canal PTP mediante la inundación de tráfico dirigido al servidor de tiempo. Durante cada evento, las merging units perdieron la referencia de sincronización, lo que se reflejó en la degradación del indicador de calidad temporal y en la activación de alarmas asociadas.

La Fig. 4 expone el desarrollo de las pruebas con ataque DoS y permite evidenciar cómo las MUs objeto de análisis, degradan su señal de sincronismo cuando la fuente se encuentra ausente o cuando son víctimas del ataque.

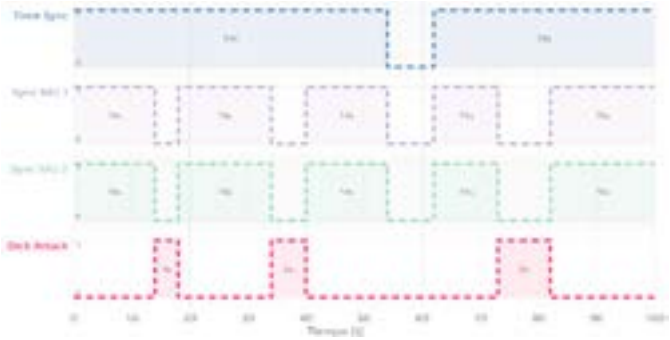


Fig. 3. Pruebas de ataque DoS al sistema de sincronización.

En ausencia de sincronización válida, las MU suspenden la emisión de Sampled Values con marca temporal confiable, lo que compromete directamente la disponibilidad de mediciones para las funciones de protección dependientes de la coherencia temporal. Este comportamiento confirmó que el canal PTP constituye un punto de sensibilidad crítica en el bus de proceso, pues un atacante con acceso al dominio de red puede degradar las funciones de medición y protección sin necesidad de manipular directamente ningún mensaje de control.

D. *Efecto de la mitigación*

Tras la aplicación de controles derivados de la metodología, como la restricción de admisión por puerto, la segmentación del dominio de tráfico, la limitación de la propagación multicast y el control de tasa sobre el canal de sincronización, el entorno mostró una reducción sustancial de la superficie efectiva de ataque.

En el caso GOOSE (Fig. 5), los IED suscriptores dejaron de responder al tráfico malicioso, manteniendo la coherencia de estado con el publicador legítimo.

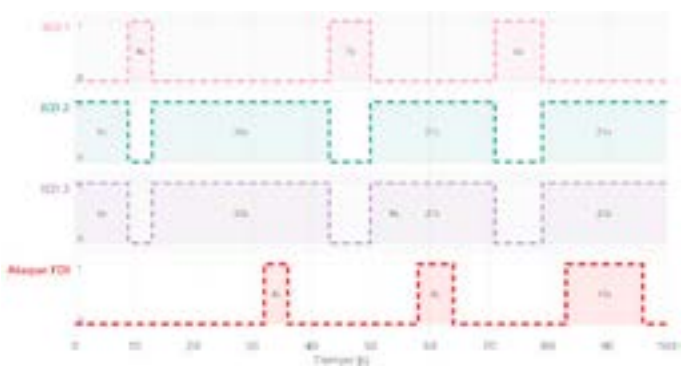


Fig. 4. FDI en la mensajería GOOSE con aplicación de controles.

En el caso PTP (Fig. 6), las MU conservaron la sincronización bajo las mismas condiciones de ataque que previamente provocaban la pérdida de la referencia temporal.

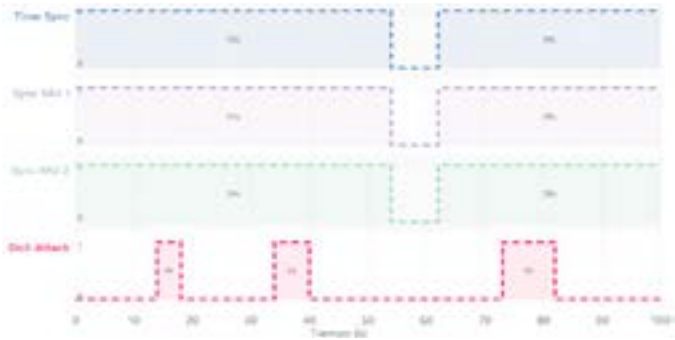


Fig. 6. DoS al sistema de sincronización mediante la aplicación de controles.

La TABLA IV resume la comparación de la exposición antes y después de la mitigación, planteando un análisis cualitativo que se basa en los análisis de riesgo aplicables a este proceso [27].

TABLA IV. SÍNTESIS DE ANÁLISIS COMPARATIVO ANTES Y DESPUÉS DE LOS CONTROLES IMPLEMENTADOS

Aspecto evaluado	Antes de la mitigación	Después de la mitigación
Visibilidad del tráfico	Alta	Reducida
Reconocimiento de flujos críticos	Factible	Limitado
Exposición de publicadores	Amplia	Restringida
Viabilidad de suplantación GOOSE	Alta	Reducida
Exposición de servicios de sincronización	Mayor	Menor
Resiliencia del entorno	Baja a moderada	Mayor

Cabe resaltar que los controles empleados corresponden directamente a las dimensiones definidas inicialmente en la componente metodológica, lo que cierra el ciclo propuesto y evidencia la coherencia del proceso realizado.

V. DISCUSIÓN

Uno de los hallazgos más importantes del trabajo es que la caracterización del sistema permite derivar reglas operativas útiles para restringir la viabilidad del ataque. En este sentido, el valor de la propuesta no radica solo en distinguir el tráfico legítimo del malicioso, sino también en trasladar ese conocimiento a controles concretos en la red, tales como restricciones de admisión, delimitación del alcance de la comunicación y validación de mensajes críticos. Este aspecto marca una diferencia frente a enfoques centrados exclusivamente en el monitoreo o la clasificación, ya que aquí la infraestructura de comunicación participa activamente en la mitigación.

La discusión también evidencia que los conceptos de unicidad y consistencia resultan especialmente relevantes en las subestaciones digitales. Un mensaje puede ser sintácticamente válido y, aun así, resultar ilegítimo desde el punto de vista operativo si no corresponde al remitente esperado, al destinatario previsto o al comportamiento secuencial y temporal admisible. Por ello, el enfoque propuesto resulta pertinente para entornos en los que la seguridad debe ser compatible con restricciones estrictas de latencia, interoperabilidad y operación determinística.

No obstante, los resultados deben interpretarse con cautela. La validación se realizó en una bahía representativa de subestación digital y en un conjunto acotado de escenarios, principalmente la suplantación de mensajería GOOSE y la afectación a servicios de sincronización. Aunque esto es suficiente para demostrar la factibilidad de la propuesta, no agota la diversidad de amenazas presentes en una subestación digital real ni representa por completo la complejidad de despliegues multibahía o multifabricante a mayor escala. Asimismo, varios indicadores posmitigación aún requieren una consolidación cuantitativa más detallada.

VI. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó una metodología orientada a la mitigación cibernética en subestaciones digitales, fundamentada en la caracterización del sistema de comunicaciones y en la derivación de controles aplicables a la infraestructura convencional de red. A diferencia de enfoques centrados únicamente en detección, la propuesta se enfocó en transformar el conocimiento de dispositivos, flujos y comportamiento del tráfico IEC 61850 en reglas operativas de unicidad y consistencia, susceptibles de traducirse en mecanismos concretos de restricción, validación y monitoreo.

La validación experimental, realizada sobre una bahía representativa de subestación digital con IEDs, merging units, switch gestionable y servidor de tiempo, evidenció que, en una condición base sin restricciones específicas, el entorno expone información suficiente para facilitar el reconocimiento del tráfico y la preparación de ataques relevantes. Los resultados obtenidos en los escenarios GOOSE mostraron una diferenciación clara entre tráfico legítimo y tráfico malicioso, sin falsos positivos en los casos normales y con la detección de anomalías en los escenarios de envenenamiento, lo que confirmó la existencia de patrones consistentes aprovechables para la formulación de controles.

Asimismo, el trabajo mostró que la aplicación de controles basados en el comportamiento real del sistema puede reducir la visibilidad del atacante, restringir las publicaciones no autorizadas y limitar la viabilidad operativa de ataques de suplantación de mensajes y de degradación de servicios críticos de sincronización. Aunque algunos indicadores posmitigación requieren consolidación cuantitativa adicional, la evidencia experimental obtenida respalda la hipótesis central del artículo: en subestaciones digitales, la comunicación no debe entenderse solo como un medio de intercambio de datos, sino también como una capa activa de defensa cuando se caracteriza y se controla adecuadamente.

En términos de aporte, la investigación ofrece una ruta metodológica reproducible para pasar de la observación del tráfico a la implementación de medidas desplegables, manteniendo la compatibilidad con las restricciones propias de las infraestructuras críticas. Esto le da valor no solo desde la investigación aplicada, sino también desde la ingeniería de

diseño, la validación y la modernización de subestaciones digitales en contextos reales del sector eléctrico.

Como trabajo futuro, se recomienda ampliar la validación a entornos multibahía y multifabricante, incorporar escenarios adicionales de amenaza y fortalecer la cuantificación comparativa antes y después de la mitigación. También resulta pertinente explorar la integración de esta lógica metodológica con arquitecturas de control y de gestión de red más dinámicas, sin perder de vista los requisitos de interoperabilidad, determinismo y trazabilidad exigidos por la operación de subestaciones digitales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan un agradecimiento especial a la Universidad Nacional de Colombia y al equipo de trabajo del Laboratorio de Automatización y Comunicaciones Industriales (LACI), por poner a disposición los recursos físicos y tecnológicos que hicieron posible el desarrollo de la presente investigación.

REFERENCES

[1] M. A. Aftab, S. M. S. Hussain, I. Ali, and T. S. Ustun, "IEC 61850 based substation automation system: A survey," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 120, art. no. 106008, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106008.

[2] J. Gaspar, T. J. Cruz, C. T. Lam, and P. Simões, "Smart substation communications and cybersecurity: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, pp. 2456–2493, 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3305468.

[3] S. Hussain, J. Hernandez Fernandez, A. K. Al-Ali, and A. Shikfa, "Vulnerabilities and countermeasures in electrical substations," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 33, art. no. 100406, 2021, doi: 10.1016/j.ijcip.2020.100406.

[4] International Electrotechnical Commission, *IEC 62351-6:2020—Power systems management and associated information exchange—Data and communications security—Part 6: Security for IEC 61850*, Geneva, Switzerland: IEC, 2020.

[5] S. E. Quincozes, C. V. N. de Albuquerque, D. Passos, and D. Mossé, "A survey on intrusion detection and prevention systems in digital substations," *Computer Networks*, vol. 184, art. no. 107679, 2021, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107679.

[6] S. Ashraf, M. H. Shawon, H. M. Khalid, and S. M. Muyeen, "Denial-of-service attack on IEC 61850-based substation automation system: A crucial cyber threat towards smart substation pathways," *Sensors*, vol. 21, no. 19, art. no. 6415, 2021, doi: 10.3390/s21196415.

[7] P. Silveira, E. F. Silva, A. Galletta, and Y. Lopes, "Security analysis of digitized substations: A systematic review of GOOSE messages," *Internet of Things*, vol. 22, art. no. 100760, 2023, doi: 10.1016/j.iot.2023.100760.

[8] S. Hussain, A. Iqbal, S. M. S. Hussain, S. Zanero, A. Shikfa, E. Ragaini, I. Khan, and R. Alammari, "A novel hybrid methodology to secure GOOSE messages against cyberattacks in smart grids," *Scientific Reports*, vol. 13, art. no. 1857, 2023, doi: 10.1038/s41598-022-27157-z.

[9] M. Moradi, M. R. Jabbarpour, J. Hosseinzadeh, and A. M. Rahmani, "A new delay attack detection algorithm for PTP network in industry 4.0 systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 132, art. no. 107174, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107174.

[10] S. Yildirim Yayilgan, F. Holik, M. Abomhara, D. Abraham, and A. Gebremedhin, "An approach for analyzing cyber security threats and attacks: A case study of digital substations in Norway," *Electronics*, vol. 11, no. 23, art. no. 4006, 2022, doi: 10.3390/electronics11234006.

[11] O. A. Tobar-Rosero, O. A. Roa-Romero, G. D. Rueda-Carvajal, A. Leal-Piedrahita, J. F. Botero-Vega, S. A. Gutierrez-Betancur, J. W. Branch-Bedoya, and G. D. Zapata-Madrigal, "GOOSE secure: A comprehensive dataset for in-depth analysis of GOOSE spoofing attacks in digital substations," *Energies*, vol. 17, no. 23, art. no. 6098, 2024, doi: 10.3390/en17236098.

[12] W. Hao, Q. Yang, Z. Li, S. Hu, B. Liu, and W. Ruan, "Multi-scale traffic aware cybersecurity situational awareness online model for intelligent power substation communication network," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, pp. 1666–1681, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3210946.

[13] F. Holik, S. Yildirim Yayilgan, and G. B. Olsborg, "Emulation of digital substations communication for cyber security awareness," *Electronics*, vol. 13, no. 12, art. no. 2318, 2024, doi: 10.3390/electronics13122318.

[14] H. Nhung-Nguyen, M. Girdhar, Y. H. Kim, and J. Hong, "Machine-learning-based anomaly detection for GOOSE in digital substations," *Energies*, vol. 17, no. 15, art. no. 3745, 2024, doi: 10.3390/en17153745.

[15] Q. Yang *et al*., "A new methodology for anomaly detection of attacks in IEC 61850-based network traffic," *MethodsX*, vol. 9, art. no. 101731, 2022, doi: 10.1016/j.mex.2022.101731.

[16] J. A. de Oliveira *et al*., "RNN for intrusion detection in digital substations based on IEC 61850 communication," *Array*, vol. 29, art. no. 100455, 2025, doi: 10.1016/j.array.2025.100455.

[17] M. K. Hasan *et al*., "A review on machine learning techniques for secured smart grid cyber–physical systems," *Energy Reports*, vol. 11, 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2023.12.040.

[18] M. S. Abdelrahman *et al*., "A hybrid physical co-simulation smart grid testbed for cybersecurity validation," *Energies*, vol. 16, art. no. 7771, 2023, doi: 10.3390/en16237771.

[19] L. N. H. Pham, V. Rosero-Morillo, A. Shukla, F. Gonzalez-Longatt, and V. Meza-G, "Real-time cyber–physical power system testbed for International Electrotechnical Commission 61850 generic object-oriented substation event transfer time measurements," *Engineering Proceedings*, vol. 77, art. no. 17, 2024, doi: 10.3390/engproc2024077017.

[20] M. F. Guato Burgos, J. Morato, and F. P. Vizcaino Imacaña, "A review of smart grid anomaly detection approaches pertaining to artificial intelligence," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 3, art. no. 1194, 2024, doi: 10.3390/app14031194.

[21] M. Marović, A. Đerek, S. Groš, and I. Kovačević, "Threat model for IEC 61850 based substation automation system," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 51, art. no. 100789, 2025, doi: 10.1016/j.ijcip.2025.100789.

[22] N. Kabbara, N. Cibin, H. Morais, A. Štefanov, and M. Gibescu, "A cybersecurity assessment for hybrid virtualized-physical digital substations," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 43, art. no. 101795, 2025, doi: 10.1016/j.segan.2025.101795.

[23] J. Csatár *et al*., "A structured approach to cyber–physical attacks on digital substations," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 51, art. no. 100827, 2025, doi: 10.1016/j.ijcip.2025.100827.

[24] J. Horalek and V. Sobeslav, "Security baseline for substation automation systems," *Sensors*, vol. 23, no. 16, art. no. 7125, 2023, doi: 10.3390/s23167125.

[25] K. Stouffer, V. Pillitteri, S. Lightman, M. Abrams, and A. Hahn, *Guide to Operational Technology (OT) Security*, NIST Special Publication 800-82 Rev. 3. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2023, doi: 10.6028/NIST.SP.800-82r3.

[26] International Society of Automation, *ISA/IEC 62443 Series of Standards*. Research Triangle Park, NC, USA: ISA, 2025. [Online]. Available: https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards

[27] O. A. Tobar-Rosero, I. F. Gómez-Pedraza, J. E. Candelo-Becerra, J. D. Grajales-Bustamante, and F. E. Hoyos, "Cybersecurity risk mitigation in digital substations based on a control model for communication systems: An experimental validation," *Automation*, vol. 7, no. 3, art. no. 68, 2026, doi: 10.3390/automation7030068.

[28] International Electrotechnical Commission, *IEC 61850-8-1: Communication networks and systems for power utility automation—Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM)—Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3*, Geneva, Switzerland: IEC, 2020

Towards a Sustainable Decision-Making Methodology for the Electrification of Isolated Areas: Identification and Prioritization of Key Indicators

Dahiana López García
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales
Manizales, Colombia
https://orcid.org/0000-0001-6611-7402

Sandra Ximena Carvajal Quintero
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales
Manizales, Colombia
https://orcid.org/0000-0001-6774-9065

***Abstract*— Electrification of isolated areas in emerging countries represents a major challenge for achieving universal energy access, particularly in contexts marked by low population density and limited infrastructure. In these settings, the sustainability of electrification solutions is a more significant barrier than the coverage itself. Existing planning methodologies typically rely on technical, economic, environmental, social, and institutional dimensions; however, these approaches often operate under a linear logic that fails to adapt to local conditions, lacks mechanisms for prioritizing indicators, and omits dynamic interactions between sustainability pillars. These limitations are further exacerbated in data-scarce environments, where the lack of reliable information restricts the applicability of conventional frameworks.**

In this context, this paper proposes a systematic procedure for the identification and classification of sustainability indicators suited for isolated areas. The research conducts a comparative analysis of several representative methodologies, evaluating them to identify integration gaps across the five pillars of sustainability. As a primary contribution, the study develops a structured inventory of indicators characterized by their data intensity requirements, which facilitates their application in territories with limited information. Furthermore, the Water–Energy–Food (WEF) Nexus perspective is integrated, identifying composite meta-indicators that function as "message carriers" of systemic interdependencies. The results suggest that electrification planning cannot rely on rigid checklists but must transition toward adaptive and context-aware planning frameworks. It is concluded that the selection and prioritization of indicators must respond to local productive dynamics. This work establishes the foundation for design future decision-making tools where indicators reflect the holistic "health" of the system to ensure resilient rural development.

Keywords—Decentralized renewable energy, Emerging countries, Energy planning, Non-Interconnected Zones, Multi-criteria decision-making, Rural distribution systems, Sustainability indicators, Sustainable rural electrification.

I. Introduction

The provision of reliable, affordable, and clean energy is widely recognized as a cornerstone for achieving the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly those related to poverty reduction, public health, and education [1]. Despite sustained international efforts, access to electricity remains an unresolved challenge. Recent estimates from the International Energy Agency indicate that around 730 million people worldwide still lack access to electricity, with progress having largely stagnated in recent years [2]. This condition of energy poverty is especially pronounced in isolated and rural areas of emerging countries, where low population density, difficult terrain, and limited infrastructure make the expansion of national interconnected grids both technically complex and economically unviable [3].

In this context, achieving universal energy access, as established in Sustainable Development Goal 7 (SDG7), becomes particularly challenging. The characteristics of these territories not only hinder conventional grid expansion but also demand alternative approaches tailored to local conditions [3], [4]. As a result, decentralized solutions, such as mini-grids and stand-alone renewable energy systems, have become central to electrification strategies in these regions [5], [6]. Yet, while these technologies address the issue of access, they do not automatically guarantee long-term sustainability or meaningful improvements in quality of life.

For this reason, planning approaches have gradually evolved beyond the notion of *"mere electrification"*, understood as the simple deployment of infrastructure, toward the broader concept of *"rural energization"*[7]. This perspective recognizes energy not just as a service, but as a driver of development. Energization is therefore conceived as a continuous and structured process that integrates multiple energy carriers to meet not only domestic needs, but also service-related and productive demands [7], [8], [9]. In doing so, it aligns electrification efforts with local economic activities and community development, which are essential for long-term sustainability.

This shift in perspective also implies a greater level of complexity in planning. Electrification can no longer be evaluated solely through technical or economic performance; instead, it must balance multiple and often competing objectives, commonly framed as the "Energy Trilemma": ensuring equitable access, maintaining energy security, and minimizing environmental impact [10]. Addressing these dimensions simultaneously requires structured methodologies capable of integrating technical, economic, environmental, social, and institutional aspects within a unified framework.

Existing rural electrification methodologies attempt to respond to this complexity, but they do so with varying degrees of success. While many approaches incorporate multiple sustainability dimensions, they often treat them independently, without capturing the interactions between them. Moreover,

these methodologies frequently rely on detailed and high-resolution data, which are rarely available in isolated and data-scarce environments such as the Non-Interconnected Zones (ZNI) of countries like Colombia. As a result, there is a disconnect between methodological development and practical applicability in real-world contexts [11].

In this scenario, analyzing existing methodologies becomes a necessary step to identify the elements that underpin decision-making in rural electrification planning. In particular, these methodologies implicitly or explicitly rely on sustainability indicators to evaluate alternatives, assess performance, and guide implementation. Understanding how these indicators are defined, selected, and used within different methodological approaches is therefore essential.

In this context, ensuring the long-term sustainability of rural electrification initiatives requires moving beyond single-dimension evaluations toward a comprehensive, multi-dimensional perspective. Sustainable electrification solutions must be assessed across five interrelated dimensions: technical, economic, environmental, social, and institutional. The technical dimension ensures system reliability and performance; the economic dimension addresses affordability and financial viability; the environmental dimension considers resource use and ecological impact; the social dimension reflects community acceptance, equity, and quality of life; and the institutional dimension captures governance, local capacity, and long-term management.

Rather than acting independently, these dimensions interact dynamically, shaping the overall success or failure of electrification projects. As a result, any attempt to design, evaluate, or prioritize electrification solutions must account for this multi-dimensional structure. This perspective provides the conceptual foundation for analyzing existing methodologies and, subsequently, for identifying and structuring sustainability indicators suited to isolated and data-scarce environments.

Based on this premise, this work examines existing methodologies as a foundation for the identification and structuring of sustainability indicators suitable for isolated and rural contexts in emerging countries.

II. Research Methodology

As illustrated in Fig. 1, this research followed a five-phase methodological framework aimed at identifying and analyzing sustainability methodologies and indicators for rural electrification in isolated areas of emerging countries.

The process began with a structured literature review conducted using major scientific databases. The selected studies were grouped into four categories: techno-economic methods, multi-criteria decision-making approaches, sustainability indicator frameworks, and participatory or socio-institutional methodologies. After the screening process, 19 representative methodologies were selected for comparative analysis.

The methodologies were then evaluated across five sustainability dimensions, Technical, Economic, Social, Environmental, and Institutional, using a qualitative scale to determine the level of integration of each dimension within the methodological framework.

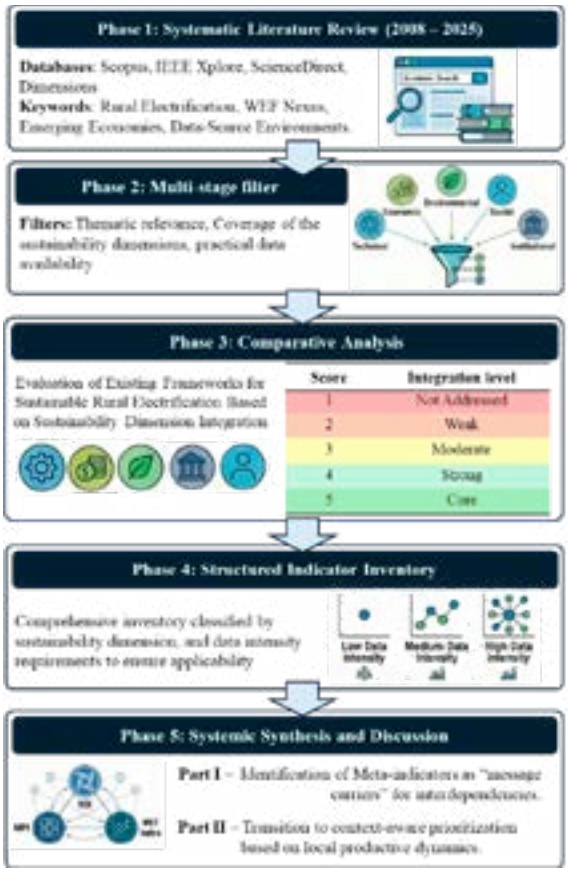


Figure 1. Sustainability dimension assessment of rural electrification methodologies. Source: Own Elaboration

Subsequently, the indicators identified in the literature were organized into a structured inventory and classified according to both their primary sustainability dimension and their level of data intensity, ranging from low-data proxies to high-data operational indicators. This classification was intended to address the challenges associated with planning in isolated and data-scarce environments such as Non-Interconnected Zones.

Finally, the study incorporated a systemic perspective through the discussion of interactions between sustainability dimensions and the inclusion of composite approaches such as the Water–Energy–Food (WEF) Nexus, highlighting the need for adaptive and context-aware electrification planning frameworks.

III. Methodological Approaches to Sustainable Rural Electrification

The literature on rural electrification, both academic and applied, offers a wide range of methodological approaches for planning and decision-making. These approaches can generally be grouped into four categories: techno-economic methods, multi-criteria decision-making, sustainability indicator frameworks, and participatory or socio-institutional approaches. Although they differ in scope and focus, all of them, either explicitly or implicitly, rely on sustainability indicators as the basis for evaluating alternatives. Importantly, the type of indicators that emerge is directly linked to the dimensions each methodology prioritizes.

A. Optimization and Decision-Making Approaches

Techno-economic methodologies remain among the most widely used approaches in rural electrification planning due to their strong emphasis on engineering design and financial optimization. These methods generally aim to minimize cost metrics such as the Net Present Cost (NPC) and the Levelized Cost of Electricity (LCOE) [4], [12], while evaluating technical performance through indicators related to energy demand, system sizing, renewable penetration, and operation and maintenance (O&M) costs [4], [6].

Recent developments have expanded techno-economic methodologies through the incorporation of GIS-based tools, satellite imagery, and machine learning techniques, enabling electrification planning in data-scarce regions. For instance, the approach proposed by Domínguez et al. (2024) enables building-level LCOE estimation for comparing centralized and decentralized alternatives [4], while Dimovski et al. (2024) use open-source data and machine learning to estimate demand and optimize grid configurations [13].

In parallel, MCDM methodologies were developed to address the complexity of balancing multiple sustainability objectives associated with the Energy Trilemma: equity in access, energy security, and environmental sustainability [10]. Within these frameworks, sustainability indicators are formalized as evaluation criteria for comparing and ranking technological alternatives [14]. Models such as the Hybrid Clean Electricity Supply framework incorporate indicators related to reliability, environmental performance, employment generation, land use, and social acceptance alongside traditional technical and economic metrics [6], [12].

Although these approaches improve transparency and facilitate trade-off analysis, they remain strongly oriented toward technical and economic optimization. Social and institutional dimensions are frequently treated as secondary constraints rather than integral components of the system, limiting the ability of these methodologies to capture the socio-economic dynamics that ultimately determine long-term sustainability [11], [12].

B. Sustainability and Participatory Frameworks

To overcome the limitations of optimization-oriented approaches, several methodologies have incorporated broader sustainability and participatory perspectives. Sustainability indicator frameworks explicitly organize evaluation criteria across technical, economic, environmental, social, and institutional dimensions. One of the most representative contributions is the framework proposed by Ilskog (2008a), which defines 39 indicators functioning as "message carriers" capable of reflecting the overall balance and performance of electrification systems [15].

These approaches emphasize that technical efficiency alone does not guarantee sustainability. Electrification initiatives may fail if institutional capacity is weak or if social acceptance remains limited [15], [16]. Consequently, sustainability-oriented frameworks incorporate a broader range of indicators, including user satisfaction, local ownership, and staff capacity [1], [15]. However, their practical implementation often requires extensive field data and long-term monitoring, limiting their applicability in isolated and data-scarce environments [11], [15].

Participatory and socio-institutional methodologies further extend this perspective by placing communities at the center of the planning process. In Colombia, the Rural Sustainable Energization Plans (PERS) adopt the concept of "energization," linking electricity access with productive development and regional economic activities [17]. Within these methodologies, indicators frequently emerge through participatory appraisal processes and include variables associated with social organization, empowerment, decision-making processes, and productive uses of energy [17], [18], [19]. By incorporating local priorities and community participation, these approaches strengthen social appropriation and reduce the risk of infrastructure abandonment. Nevertheless, they often lack the technical and economic rigor required for large-scale planning and may depend heavily on time-consuming primary data collection processes [11], [17], [20].

C. Structural Limitations of Current Methodologies

Despite their differences, existing methodological approaches share several structural limitations that directly affect both electrification planning and the selection of sustainability indicators. First, most methodologies evaluate technical, economic, environmental, social, and institutional dimensions independently, without adequately capturing the interactions and feedback loops between them [11], [20]. Consequently, improvements in one dimension may negatively affect others, compromising the long-term sustainability of electrification projects.

Second, although literature proposes numerous sustainability indicators, few methodologies provide mechanisms for prioritizing indicators according to local conditions or productive dynamics. As a result, standardized indicator sets are frequently applied without considering the specific characteristics of isolated territory. Third, there remains a persistent bias toward technical and economic optimization. While these dimensions are essential, their dominance frequently leads to the neglect of social and institutional factors that are critical for long-term sustainability. Previous studies have shown that even technically optimal systems may fail if they are not socially accepted or institutionally supported [21].

Finally, many methodologies depend on detailed operational and socio-economic datasets that are rarely available in isolated and non-interconnected communities. This limitation creates a gap between theoretical planning models and their practical applicability in emerging countries [11], [13], [20].

D. WEF Nexus as an Integrated Approach

Given these limitations, recent research increasingly recognizes the need for systemic approaches capable of integrating interactions between sustainability dimensions. In this context, the Water–Energy–Food (WEF) Nexus provides a valuable conceptual framework by explicitly addressing the interdependence between energy access, water management, and food production systems [22].

In isolated rural communities, electricity plays a central enabling role in water pumping, treatment, and distribution processes necessary for public health and climate resilience [23].

Similarly, access to electricity supports irrigation, agro-processing, and cold storage systems, contributing to reduced food losses and increased productivity [24].

Beyond improving service provision, the integration of energy with water and food systems can strengthen local livelihoods and promote productive activities capable of sustaining electrification infrastructure over time [11], [17], [24]. From this perspective, sustainability assessment cannot rely exclusively on isolated technical or economic indicators but instead requires integrated metrics capable of representing cross-sector interactions and trade-offs.

E. Comparative Analysis of Methodological Approaches Toward the Identification of Sustainability Indicator

The diversity of methodologies discussed in the literature demonstrates that no single approach fully addresses the complexity of rural electrification in isolated and vulnerable contexts. To analyze how current methodologies incorporate sustainability considerations, a comparative assessment of 19 representative approaches identified in the literature was conducted. The evaluation considered the degree of integration of five sustainability dimensions: Technical, Economic, Environmental, Social, and Institutional.

Rather than assigning a single global score, each methodology was independently evaluated for every sustainability dimension using a five-level qualitative scale, where 1 indicates that the dimension is not addressed and 5 represents a core methodological component (see Fig. 1). This assessment captures how explicitly and systematically each sustainability dimension is integrated into the methodological structure, evaluation criteria, and decision-making process.

Fig. 2 summarizes the comparative assessment results, highlighting important methodological differences across the evaluated approaches. In general, techno-economic methodologies exhibit strong integration of technical and economic dimensions but weaker incorporation of institutional and environmental aspects. Conversely, participatory and sustainability-oriented frameworks tend to provide a more balanced treatment of social and institutional dimensions. To complement this analysis,

Table I presents a structured synthesis of the methodologies identified in the literature, including their sustainability focus, applicability in data-scarce environments, and degree of integration of the WEF Nexus perspective. Overall, the comparative review demonstrates that rural electrification planning in emerging countries has traditionally relied on technical, economic, environmental, social, and institutional indicators to structure and evaluate electrification initiatives [5], [11], [15].

However, despite the rigor applied to individual dimensions, most analytical frameworks still operate under a predominantly linear logic that overlooks interdependencies between sustainability dimensions [11], [20], [23]. Consequently, improvements in one dimension may generate trade-offs or unintended impacts in others, particularly in isolated and vulnerable communities characterized by social fragility and limited data availability [22], [24], [25].

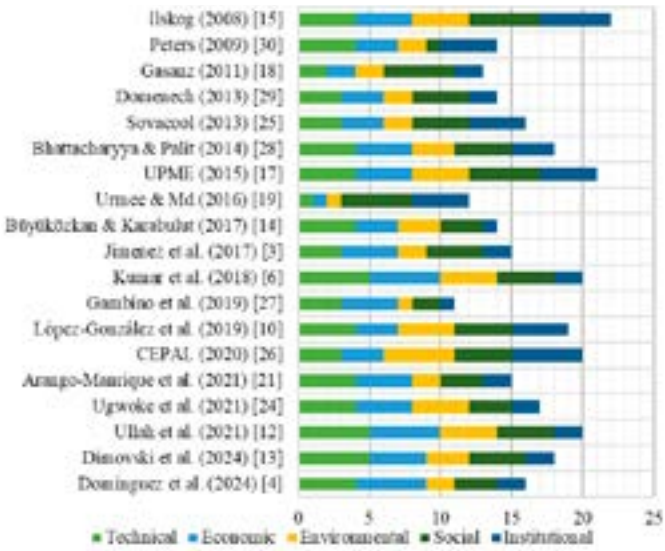


Figure 2. Sustainability dimension assessment of rural electrification methodologies. Source: Own Elaboration

TABLE I. COMPARATIVE EVALUATION OF RURAL ENERGIZATION METHODOLOGIES. SOURCE: OWN ELABORATION.

Ref	Methodology / Model Description	Application Context	Identified Indicators by Dimension	Applicability in Data-Scarce Environments	WEF Nexus (Involvement & Justification)
[4]	A high-resolution geospatial model that evaluates electrification alternatives by calculating the Levelized Energy Cost (LEC) at an individual building level	Designing local micro-grids and stand-alone systems for dispersed rural settlements	**Tech:** solar radiation, peak power **Econ:** LEC, O&M costs **Soc:** building typology (residential vs. service)	**Partially.** It relies on exact georeferenced coordinates for every load, which is difficult in areas without updated data	**Not involved.** It treats energy supply as a technical silo without modeling feedbacks with water or food systems
[13]	An optimization framework using machine learning and open-source data to define grid topology and electrification strategies	Planning national and regional electrification strategies comparing grid extension to micro-grids	**Tech:** network topology, capacity **Econ:** investment costs **Soc:** wealth index, satellite night-time lights	**Yes.** Highly robust for areas without census data as it uses satellite imagery and Machine Learning to extrapolate energy needs	**Indirect involvement.** Uses "food insecurity" as a passive characterization layer but not as a dynamic design driver
[12]	A multi-criteria framework that evaluates 100% renewable systems based on five quantitative sustainability pillars	Optimizing the design and technical configuration of hybrid renewable systems for rural townships	**Tech:** reliability **Econ:** life cycle cost **Env:** emissions **Soc:** job creation **Inst:** energy policy	**Partially.** Model accuracy depends on local meteorological series which are often missing in remote zones	**Moderate involvement.** Includes agricultural loads in demand profiling but does not analyze systemic impacts on food security

Ref	Methodology / Model Description	Application Context	Identified Indicators by Dimension	Applicability in Data-Scarce Environments	WEF Nexus (Involvement & Justification)
[24]	A planning framework that simulates demand from the "bottom-up" using reference buildings for agrarian communities	Regional strategic planning to identify priority sites for energy access in low-income communities	**Tech:** load profiles **Env:** mitigation potential **Soc:** usage type (housing/agro) **Econ:** operating costs	**Yes.** Designed for environments without previous metering by using building typologies as consumption proxies	**High involvement.** Explicitly integrates agrivoltaics and links energy demand to irrigation and agro-processing
[21]	A strategic methodology for incorporating distributed resources through business models designed to attract private investment	Technical and financial planning of business models for isolated micro-grids	**Tech:** DER capacity **Econ:** investor profitability, financial viability **Soc:** demand-side participation	**Partially.** While economic data can be estimated, it still requires renewable resource series for technical rigor	**Not involved.** The focus is strictly limited to the energy transition and corporate business viability
[26]	A methodological guide for systemic governance to strengthen institutional capacities in integrated resource management	Evaluating and designing national public policies and multi-sectoral actions	**Env:** ecosystem resilience **Soc:** social well-being **Inst:** policy coherence, inter-institutional coordination	**No.** Depends on perfectly harmonized sectoral data (water, energy, agro), which is almost non-existent in rural areas	**Central axis.** Treats water, energy, and food as an indivisible system to manage synergies and trade-offs
[10]	A hierarchical prioritization framework based on the core values of equity, security, and environmental sustainability	Prioritizing and selecting project portfolios at a national scale for universal access	**Tech:** energy security **Env:** fragile ecosystems **Soc:** community organization, equity **Inst:** political alignment	**Yes.** Applicable through the use of population clusters and social infrastructure proxies derived from censuses	**Moderate involvement.** Defines energy specifically as a tool to enable food refrigeration and water pumping
[27]	A market assessment methodology used to profile loads with high precision before micro-grid deployment	Preliminary planning and energy needs assessment for "greenfield" micro-grid project pipelines	**Eco:** Willingness to Pay, Ability to Pay **Soc:** productive use potential **Tech:** current fuel substitute consumption	**Yes.** Uses current spending on kerosene or batteries as a proxy to estimate future electricity demand	**Not involved.** Focuses on market viability and load profiling without dynamic modeling of nexus interactions
[6]	A hybrid framework that merges decision analysis with optimization to design scalable micro-grids	Planning and selecting robust micro-grid configurations for remote villages	**Tech:** reliability, scalability **Econ:** Net Present Cost, Cost of Energy **Env:** noise, emissions **Soc:** public health, social acceptance.	**Partially.** Uses expert judgment to fill data gaps, but technical optimization still requires local resource data	**Moderate involvement.** Includes "food production" and "health" as indicators, recognizing energy's enabling role
[3]	A user-centered planning methodology that prioritizes quality-of-life improvements in technical sizing	Planning and designing isolated micro-grids where human well-being is the primary priority	**Tech:** technical sizing **Econ:** replacement costs **Soc:** drinking water availability, quality of life	**Partially.** Requires generating community profiles from scratch, which implies extensive on-site data collection	**Moderate involvement.** Directly links energy supply to the provision of drinking water and health services
[14]	A group decision-making method for ranking renewable energy project alternatives	Evaluating and ranking specific projects within an investment portfolio	**Tech:** technological performance **Env:** water consumption **Soc:** impact on farming activities **Eco:** basic financial metrics	**Partially.** Requires detailed performance data for each technology alternative, which can be scarce in rural sites	**Moderate involvement.** Considers water consumption and agricultural impacts as social and environmental evaluation criteria
[19]	A framework based on the "diffusion of innovation" theory to evaluate community attitudes toward technology	Preliminary evaluation of the acceptability of electrification programs before implementation	**Soc:** cultural attitudes, perceived needs **Inst:** political acceptance	**Yes.** High applicability in zones without data as it is based on qualitative observation and surveys	**Not involved.** Limited strictly to the dimension of human behavior and technology adoption
[17]	An integral planning model that links energy to productivity and regional entrepreneurship in Colombia	Regional policy planning and formulation of "integral projects" in Non-Interconnected Zones	**Soc:** citizen participation, productive uses **Tech:** sustainable solutions **Inst:** local management. **Eco:** income generation.	**Partially.** Although it addresses scarcity, it solves it through expensive and time-consuming on-site primary data collection	**High involvement.** The "integral project" concept pairs energy with agro-processing or water access to ensure viability
[28]	An integrated analytical approach for evaluating micro-grid impacts on rural development in South Asia	Evaluating the effects and sustainability of implemented rural micro-grid programs	**Tech:** load capacity **Econ:** financial viability **Soc:** usability, drudgery reduction **Inst:** local ownership	**Medium.** Requires tracking account books and user interviews, which demands an operational presence	**Moderate involvement.** Monitors energy use in clinics and income-generating activities within the community
[25]	A qualitative analysis of factors responsible for the success or failure of energy access programs	Designing national strategies and building institutional capacity for large-scale programs	**Inst:** political leadership, technical standards **Soc:** community ownership **Eco:** income generation	**Partially.** Depends on the transparency and availability of historical records from national programs	**Moderate involvement.** Highlights the coupling of energy with irrigation and crop processing as a key lesson
[29]	A techno-social sizing methodology for isolated systems based on local stakeholder opinions	Technical and social design of small isolated renewable systems for tiny communities	**Tech:** wind/solar potential **Soc:** stakeholder feedback in design	**Yes.** High applicability through participatory diagnosis tools to build basic demand profiles	**Not involved.** Restricted to domestic needs and lighting without integrating water or food systems

Ref	Methodology / Model Description	Application Context	Identified Indicators by Dimension	Applicability in Data-Scarce Environments	WEF Nexus (Involvement & Justification)
[18]	A methodology based on participatory rural appraisal for community self-management of services	Implementation and community management of small isolated individual systems	**Soc:** empowerment, self-management, community ownership **Tech:** solar system configuration	**Yes.** Ideal for areas without data, as it builds its baseline through direct dialogue and social observation	**Not involved.** Focus is almost entirely on social organization for basic solar lighting
[30]	An evaluative tool aimed at ensuring the causality of rural electrification impacts before investment	Pre-investment evaluation for large-scale international cooperation programs	**Tech:** design alignment **Inst:** compliance with national plans **Eco:** spending capacity	**Partially.** Uses rapid cross-sectional surveys to simulate behavior but requires comparable control groups	**Not involved.** Treats improvements in water or agro as possible outcomes rather than dynamic variables
[15]	A pioneering manual proposing 39 indicators across five sustainability dimensions	Post-implementation evaluation and long-term impact monitoring of electrification programs	**Tech:** O&M, losses. **Econ:** profitability, financial viability, productive uses, employment. **Env:** emissions. **Soc:** Service availability, credit, satisfaction. **Inst:** gender equity, Capacity strengthening, stakeholder participation	**No.** Extremely data-intensive (massive surveys and audits), making it unfeasible for early planning phases	**Moderate involvement.** Tracks cross-sector impacts such as clinic electrification and energy use for milling

IV. Structured Inventory of Sustainability Indicators

The comparative analysis of existing methodologies shows that, although no single standardized framework exists for sustainable rural electrification planning, most approaches converge around a common set of multi-dimensional sustainability indicators [15], [28]. These indicators are central for evaluating the technical, economic, environmental, social, and institutional performance of electrification initiatives in isolated and rural contexts.

This section presents a structured inventory of sustainability indicators organized according to their primary sustainability dimension. In addition to identifying the indicators most frequently used in the literature, the analysis seeks to provide a practical and context-sensitive basis for their application in emerging countries and data-scarce environments.

Each indicator is also classified according to its level of data intensity, ranging from low-data indicators based on qualitative information or proxy variables to high-data indicators requiring operational records or historical datasets [13], [24]. This distinction is particularly relevant in isolated territories, where limited information frequently constrains the applicability of conventional planning methodologies. By organizing indicators according to both sustainability dimension and data requirements, this inventory provides the foundation for the subsequent phase of prioritization and integration of indicators within a more systemic rural electrification planning framework.

A. Technical dimension

The technical dimension constitutes the operational foundation of rural electrification systems, focusing on supply reliability and the adequacy of system design to meet local demand. Indicators such as reliability and system sizing evaluate whether infrastructure can provide stable and sufficient electricity while avoiding underutilization or operational failure [6], [12].

In isolated and off-grid contexts, the application of these indicators is often constrained by the lack of historical consumption records and operational data. To address this limitation, recent approaches incorporate lower-data-intensity methods, such as demand estimation through reference buildings or representative consumption profiles, allowing energy requirements to be approximated without extensive monitoring infrastructure [24].

As summarized in Table II, the identified indicators provide the technical basis for evaluating the adequacy, robustness, and operational sustainability of rural electrification systems under data-constrained conditions.

Table II. Technical sustainability indicators identified for rural electrification planning. Source: Own elaboration.

Indicator	General Definition	Calculation / Proxy	Data Intensity	Ref
Reliability / Capacity Shortage	Probability of non-provided load or supply deficit	$\frac{\sum(E_{load} - E_{gen})}{E_{load}}$	High	[12], [15], [24]
Sizing / Capacity	Optimal capacity of system components to meet estimated peak load	P_{rated}	Medium	[3], [4], [13], [21]
Active Demand	Users' capacity to modify consumption based on market signals or incentives	Percentage of peak load reduction or load factor shift	High	[1], [31], [32]
Demand Profile	Estimation of daily load curves for system design	Load Curve	Low / Med	[24], [27], [29]
O&M Performance	Technical health and adherence to maintenance standards	Failure ratio or compliance audits	Med / High	[15], [30]

B. Economic dimension

Beyond technical feasibility, the economic dimension evaluates the financial viability and long-term affordability of energy services. The literature consistently identifies the Levelized Cost of Energy (LCOE) and Net Present Cost (NPC) as key indicators for comparing technological alternatives and assessing economic performance [4], [12].

However, in isolated and low-income communities, economic sustainability cannot be evaluated solely through infrastructure costs. Recent approaches therefore incorporate indicators such as Willingness to Pay (WTP), Ability to Pay (ATP), and productive uses of energy, linking electrification with local economic capacity and productive development [17],

[27]. As shown in Table III, the identified indicators combine traditional techno-economic metrics with context-sensitive variables related to affordability and local economic conditions.

TABLE III. ECONOMIC SUSTAINABILITY INDICATORS IDENTIFIED FOR RURAL ELECTRIFICATION PLANNING. SOURCE: OWN ELABORATION.

Indicator	General Definition	Calculation / Proxy	Data Intensity	Ref
LCOE	Average cost per unit of energy generated over the system's life.	$\frac{\sum total\ costs}{\sum E_{generated}}$	Medium	[15], [21], [24]
NPC	Present value of all costs minus revenues and salvage value.	$Capex + O\&M\ cost + Repl.\ Cost - Salvage\ Value$	Medium	[3], [6], [12]
Capital Investment	Total upfront funding required for deployment, R&D, and infrastructure.	Total Expenditure	Medium	[19], [33]
Productive uses	Energy used for income-generating activities.	Percentage of energy for business / revenues	Medium	[15], [17], [25], [28]
WTP /ATP	Final user's willingness and ability to pay for the service.	Percentage of energy expense / household income	Medium	[27], [30]

C. Environmental dimension

The environmental dimension evaluates the extent to which electrification solutions minimize ecological impacts and contribute to long-term sustainability goals. While conventional approaches primarily focus on Greenhouse Gas Emissions (GHGE), more comprehensive methodologies increasingly incorporate indicators related to ecosystem resilience, renewable penetration, and resource use, particularly in environmentally sensitive regions [10], [23].

In isolated rural contexts, these indicators are essential for evaluating environmental impacts without compromising local ecosystems or natural resources. Moreover, recent approaches demonstrate that environmental assessments can rely on lower-data-intensity methods, such as geospatial analysis and qualitative vulnerability scales, reducing dependence on extensive field monitoring [14]. Table IV summarizes the principal environmental indicators identified in the literature.

TABLE IV. ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY INDICATORS IDENTIFIED FOR RURAL ELECTRIFICATION PLANNING. SOURCE: OWN ELABORATION.

Indicator	General Definition	Calculation / Proxy	Data Intensity	Ref
Emissions GHGE	Total amount of CO_2 or other gases emitted by the system	$E_{fossil} * f_{emissions}$	Medium	[6], [10], [12], [15]
Ecosystem Resilience	Impact on protected areas or biodiversity	Qualitative scale of vulnerability	Low	[10], [26]
Renewable Fraction	Percentage of total energy from non-fossil sources.	$1 - \frac{E_{fossil}}{E_{generated}}$	Medium	[12], [15]

D. Social dimension

The social dimension evaluates how electrification initiatives influence human well-being, equity, and community empowerment. Recent literature increasingly emphasizes indicators that go beyond energy access itself, including social acceptance, community participation, employment generation, and quality-of-life improvements [15], [28].

One relevant contribution is the inclusion of indicators associated with drudgery reduction, which evaluates how access to electricity reduces physically demanding labor through mechanization and improved access to services [15], [28]. Likewise, indicators related to social acceptance and community organization strengthen local ownership and reduce the risk of infrastructure abandonment [18], [19]. Table V summarizes the principal social indicators identified in the literature.

TABLE V. SOCIAL SUSTAINABILITY INDICATORS IDENTIFIED FOR RURAL ELECTRIFICATION PLANNING. SOURCE: OWN ELABORATION.

Indicator	General Definition	Calculation / Proxy	Data Intensity	Ref
Social Participation	Level of community organization and self-management.	Empowerment qualitative scale	Medium	[17], [18], [25]
Job Creation	Local employment opportunities generated by the project.	New jobs created / Man-hours of created jobs	Medium	[12], [14], [16]
Social Acceptance	Community's agreement level with the technology.	Likert satisfaction scale [34]	Medium	[6], [19], [24], [34]
Quality of Life	Improvements in health or reduction of manual labor.	Perceived social impact index	Medium	[3], [15], [28]

E. Institutional dimension

The institutional dimension evaluates governance structures, management capacity, and policy alignment required to ensure the long-term continuity of electrification projects beyond the initial investment phase. Indicators such as local ownership and management capacity are frequently associated with the operational sustainability of rural energy systems [15], [25].

TABLE VI. INSTITUTIONAL SUSTAINABILITY INDICATORS IDENTIFIED FOR RURAL ELECTRIFICATION PLANNING. SOURCE: OWN ELABORATION.

Indicator	General Definition	Calculation / Proxy	Data Intensity	Ref
Policy Coherence	Alignment with national plans and ODS.	ODS goal linkage scale	Low	[10], [12], [26], [30]
Local Management	Administrative capacity of the local operator.	Percentage of local partners / years in business	Medium	[15], [17], [25], [28]
Transparency	Presence of accountability and auditing mechanisms.	Binary (Audit Existence)	Medium	[15]

This dimension also emphasizes policy coherence with national development plans and the Sustainable Development Goals, since institutional alignment plays a key role in securing regulatory support, financing opportunities, and long-term viability [22], [30]. Recent approaches additionally consider transparency and institutional equity as relevant elements for strengthening governance and community trust. Table VI

summarizes the principal institutional indicators identified in the literature.

V. Meta-indicators for Systemic Sustainability Assessment

Traditional rural electrification planning often evaluates technical, economic, social, environmental, and institutional dimensions separately. However, the sustainability of isolated energy systems depends not only on the performance of each dimension individually, but also on the interactions between them.

To address this limitation, this research identifies a set of meta-indicators, or composite indices, capable of integrating multiple sustainability dimensions into a single evaluative framework. According to the literature, these indicators act as "message carriers" that synthesize multidimensional information into interpretable metrics, facilitating the identification of trade-offs and synergies across rural electrification systems [35], [36]. Composite indicators have also been widely applied in multidimensional poverty and human development assessment [37]. For example, improvements in technical reliability can enhance healthcare, education, productive activities, and overall quality of life. Composite indices such as the Multidimensional Poverty Index (MPI), Human Development Index (HDI), and Energy Development Index (EDI) help capture these broader impacts by linking energy access with social and economic outcomes.

Similarly, integrated approaches such as the WEF Nexus increasingly rely on composite indicators to evaluate interdependencies and trade-offs between sectors [38], particularly in isolated rural areas where energy access directly affects water availability, food production, and livelihoods. Table VII summarizes the principal meta-indicators identified in the literature for systemic sustainability assessment in isolated rural contexts.

Table VII. Proposed Meta-indicators for Systemic Sustainability Integration. Source: Own elaboration.

Meta-indicator	Integrated Dimensions	Systemic Utility	Ref
Multidimensional Poverty Index (MPI)	Social, Economic, Technical	Measures energy access as a vital vector for health, education, and basic housing quality.	[39], [40]
Rural Development Index (RDI)	Social, Economic, Environmental	Specifically monitors rural progress by aggregating local demographic trends with socio-economic welfare.	[37]
Environmental Performance Index (EPI)	Environmental, Social	Reduces environmental impacts on human health and promotes the long-term vitality of local ecosystems.	[23]
Sustainable Economic Welfare (ISEW)	Economic, Social, Environmental	Adjusts traditional economic growth (GDP) by penalizing for environmental degradation and social inequality.	[23], [35]
Energy Development Index (EDI)	Technical, Social, Economic	Evaluates the transition from traditional to modern fuels and its direct impact on human development.	[1], [33]
WEF Nexus Index	Environmental, Technical, Economic	Explicitly quantifies the interdependencies and trade-offs between water, energy, and food systems.	[22], [38]
Technology Achievement Index (TAI)	Technical, Social	Measures a society's capacity to create and absorb innovations, essential for maintaining decentralized systems.	[36]

VI. From Indicator Identification to Systemic and Context-Aware Electrification Planning

Although the methodologies and indicators identified throughout this review provide a valuable foundation for sustainable rural electrification planning, most existing approaches still evaluate sustainability dimensions in a relatively static and isolated manner. In practice, isolated rural communities operate as complex socio-technical systems in which technical, economic, environmental, social, and institutional variables interact dynamically over time [23], [39].

As a result, improvements in a single indicator do not necessarily guarantee overall sustainability, since actions intended to strengthen one dimension may unintentionally weaken another [15]. For example, maximizing technical reliability through large battery storage systems can improve service continuity, but may simultaneously increase the NPC, maintenance complexity, and long-term dependence on external technical support [12]. Similarly, prioritizing the lowest-cost electrification alternative may negatively affect social acceptance, productive development, or environmental performance due to fuel price and increased emissions [10].

These interactions become particularly critical in isolated and vulnerable territories, where energy systems are strongly connected to productive activities, water access, and food security [26]. Consequently, sustainable electrification planning cannot rely on rigid or universal evaluation frameworks. Instead, indicators and planning criteria must be adapted and prioritized according to the specific characteristics, productive dynamics, and development priorities of each community [17].

The relevance of this context-sensitive perspective becomes evident when comparing different rural livelihoods. For instance, the energy requirements of a fishing community differ substantially from those of an agricultural community. In fishing villages, continuity and reliability of electricity supply are essential for maintaining cold chains required for fish preservation and commercialization [41]. In contrast, agricultural communities may operate under more flexible demand profiles, where irrigation activities can be concentrated during periods of high solar resource availability [24]. Under these conditions, photovoltaic systems without large battery storage may directly power irrigation pumping and water storage during daylight hours, reducing both investment costs and operational complexity.

These examples demonstrate that the sustainability of electrification solutions depends not only on technological performance, but also on the degree to which energy systems adapt to local socio-economic and environmental conditions [19], [41]. Therefore, future rural electrification methodologies should evolve toward adaptive and context-aware planning frameworks capable of identifying causal relationships between sustainability dimensions, prioritizing indicators according to

context conditions and data availability, including productive dynamics as central drivers of energy demand, and balancing trade-offs between technical, economic, environmental, social, and institutional objectives [24], [26], [42].

In this context, the identification and prioritization of sustainability indicators should not be understood as a fixed checklist, but rather as a dynamic process that evolves according to the specific development priorities of each isolated community [15]. Ensuring that energy acts as a true catalyst for resilient development requires moving toward a holistic understanding of rural electrification systems as interconnected and indivisible socio-technical structures [17], [26].

VII. Concluding Remarks

This paper analyzed the principal methodological approaches currently used for sustainable rural electrification planning in isolated and vulnerable territories of emerging countries, with a particular focus on how these methodologies define and use sustainability indicators. This review demonstrated that most existing approaches rely on technical, economic, environmental, social, and institutional dimensions to evaluate electrification alternatives. However, the analysis also revealed important limitations, including the lack of integration between sustainability dimensions, the limited adaptability of indicators to local contexts, and the strong dependence on high-resolution data that are rarely available in isolated rural areas.

In response to these limitations, this work developed a structured inventory of sustainability indicators organized according to their primary sustainability dimension and their level of data intensity. The proposed classification contributes to fill the gap between theorical planning frameworks and the practical realities of Non-Interconnected Zones and other data-scarce environments. In addition, the comparative analysis of methodologies highlighted the importance of incorporating systemic perspectives, such as the WEF Nexus, to better understand the interactions between energy, water, food systems, and local livelihoods. These findings reinforce the need to move beyond isolated technical or economic assessments toward more integrated and context-sensitive planning approaches.

Finally, the results suggest that sustainability indicators for rural electrification should not be treated as static or universal evaluation criteria. Instead, their selection and prioritization must adapt to the productive activities, territorial conditions, and development priorities of each community. In this sense, this paper provides a foundation for the future development of adaptive and systemic decision-making methodologies capable of identifying interdependencies between sustainability dimensions and supporting context-aware electrification planning in isolated rural territories.

VIII. Acknowledgment

The authors acknowledge that this paper was developed within the framework of the project “Identification of Strategies and Criteria for Sustainable Electrification in Isolated Rural Communities of Emerging Economies” (HERMES code 62627), supported by the Office of the Associate Dean for Research and Extension of the Faculty of Engineering and Architecture at Universidad Nacional de Colombia.

References

[1] S. C. Bhattacharyya and D. Palit, *Mini-Grids for Rural Electrification of Developing Countries*. in Green Energy and Technology. Cham: Springer International Publishing, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-04816-1.

[2] IEA, “Access to electricity stagnates, leaving globally 730 million in the dark,” Paris, 2025. Accessed: May 03, 2026. [Online]. Available: https://www.iea.org/commentaries/access-to-electricity-stagnates-leaving-globally-730-million-in-the-dark

[3] R. Jimenez, “Barriers to electrification in Latin America: Income, location, and economic development,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 15, pp. 9–18, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.esr.2016.11.001.

[4] J. Domínguez, C. Bellini, L. Arribas, J. Amador, M. Torres-Pérez, and A. M. Martín, “IntiGIS-Local: A Geospatial Approach to Assessing Rural Electrification Alternatives for Sustainable Socio-Economic Development in Isolated Communities—A Case Study of Guasasa, Cuba,” *Energies (Basel).*, vol. 17, no. 15, Aug. 2024, doi: 10.3390/en17153835.

[5] S. C. Bhattacharyya and D. Palit, “Mini-grid based off-grid electrification to enhance electricity access in developing countries: What policies may be required?,” *Energy Policy*, vol. 94, pp. 166–178, 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.04.010.

[6] A. Kumar, A. R. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar, and R. C. Bansal, “A Novel Methodological Framework for the Design of Sustainable Rural Microgrid for Developing Nations,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 24925–24951, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2832460.

[7] UPME, “Plan Energetico Nacional Colombia: Ideario Energético 2050,” *Unidad de Planeación Minero Energética, Republica de Colombia*, p. 184, 2015.

[8] Ministerio de Minas y Energía, “Plan Nacional de Energización Rural.” Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: https://siipo.dnp.gov.co/vistaciuddanodetallato/5

[9] Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), and United States Agency International Development (USAID), *Guía para elaboración de un plan de energización rural sostenible*. Bogotá, 2015.

[10] A. López-González, L. Ferrer-Martí, and B. Domenech, “Sustainable rural electrification planning in developing countries: A proposal for electrification of isolated communities of Venezuela,” *Energy Policy*, vol. 129, pp. 327–338, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.02.041.

[11] A. Márquez-Bedoya, S. X. Carvajal-Quintero, and D. López-García, “Energía sostenible en zonas aisladas de América Latina: revisión de la integración del enfoque WEF Nexus para impulsar el desarrollo rural,” *Información tecnológica*, vol. 36, no. 1, pp. 1–14, Feb. 2025, doi: 10.4067/s0718-07642025000100001.

[12] Z. Ullah, M. R. Elkadeem, K. M. Kotb, I. B. M. Taha, and S. Wang, “Multi-criteria decision-making model for optimal planning of on/off grid hybrid solar, wind, hydro, biomass clean electricity supply,” *Renew. Energy*, vol. 179, pp. 885–910, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.07.063.

[13] A. Dimovski, Z. Pezham, M. Ahmadi, L. M. F. Albertini, D. I. Edeme, and M. Merlo, “GIS-facilitated procedure for optimal rural electrification planning: A case study in Naeder, Ethiopia,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 82, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.esd.2024.101520.

[14] G. Büyüközkan and Y. Karabulut, “Energy project performance evaluation with sustainability perspective,” *Energy*, vol. 119, pp. 549–560, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.087.

[15] E. Ilskog, “Indicators for assessment of rural electrification—An approach for the comparison of apples and pears,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 7, pp. 2665–2673, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.03.023.

[16] E. Ilskog, “Rural electrification sustainability indicators:-Manual for field workers,” *KTH University Press*, no. January, 2008, [Online]. Available: http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:25019

[17] UPME, *Guía para elaboración de un plan de energización rural sostenible*. 2015. [Online]. Available: http://www.siel.gov.co/portals/0/fondos/Guia_de_un_PERS.pdf

[18] J. J. del V. Gasanz, “Guía metodológica para el desarrollo de proyectos de electrificación rural mediante sistemas fotovoltaicos aislados,”

Universidad Carlos III de Madrid, 2011. Accessed: Feb. 28, 2023. [Online]. Available: https://core.ac.uk/download/pdf/29402427.pdf

[19] T. Urmee and A. Md, "Social, cultural and political dimensions of off-grid renewable energy programs in developing countries," *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 159–167, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.02.040.

[20] D. López García, J. D. Beltrán Gallego, and S. X. Carvajal Quintero, "Proposing Dynamic Pricing as an Alternative to Improve Technical and Economic Conditions in Rural Electrification: A Case Study from Colombia," *Sustainability*, vol. 15, no. 10, p. 7985, May 2023, doi: 10.3390/su15107985.

[21] A. Arango-Manrique, D. López-García, C. Arango-Lemoine, and S. X. Carvajal-Quintero, "Business Model Proposal for Energy Transition towards Operational and Economic Sustainability for Rural Electrification: Colombian Case," *Sustainability*, vol. 13, no. 8, p. 4308, Apr. 2021, doi: 10.3390/su13084308.

[22] CEPAL, "Guía Metodológica - Diseño de acciones con enfoque del Nexo entre agua, energía y alimentación para países de América Latina y el Caribe," 2020, Accessed: Feb. 28, 2023. [Online]. Available: https://www.cepal.org/es/publicaciones/46078-guia-metodologica-diseno-acciones-enfoque-nexo-agua-energia-alimentacion-paises

[23] A. Schuschny and H. Soto, "Guía metodológica Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible Andrés Schuschny," *Cepal*, p. 109, 2009.

[24] B. Ugwoke, S. Sulemanu, S. P. Corgnati, P. Leone, and J. M. Pearce, "Demonstration of the integrated rural energy planning framework for sustainable energy development in low-income countries: Case studies of rural communities in Nigeria," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110983.

[25] B. K. Sovacool, "A qualitative factor analysis of renewable energy and Sustainable Energy for All (SE4ALL) in the Asia-Pacific," *Energy Policy*, vol. 59, pp. 393–403, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.03.051.

[26] CEPAL, *Balance Preliminar de las Economías de América Latina y el Caribe*. 2020.

[27] V. Gambino, R. Del Citto, P. Cherubini, C. Tacconelli, A. Micangeli, and R. Giglioli, "Methodology for the Energy Need Assessment to Effectively Design and Deploy Mini-Grids for Rural Electrification," *Energies (Basel).*, vol. 12, no. 3, p. 574, Feb. 2019, doi: 10.3390/en12030574.

[28] S. C. Bhattacharyya, "Energy access programmes and sustainable development: A critical review and analysis," *Energy for Sustainable Development*, vol. 16, no. 3, pp. 260–271, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.esd.2012.05.002.

[29] B. Domenech Léga, "Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales," p. 238, 2013.

[30] J. Peters, "Evaluating Rural Electrification Projects," *Ruhr Economic Papers*, vol. 136, 2009, Accessed: Feb. 28, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/45137628_Evaluating_Rural_Electrification_Projects_-_Methodological_Approaches

[31] L. C. M. Blasques and J. T. Pinho, "Metering systems and demand-side management models applied to hybrid renewable energy systems in micro-grid configuration," *Energy Policy*, vol. 45, pp. 721–729, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.03.028.

[32] E. D. Obando-Paredes, D. López-García, and S. X. Carvajal-Quintero, "Integrating active demand into the distribution system using metaheuristic techniques," *The Journal of Engineering*, vol. 2024, no. 11, Nov. 2024, doi: 10.1049/tje2.70005.

[33] IEA, IRENA, United Nations Statistics Division, The World Bank, and World Health Organization, "Tracking SDG7 - The energy progress report," 2022. Accessed: Oct. 05, 2022. [Online]. Available: https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/sdg7-report2022-full_report.pdf

[34] H.-C. Chen, C.-H. Lee, T. B. W. Seekings, and L. B. Nguyen, "Assessing the Public's Social Acceptance of Renewable Energy Management in Taiwan," *Land (Basel).*, vol. 14, no. 1, p. 121, Jan. 2025, doi: 10.3390/land14010121.

[35] S. Angilella, P. Catalfo, S. Corrente, A. Giarlotta, S. Greco, and M. Rizzo, "Robust sustainable development assessment with composite indices aggregating interacting dimensions: The hierarchical-SMAA-Choquet integral approach," *Knowl. Based. Syst.*, vol. 158, pp. 136–153, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.knosys.2018.05.041.

[36] *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD, 2008. doi: 10.1787/9789264043466-en.

[37] I. Abreu, F. J. Mesías, and J. Ramajo, "Design and validation of an index to measure development in rural areas through stakeholder participation," *J. Rural Stud.*, vol. 95, pp. 232–240, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jrurstud.2022.09.022.

[38] I. El-Gafy, "Water–food–energy nexus index: analysis of water–energy–food nexus of crop's production system applying the indicators approach," *Appl. Water Sci.*, vol. 7, no. 6, pp. 2857–2868, Oct. 2017, doi: 10.1007/s13201-017-0551-3.

[39] R. C. Angulo Salazar, Y. Diaz Cuervo, and R. Pardo Pinzón, "Índice de Pobreza Multidimensional para Colombia (IPM-Colombia) 1997-2010," 2011.

[40] S. Alkire and J. Foster, "Counting and multidimensional poverty measurement," *J. Public Econ.*, vol. 95, no. 7–8, pp. 476–487, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.jpubeco.2010.11.006.

[41] A. Banal-Estañol, J. Calzada, and J. Jordana, "How to achieve full electrification: Lessons from Latin America," *Energy Policy*, vol. 108, pp. 55–69, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.05.036.

[42] K. E. Maani and R. Y. Cavana, "The Systems Thinker – Systems Methodology - The Systems Thinker." [Online]. Available: https://thesystemsthinker.com/systems-methodology/

WEEF 2026
(IFEES & GEDC)

Engineering Education That Transforms

September 22 – 25, 2026
Cartagena de Indias, Colombia



UNDERGRADUATE STUDENT PROJECTS

Powered by

Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI

Medición de la eficiencia en los departamentos de Colombia enfocado al PIB generado

Aileen Nicole Aristizabal Ordoñez
Corporación Universitaria Empresarial Alexander von Humboldt
Armenia
Quindío
aaristizabal064@cue.edu.co
0009-0007-2658-236X

***Resumen*—*El desarrollo económico regional constituye uno de los principales retos para la formulación de políticas públicas orientadas al crecimiento sostenible y a la optimización de recursos. En este contexto, la presente investigación evalúa la eficiencia relativa de los departamentos de Colombia mediante la aplicación del Análisis Envolvente de Datos (DEA) y el Índice de Productividad de Malmquist. El estudio emplea el modelo DEA CCR input-orientado, desarrollado por Charnes, Cooper y Rhodes, con el propósito de medir la capacidad de los departamentos para maximizar sus resultados económicos utilizando eficientemente los recursos disponibles. Como variables de entrada se consideran la extensión territorial, el presupuesto general, la población y la tasa de desocupación; mientras que las variables de salida corresponden a la tasa global de participación laboral, la balanza comercial y el Producto Interno Bruto (PIB). La investigación posee un enfoque multivariado y retrospectivo, utilizando datos abiertos correspondientes a los años 2018, 2020, 2021 y 2023 provenientes principalmente del DANE y bases de datos oficiales. Adicionalmente, se incorpora el Índice de Malmquist para analizar la evolución de la productividad y los cambios tecnológicos entre los periodos evaluados. Los resultados esperados permitirán identificar departamentos eficientes e ineficientes, establecer comparaciones relativas de desempeño y generar lineamientos estratégicos orientados a la mejora de la competitividad territorial y la asignación eficiente de recursos públicos.*

Palabras Clave—DEA-Input Orientado, Índice de Malmquist, productividad, PIB, optimización de recursos.

I. *Introducción*

La eficiencia resulta como uno de los principales factores asociados al crecimiento económico y al fortalecimiento de la competitividad territorial. En economías regionales heterogéneas, como la colombiana, los departamentos presentan diferencias significativas en términos de infraestructura, capacidad presupuestal, población, condiciones laborales y desempeño productivo, lo que genera brechas importantes en sus niveles de desarrollo económico y social. En consecuencia, surge la necesidad de implementar herramientas analíticas que permitan evaluar de manera objetiva la relación existente entre los recursos disponibles y los resultados obtenidos por cada territorio.

Tradicionalmente, el Producto Interno Bruto (PIB) ha sido utilizado como uno de los principales indicadores para medir el desempeño económico de una región. Sin embargo, un alto nivel de PIB no necesariamente implica una gestión eficiente de los recursos. Dos departamentos pueden alcanzar niveles similares de producción económica utilizando cantidades significativamente diferentes de insumos, lo que evidencia la importancia de analizar no solamente los resultados alcanzados, sino también la eficiencia relativa con la que dichos resultados son obtenidos.

En este contexto, el Análisis Envolvente de Datos (DEA, Data Envelopment Analysis) se consolida como una metodología ampliamente utilizada para la medición de eficiencia técnica en organizaciones, territorios y sistemas productivos. DEA corresponde a una técnica no paramétrica basada en programación lineal que permite comparar unidades homogéneas de decisión, conocidas como DMU (Decision Making Units), a partir de múltiples variables de entrada y salida. Su principal ventaja radica en la construcción de una frontera eficiente conformada por las mejores prácticas observadas, permitiendo identificar cuáles unidades operan eficientemente y cuáles presentan oportunidades de mejora.

El fundamento conceptual de la eficiencia técnica se deriva inicialmente de los planteamientos de Farrell (1957), quien define la eficiencia como la capacidad de obtener el máximo nivel de producción posible a partir de una combinación dada de recursos. Posteriormente, Charnes, Cooper y Rhodes (1978) desarrollaron el modelo DEA-CCR bajo el supuesto de rendimientos constantes a escala, permitiendo medir la eficiencia relativa mediante modelos de optimización matemática.

Asimismo, el análisis de productividad en el tiempo requiere metodologías dinámicas que permitan evaluar cambios en la eficiencia y en el progreso tecnológico. En este sentido, el Índice de Malmquist constituye una herramienta ampliamente utilizada para medir variaciones de productividad entre diferentes periodos temporales. Dicho índice permite descomponer los cambios productivos en variaciones asociadas a eficiencia técnica y cambios tecnológicos, proporcionando una visión más integral del desempeño de las unidades evaluadas.

Diversos estudios han aplicado DEA e índices de productividad en sectores económicos y territoriales. Chirinos y Urdaneta utilizaron DEA y el Índice de Malmquist para evaluar la eficiencia del sector avícola venezolano, identificando mejoras relacionadas con eficiencia técnica y progreso tecnológico. De igual forma, Schuschny aplicó DEA al análisis energético y de emisiones en América Latina, evidenciando la utilidad de estas metodologías para el estudio comparativo de sistemas complejos.

La presente investigación se enfoca en evaluar la eficiencia relativa de los departamentos de Colombia considerando variables económicas, sociales y territoriales. A diferencia de estudios tradicionales centrados únicamente en indicadores monetarios, este trabajo incorpora variables relacionadas con recursos físicos, condiciones laborales y participación económica, permitiendo una visión multidimensional del desempeño regional.

El problema central de investigación se formula de la siguiente manera: ¿Cómo podemos evaluar la dinámica del crecimiento económico y la productividad en los departamentos de Colombia?.

La importancia de esta investigación radica en su capacidad para proporcionar información estratégica orientada a la formulación de políticas públicas, asignación eficiente de recursos y fortalecimiento de la competitividad regional. Adicionalmente, los resultados permitirán identificar departamentos referentes en eficiencia y establecer comparaciones que sirvan como base para futuras estrategias de mejora territorial.

II. Referente Teórico

A. *Concepto de Eficiencia y Productividad*

La eficiencia constituye un concepto fundamental dentro del análisis económico y productivo. Según Coll y Blasco, la eficiencia se relaciona directamente con la capacidad de obtener el máximo nivel de producción utilizando una determinada cantidad de recursos o, de manera equivalente, producir una cantidad específica minimizando los insumos empleados.

Farrell (1957) distingue tres tipos principales de eficiencia: eficiencia técnica, eficiencia asignativa y eficiencia global. La eficiencia técnica hace referencia a la capacidad de una unidad para maximizar outputs con un conjunto dado de inputs; la eficiencia asignativa evalúa la utilización óptima de los recursos considerando sus costos relativos; mientras que la eficiencia global integra simultáneamente ambas dimensiones.

Por otra parte, la productividad corresponde a la relación existente entre productos generados e insumos utilizados. Aunque frecuentemente los conceptos de productividad y eficiencia son utilizados indistintamente, diversos autores señalan diferencias fundamentales entre ambos términos. Mientras la eficiencia evalúa el desempeño relativo respecto a una frontera óptima, la productividad mide simplemente la relación cuantitativa entre outputs e inputs.

B. *Análisis Envolvente de Datos (DEA)*

El Análisis Envolvente de Datos es una metodología no paramétrica basada en programación matemática que permite construir una frontera eficiente a partir de las mejores prácticas observadas dentro de un conjunto de unidades homogéneas. DEA fue desarrollado inicialmente por Charnes, Cooper y Rhodes en 1978 como una extensión de los trabajos de Farrell.

La técnica DEA presenta ventajas importantes frente a otros métodos de medición de eficiencia, debido a que permite trabajar simultáneamente con múltiples inputs y outputs sin requerir especificaciones funcionales previas sobre la relación entre variables. Además, posibilita identificar unidades eficientes e ineficientes, establecer benchmarks y determinar metas de mejora para las unidades evaluadas.

En la presente investigación se utiliza el modelo CCR input-orientado, el cual asume rendimientos constantes a escala y busca minimizar los insumos utilizados manteniendo constante el nivel de producción alcanzado. Matemáticamente, el modelo puede expresarse como:

$$\min\theta$$

Sujeto a:

$$Y\lambda \geq y_o$$

$$\theta x_o - X\lambda \geq 0$$

$$\lambda \geq 0$$

Donde:

- θ representa el índice de eficiencia técnica.
- X corresponde a la matriz de inputs.
- Y representa la matriz de outputs.
- λ corresponde al vector de ponderaciones.
- x_o y y_o representan la unidad evaluada.

Cuando $\theta=1$, la DMU es considerada eficiente; mientras que valores inferiores a uno indican ineficiencia relativa.

C. *Índice de Productividad de Malmquist*

El Índice de Malmquist constituye una herramienta orientada a medir cambios de productividad entre distintos periodos temporales. Su principal ventaja radica en la posibilidad de descomponer la variación productiva en dos componentes fundamentales: cambio en eficiencia técnica y cambio tecnológico.

De acuerdo con Färe et al. (1994), el índice permite evaluar si una unidad mejora su desempeño debido a una mejor utilización de recursos o debido al desplazamiento de la frontera tecnológica. Esta característica resulta particularmente relevante para estudios longitudinales sobre crecimiento económico y desempeño regional.

Su interpretación es directa:

- Valor > 1 indica mejora en la productividad.
- Valor = 1 indica estabilidad.
- Valor < 1 indica disminución en la productividad.

En el contexto de esta investigación, el Índice de Malmquist permitirá comparar la evolución de los departamentos colombianos durante los años 2018, 2020, 2021 y 2023, identificando tendencias de mejora o deterioro en productividad.

III. Metodología

La investigación presenta un enfoque cuantitativo, multivariado y retrospectivo, debido a que analiza múltiples

variables económicas y sociales utilizando información histórica correspondiente a diferentes periodos temporales.

A. Población y Unidades de Análisis

La población objeto de estudio está conformada por 21 departamentos de Colombia, considerados como Unidades de Toma de Decisión (DMU) dentro del modelo DEA.

B. Variables del Estudio

Las variables fueron seleccionadas considerando su influencia en el desempeño económico regional y su capacidad para representar adecuadamente los recursos utilizados y los resultados obtenidos.

1) Inputs (Entradas)

- Extensión territorial (Km²)
- Presupuesto general (miles de millones COP)
- Población (millones de habitantes)
- Tasa de desocupación (%)

2) Outputs (Salidas)

- Tasa global de participación laboral (%)
- Balanza comercial (miles de millones USD)
- Producto Interno Bruto – PIB (miles de millones COP)

La selección de variables responde a la necesidad de representar factores asociados a disponibilidad de recursos, capacidad económica y resultados productivos de cada departamento.

C. Fuente de Datos

La información utilizada proviene de fuentes oficiales de acceso abierto, principalmente:

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)
- Bases de datos departamentales
- Estudios previos relacionados con DEA y productividad regional

D. Procedimiento Metodológico

La metodología de la investigación fue estructurada de manera secuencial con el propósito de garantizar rigurosidad analítica en la medición de la eficiencia relativa y la evolución de la productividad de los departamentos de Colombia. El procedimiento integra herramientas de optimización matemática, análisis multivariado, programación computacional y modelos de frontera no paramétricos, permitiendo evaluar simultáneamente múltiples variables de entrada y salida bajo criterios de eficiencia técnica y productividad dinámica.

Para el procesamiento estadístico y la implementación computacional de los modelos se utilizó el software RStudio, debido a su capacidad para el análisis econométrico, modelación matemática y tratamiento de grandes volúmenes de datos. La utilización de este entorno permitió automatizar procesos de depuración, normalización y evaluación de eficiencia mediante paquetes especializados en análisis DEA y productividad.

1) Selección, depuración y validación de variables

En la primera etapa se identificaron las variables representativas del desempeño económico y social de los departamentos colombianos. La selección se realizó considerando criterios de pertinencia teórica, disponibilidad estadística, comparabilidad territorial y relación causal entre recursos utilizados y resultados obtenidos.

Las variables fueron clasificadas en inputs y outputs, siguiendo la lógica del modelo DEA, donde los inputs representan recursos o factores consumidos y los outputs corresponden a los resultados económicos generados.

Variables de entrada (Inputs)

$$X=\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$$

Donde:

x_1: Extensión territorial

x_2: Presupuesto general

x_3: Población

x_4: Tasa de desocupación

Variables de salida (Outputs)

$$Y=\{y_1, y_2, y_3\}$$

Donde:

y_1: Tasa global de participación laboral

y_2: Balanza comercial

y_3: Producto Interno Bruto (PIB)

2) Implementación computacional del modelo DEA CCR input-orientado

Para la medición de la eficiencia relativa se implementó el modelo DEA CCR propuesto por Charnes, Cooper y Rhodes (1978), bajo el supuesto de rendimientos constantes a escala (CRS). La orientación input fue seleccionada debido a que el estudio busca determinar qué departamentos podrían reducir proporcionalmente sus recursos manteniendo constantes sus niveles de producción económica.

El modelo DEA permite construir una frontera eficiente a partir de las mejores prácticas observadas dentro del conjunto de departamentos evaluados.

La formulación matemática del modelo CCR input-orientado se expresa de la siguiente manera:

$$\min\theta$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{io} \quad i = 1, 2, \ldots, m$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro} \quad r = 1, 2, \ldots, s$$

$$\lambda j \geq 0 \qquad j = 1,2, \ldots, n$$

Donde:

- θ = índice de eficiencia técnica.
- x_{ij} = cantidad del input i utilizada por el departamento j.
- y_{rj} = cantidad del output r producida por el departamento j.
- λ_j = ponderación asignada a cada unidad de referencia.
- n = número total de departamentos analizados.
- m = número de inputs.
- s = número de outputs.

El valor de eficiencia técnica se encuentra en el intervalo:

$$0 < \theta \leq 1$$

Cuando:

$$\theta = 1$$

el departamento es considerado eficiente y se ubica sobre la frontera de eficiencia.

Por el contrario, si:

$$\theta < 1$$

la unidad presenta ineficiencia relativa, indicando la posibilidad de reducir proporcionalmente sus recursos sin afectar el nivel de outputs alcanzados.

La implementación computacional del modelo se realizó en RStudio utilizando librerías especializadas como:

- deaR

Estas herramientas permitieron calcular índices de eficiencia técnica, construir fronteras eficientes y desarrollar análisis comparativos entre departamentos.

De manera complementaria, se utilizaron scripts en lenguaje R para automatizar la lectura de bases de datos, ejecutar modelos de programación lineal y exportar resultados estadísticos y gráficos comparativos.

3) Aplicación del modelo de super-eficiencia

Con el propósito de clasificar y jerarquizar las unidades eficientes, se aplicó el modelo de super-eficiencia DEA desarrollado por Andersen y Petersen (1993).

En los modelos DEA tradicionales, todas las unidades eficientes obtienen un valor igual a uno, dificultando establecer diferencias entre ellas. El modelo de super-eficiencia resuelve esta limitación excluyendo temporalmente la DMU evaluada de la frontera de referencia.

La formulación general del modelo se expresa como:

$$\min \theta SE$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \neq o} \lambda_j x_{ij} \leq \theta SE x_{io}$$

$$\sum_{j \neq o} \lambda_j y_{rj} \geq y_{ro}$$

$$\lambda j \geq 0$$

En este caso, valores superiores a uno indican niveles crecientes de super-eficiencia, permitiendo identificar departamentos líderes en desempeño relativo.

La ejecución de este modelo en RStudio permitió generar rankings de eficiencia departamental y establecer comparaciones robustas entre las unidades ubicadas sobre la frontera eficiente.

4) Aplicación del Índice de Productividad de Malmquist

Finalmente, para evaluar la evolución de la productividad entre los periodos 2018, 2020, 2021 y 2023, se implementó el Índice de Productividad de Malmquist.

Este índice mide el cambio total de productividad factorial (TFP) entre dos periodos temporales y permite descomponer dicho cambio en:

- Cambio en eficiencia técnica.
- Cambio tecnológico.

La expresión general del Índice de Malmquist es:

$$M_0(x_t, y_t, x_{t+1}, y_{t+1}) = \left[\frac{D_t(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t(x_t, y_t)} x \frac{D_{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_{t+1}(x_t, y_t)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

- D_t representa la función distancia respecto a la tecnología del periodo t.
- D_{t+1} corresponde a la función distancia del periodo t+1.

La interpretación del índice es la siguiente:

- M>1⇒Incremento de productividad
- M=1⇒Productividad constante
- M<1⇒Disminución de productividad

La implementación del Índice de Malmquist se desarrolló en RStudio mediante funciones especializadas de análisis de productividad, permitiendo comparar el comportamiento dinámico de los departamentos colombianos entre los diferentes periodos de estudio.

IV. Resultados

A. Modelo Básico DEA CCR – Input Orientado

Al evaluar la eficiencia técnica relativa de los 21 departamentos de Colombia seleccionados, se aplicó el modelo DEA CCR input-orientado bajo supuestos de rendimientos constantes a escala (CRS). Este enfoque permitió determinar qué tan eficientemente cada departamento transforma sus recursos (inputs) en resultados (outputs), tomando como referencia la frontera eficiente construida a partir de las mejores prácticas observadas.

La estimación se desarrolló en RStudio mediante la librería deaR, utilizando una base de datos estructurada horizontalmente

para múltiples periodos. El procesamiento se ejecutó con los siguientes scripts:

```
library(deaR)
Datos <- read_excel("Datos.xlsx")
resul <- make_deadata(Datos, ni = 4, no= 3)
result1 <- model_basic(resul, orientation = "io", rts = "crs")
efficiencies(result1)
```

Donde "ni" representa el número de entradas y "no" el número de salidas. La orientación "io" indica enfoque input-orientado, mientras que "crs" establece rendimientos constantes a escala. Esto se realiza para cada periodo evaluado.

TABLE I. RESULTADOS MODELO BÁSICO DEA CCR – INPUT ORIENTADO

DMU	PERIODOS DE EFICIENCIA EVALUADOS			
	Ef - 2018	*Ef - 2020*	*Ef - 2021*	*Ef - 2023*
Antioquia	100	100	100	100
Atlántico	100	100	100	100
Bolívar	94,36	100	100	94,21
Boyacá	91,66	94,58	92,72	92,39
Caldas	89,21	100	100	100
Cauca	61,83	78,14	78,46	93,14
Cesar	100	100	100	100
Chocó	100	100	100	100
Córdoba	61,06	67,58	61,02	76,18
Cundinamarca	95,68	93,16	88,67	91
Huila	84,03	95,69	100	100
La Guajira	100	100	100	100
Magdalena	63,49	74,81	73,93	88,46
Meta	100	100	100	100
Nariño	74,92	100	100	100
Norte de S.	55,74	60,35	56,01	85,43
Quindío	100	100	100	100
Risaralda	100	100	100	100
Santander	100	100	100	100
Tolima	72,04	76,89	75,2	81,91
Valle del Cauca	100	100	100	100

La Tabla I presenta los resultados de eficiencia técnica relativa obtenidos mediante la aplicación del modelo DEA CCR input-orientado para las diferentes Unidades de Toma de Decisión (DMU) correspondientes a los departamentos evaluados en los periodos 2018, 2020, 2021 y 2023. Los resultados evidencian una marcada heterogeneidad en el desempeño operacional de las DMU, permitiendo identificar tanto unidades persistentemente eficientes como departamentos con brechas significativas respecto a la frontera eficiente. Desde la perspectiva metodológica del DEA, los valores iguales a 100 representan unidades localizadas sobre la frontera de eficiencia, indicando una asignación óptima de recursos bajo el supuesto de rendimientos constantes a escala.

Se observa que departamentos como Antioquia, Atlántico, Cesar, Chocó, La Guajira, Meta, Quindío, Risaralda, Santander y Valle del Cauca mantuvieron eficiencia plena durante todos los periodos analizados. Este comportamiento sugiere estabilidad estructural y elevada capacidad de gestión en la transformación de inputs en outputs, consolidándose como referentes de desempeño dentro del conjunto de comparación. La permanencia continua sobre la frontera eficiente indica además robustez operativa y sostenibilidad en los niveles de productividad relativa, factores que pueden asociarse a mayores capacidades institucionales, mejor articulación de procesos y una administración más eficiente de los recursos disponibles.

De manera complementaria, se identifican DMU con trayectorias de mejora progresiva a lo largo del horizonte temporal analizado. El departamento del Cauca presenta una evolución significativa, incrementando su eficiencia desde 61,83 en 2018 hasta 93,14 en 2023, lo cual evidencia un proceso sostenido de convergencia hacia la frontera eficiente. Comportamientos similares se observan en Huila y Nariño, cuyos resultados reflejan procesos de optimización operacional y fortalecimiento en el aprovechamiento relativo de recursos. Estas dinámicas sugieren la existencia de mejoras en los mecanismos de gestión, capacidad de adaptación institucional y posibles incrementos en la productividad técnica.

En contraste, departamentos como Córdoba, Norte de Santander, Magdalena y Tolima registran los niveles promedio de eficiencia más bajos dentro de la muestra analizada, evidenciando persistencia de ineficiencias técnicas durante los distintos periodos evaluados. Particularmente, Norte de Santander presenta el promedio más reducido, acompañado de una limitada variabilidad temporal, lo que podría indicar la existencia de restricciones estructurales que afectan de manera sistemática la capacidad de conversión eficiente de recursos en resultados. Desde una perspectiva de ingeniería organizacional y análisis de productividad, estos resultados constituyen señales relevantes para la formulación de estrategias de mejora enfocadas en rediseño de procesos, fortalecimiento operativo y optimización de capacidades productivas.

B. Modelo Super DEA CCR – Input Orientado

Con el propósito de diferenciar las DMU eficientes entre sí, se aplicó el modelo de super eficiencia DEA, el cual excluye temporalmente a la unidad evaluada de la frontera de referencia. Esto permite establecer jerarquías de desempeño entre departamentos previamente catalogados como eficientes.

La formulación se ejecutó mediante el siguiente script:

```
result1 <- model_supereff(result1, orientation = "io", rts = "crs")
efficiencies(result1)
```

El resultado se presenta a continuación:

TABLE II. RESULTADOS MODELO SUPER DEA CCR – INPUT ORIENTADO

DMU	PERIODOS DE SUPEREFICIENCIA EVALUADOS			
	SUPER EF - 18	SUPER EF - 20	SUPER EF - 21	SUPER EF - 23
CHOCÓ	1568,42%	1242,27%	1223,06%	1451,89%
ATLÁNTICO	*350,63%*	*342,76%*	*415,11%*	*409,79%*
ANTIOQUIA	*176,96%*	*265,04%*	*260,49%*	*311,60%*
QUINDÍO	*221,22%*	*217,62%*	*223,68%*	*268,60%*
LA GUAJIRA	*223,23%*	*134,58%*	*189,95%*	*155,12%*
CESAR	126,31%	225,64%	123,56%	146,30%
NARIÑO	74,93%	124,03%	130,02%	143,51%
META	204,35%	118,46%	25,83%	126,61%
SANTANDER	*121,57%*	*121,14%*	*126,17%*	*125,25%*
RISARALDA	*132,88%*	*123,83%*	*110,16%*	*124,83%*
VALLE DEL CAUCA	*117,53%*	*120,78%*	*140,25%*	*124,12%*
CALDAS	89,22%	103,23%	113,24%	104,56%
HUILA	84,04%	95,69%	135,47%	103,60%
BOLÍVAR	94,94%	101,16%	104,01%	94,22%
CAUCA	61,83%	78,14%	78,46%	93,15%
BOYACÁ	91,66%	94,59%	92,73%	92,39%
CUNDINAMARCA	95,68%	93,17%	88,67%	91,01%
MAGDALENA	63,49%	74,82%	73,93%	88,46%
NORTE DE S.	55,75%	60,35%	56,01%	85,43%
TOLIMA	72,05%	76,90%	75,20%	81,91%
CÓRDOBA	61,06%	67,59%	61,03%	76,19%

La Tabla II de resultados del modelo DEA de super eficiencia input-orientado evidencia diferencias significativas en el desempeño relativo de las DMU evaluadas, permitiendo discriminar entre aquellas unidades que previamente habían sido clasificadas como eficientes bajo el modelo DEA CCR convencional. A diferencia del modelo básico, la super eficiencia permite establecer un ranking entre las DMU eficientes, identificando cuáles presentan un desempeño superior respecto a la frontera eficiente de referencia.

Los resultados muestran que departamentos como Chocó, Atlántico, Antioquia y Quindío registran los niveles más altos de super eficiencia durante los periodos analizados, destacándose por mantener valores considerablemente superiores al 100%. Particularmente, Chocó presenta indicadores excepcionalmente elevados, reflejando una posición dominante frente al resto de las unidades evaluadas y evidenciando una alta capacidad de transformación eficiente de recursos en resultados.

Asimismo, se observa una tendencia de mejora progresiva en departamentos como Huila y Nariño, los cuales incrementan sus niveles de desempeño en los periodos más recientes, sugiriendo procesos de fortalecimiento operativo y optimización en la gestión de recursos. En contraste, departamentos como Norte de Santander, Córdoba, Magdalena y Cauca mantienen niveles inferiores al umbral de eficiencia, lo que evidencia persistencia de ineficiencias técnicas y limitaciones estructurales en su desempeño relativo.

C. Medición del Índice de Malmquist

Con el fin de analizar la evolución de la productividad total de los factores, se implementó el Índice de Malmquist con orientación input. Este indicador permite medir cambios de productividad entre periodos consecutivos considerando simultáneamente variaciones en eficiencia técnica y desplazamientos tecnológicos.

La implementación en RStudio se desarrolló mediante el siguiente Script:

```
DATOS<-make_malmquist(DATOS,nper=4,arrangement
="horizontal",ni=4,no=3)

resultm<-malmquist_index(DATOS,orientation = "io")

> mi<-resultm$mi
```

Los resultados del índice de Malmquist mostrados en la Tabla III, para el periodo 2018–2020 evidencian que la mayoría de las DMU presentaron una reducción en su productividad total de los factores, dado que gran parte de los indicadores se ubicaron por debajo de la unidad. Únicamente departamentos como Valle del Cauca, Caldas, Antioquia y Atlántico registraron incrementos en productividad, reflejando mejoras en eficiencia técnica y/o progreso tecnológico durante el periodo evaluado. En contraste, departamentos como La Guajira, Meta, Córdoba y Nariño presentaron las mayores disminuciones relativas, indicando deterioros en su desempeño productivo y menor capacidad de transformación eficiente de recursos.

TABLE III. RESULTADOS PARA EL ÍNDICE DE MALMQUIST (PRIMER PERIODO)

MALMQUIST	INDICADOR
	P 1->2
VALLE DEL CAUCA	1,1701
CALDAS	1,0508
ANTIOQUIA	1,0410
ATLÁNTICO	1,0082
SANTANDER	0,9652
CHOCÓ	0,9649
TOLIMA	0,9623
HUILA	0,9550
CUNDINAMARCA	0,9548
QUINDÍO	0,9418
NORTE DE S.	0,9260
BOYACÁ	0,9063
CAUCA	0,8835
RISARALDA	0,8593
CESAR	0,7659
BOLÍVAR	0,7470
MAGDALENA	0,7393
NARIÑO	0,7383
CÓRDOBA	0,7343
META	0,7173
LA GUAJIRA	0,5102

Para el periodo 2020–2021, en la Tabla IV, se observa un cambio significativo en la dinámica productiva de las DMU, evidenciándose un comportamiento mayoritariamente positivo en los indicadores de Malmquist. La mayoría de los departamentos alcanzaron valores superiores a 1, lo que indica mejoras en productividad total de los factores asociadas a avances en eficiencia técnica y desempeño operacional. Antioquia, Nariño, Huila y Meta registraron los incrementos más relevantes, consolidándose como las unidades con mayor crecimiento relativo durante el periodo. No obstante, departamentos como Quindío, Cesar, Risaralda y Norte de Santander presentaron índices inferiores a la unidad, reflejando leves retrocesos en productividad.

TABLE IV. RESULTADOS PARA EL ÍNDICE DE MALMQUIST (SEGUNDO PERIODO)

MALMQUIST	INDICADOR
	P 2->3
ANTIOQUIA	1,2789
NARIÑO	1,2314
HUILA	1,2134
META	1,1960
BOLÍVAR	1,1872
CAUCA	1,1867
SANTANDER	1,1463
MAGDALENA	1,1324
VALLE DEL CAUCA	1,1257
CUNDINAMARCA	1,0899
BOYACÁ	1,0893
ATLÁNTICO	1,0846
CALDAS	1,0817
CÓRDOBA	1,0550
TOLIMA	1,0548
LA GUAJIRA	1,0326
CHOCÓ	1,0266
NORTE DE S.	0,9857
RISARALDA	0,9768
CESAR	0,9530
QUINDÍO	0,8682

Los resultados correspondientes al periodo 2021–2023, evidenciados en la tabla V, muestran un escenario ampliamente favorable en términos de productividad, donde prácticamente todas las DMU registraron índices de Malmquist superiores a la unidad. Departamentos como Cesar, Antioquia y Norte de Santander presentaron los mayores incrementos relativos, evidenciando avances significativos en eficiencia y capacidad operativa. Asimismo, se observa una mejora generalizada en departamentos que previamente habían mostrado desempeños limitados, como Cauca, Córdoba y Tolima, lo cual sugiere procesos de fortalecimiento institucional y optimización de recursos. Únicamente Chocó y Huila presentaron valores inferiores a 1, indicando ligeros retrocesos en productividad.

TABLE V. RESULTADOS PARA EL ÍNDICE DE MALMQUIST (TERCER PERIODO)

MALMQUIST	INDICADOR
	P 3->4
CESAR	1,5928
ANTIOQUIA	1,5470
NORTE DE S.	1,4785
CAUCA	1,3495
CUNDINAMARCA	1,3222
META	1,3128
RISARALDA	1,2844
TOLIMA	1,2803
LA GUAJIRA	1,2639
MAGDALENA	1,2410
CALDAS	1,2382
SANTANDER	1,2244
VALLE DEL CAUCA	1,2136
BOYACÁ	1,2056
CÓRDOBA	1,2014
NARIÑO	1,1797
QUINDÍO	1,1768
ATLÁNTICO	1,1699
BOLÍVAR	1,1514
CHOCÓ	0,9594
HUILA	0,9175

V. CONCLUSIÓN

La aplicación integrada de los modelos DEA CCR input-orientado, DEA de super eficiencia e índice de productividad de Malmquist permitió desarrollar una evaluación multidimensional de la eficiencia y productividad relativa de las DMU analizadas, proporcionando una visión integral del comportamiento operativo y de la evolución temporal de su desempeño. Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias estructurales significativas entre los departamentos evaluados, identificando tanto unidades con niveles persistentes de eficiencia plena como departamentos con importantes brechas técnicas y productivas.

El análisis de eficiencia técnica mostró que varias DMU lograron mantenerse de manera consistente sobre la frontera eficiente durante todos los periodos analizados, consolidándose como referentes de alto desempeño y buenas prácticas operacionales. De manera complementaria, el modelo de super eficiencia permitió establecer una jerarquización más precisa entre las unidades eficientes, evidenciando diferencias relativas de desempeño que no pueden observarse mediante el modelo DEA convencional. Asimismo, el índice de Malmquist permitió identificar dinámicas de crecimiento, recuperación y variación en la productividad total de los factores entre periodos consecutivos, mostrando una tendencia general de fortalecimiento productivo en los años más recientes.

Uno de los principales aportes de la investigación radica en la capacidad de identificar de manera objetiva las brechas de eficiencia y productividad presentes entre las DMU evaluadas. Esta información representa un insumo estratégico para la formulación de planes de mejora, optimización de recursos y fortalecimiento institucional, especialmente en aquellas unidades que evidenciaron rezagos estructurales persistentes. Desde una perspectiva aplicada, los resultados permiten orientar procesos de toma de decisiones basados en evidencia cuantitativa, favoreciendo el diseño de estrategias enfocadas en incrementar la eficiencia operativa y el aprovechamiento de capacidades existentes.

La investigación posee un impacto relevante en el ámbito de las políticas públicas y la planificación territorial, dado que proporciona herramientas analíticas robustas para evaluar el desempeño relativo de distintas unidades administrativas y monitorear su evolución en el tiempo. La identificación de departamentos líderes en eficiencia y productividad facilita la generación de esquemas de benchmarking y transferencia de buenas prácticas, contribuyendo al desarrollo de políticas orientadas a la reducción de brechas regionales y al fortalecimiento de capacidades institucionales.

El estudio además, constituye una base sólida para futuras investigaciones relacionadas con análisis de eficiencia, productividad y evaluación de desempeño en diferentes contextos organizacionales, territoriales o sectoriales. La integración de metodologías DEA y Malmquist demuestra un alto potencial de aplicabilidad en investigaciones de ingeniería, gestión organizacional, economía y planeación estratégica, permitiendo ampliar el alcance de estudios comparativos y profundizar en el análisis de factores asociados al comportamiento productivo de las unidades evaluadas.

Referencias

[1] F. J. Ayvar Campos y J. Silva Trigueros, "*Análisis de eficiencia de los países de la OCDE para la generación de ingreso: Un estudio a través del Análisis de la Envolvente de Datos (DEA) del 2000 al 2020*," *SUMMA*, vol. 6, no. 1, pp. 1–14, 2024.

[2] A. R. Schuschny, *El método DEA y su aplicación al estudio del sector energético y las emisiones de CO2 en América Latina y el Caribe*, CEPAL, Santiago de Chile, 2007.

[3] A. Charnes, W. W. Cooper y E. Rhodes, "*Measuring the Efficiency of Decision Making Units*," *European Journal of Operational Research*, vol. 2, pp. 429–444, 1978.

[4] F. A. Chediak Pinzón, *La técnica DEA para medir y analizar la eficiencia en municipios del departamento del Tolima*, año 2006, Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.

[5] M. J. Delgado e I. Álvarez, "*Evaluación de la eficiencia técnica en los países miembro de la Unión Europea*," *Gestión y Política Pública*, vol. XIV, no. 1, pp. 107–128, 2005.

[6] V. Coll Serrano y O. M. Blasco Blasco, *Evaluación de la eficiencia mediante el análisis envolvente de datos: Introducción a los modelos básicos*, Universidad de Valencia, 2006.

[7] A. Chirinos González y M. Urdaneta, "*Medición de la eficiencia en el sector avícola mediante índices de Malmquist*," *Agroalimentaria*, no. 25, pp. 95–107, 2007.

NeuroTap: implementación y operación de un sistema multisensorial como experiencia formativa CDIO en Ingeniería Electrónica.

1st Salomé Yepes Betancourt
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
salome.yepesb@uqvirtual.edu.co

2nd Verónica del Mar López Buritica
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
veronicad.lopezb@uqvirtual.edu.co

3rd Jorge A. Aldana Gutiérrez
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
jaldana@uniquindio.edu.co

***Resumen*— La formación en ingeniería requiere experiencias que integren el desarrollo técnico con la comprensión del contexto y la validación real de soluciones. Esta ponencia presenta la experiencia formativa de un proyecto desarrollado por estudiantes del Programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Quindío, orientado a la implementación y operación de un sistema multisensorial denominado *NeuroTap*, aplicado a procesos de estimulación sensorial infantil.**

El proyecto se desarrolló bajo el enfoque CDIO, con énfasis en las fases de Implementar y Operar, integrando estímulos táctiles, visuales, auditivos y propioceptivos mediante tecnologías de bajo costo. La metodología incluyó el diseño del sistema, la construcción de un prototipo funcional, su validación mediante pruebas técnicas, registros de calidad, criterios de aceptación y documentación de lecciones aprendidas.

Los resultados evidencian que el sistema operó de manera estable y segura en entornos de prueba, y que el proceso permitió fortalecer en los estudiantes competencias técnicas y transversales como trabajo en equipo, toma de decisiones, aseguramiento de la calidad y responsabilidad social. La experiencia demuestra el potencial de los proyectos CDIO como estrategia efectiva para articular aprendizaje, implementación tecnológica y operación en contextos reales desde etapas formativas.

Palabras clave - (CDIO, aprendizaje basado en proyectos, sistemas multisensoriales, implementación y operación, ingeniería electrónica).

I. INTRODUCCIÓN

La formación en ingeniería contemporánea exige la integración de conocimientos técnicos con la comprensión del contexto y la capacidad de implementar soluciones reales. En este sentido, los enfoques tradicionales centrados únicamente en la teoría resultan insuficientes para preparar profesionales capaces de enfrentar problemáticas complejas.

El enfoque CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar y Operar) propone una estructura formativa que articula el aprendizaje con el desarrollo de sistemas reales, promoviendo la adquisición de competencias técnicas y transversales en contextos aplicados [2]. Este enfoque ha demostrado ser efectivo en la formación en ingeniería al conectar el conocimiento con su aplicación práctica.

En este contexto, el proyecto NeuroTap surge como una respuesta a la necesidad de implementar soluciones tecnológicas accesibles para la estimulación sensorial infantil, integrando múltiples tipos de estímulos en un sistema interactivo. La estimulación multisensorial ha sido ampliamente estudiada por su impacto en el desarrollo cognitivo y la neuroplasticidad, evidenciando mejoras en procesos de aprendizaje y rehabilitación [5], [6].

La presente ponencia tiene como objetivo describir la implementación y operación del sistema NeuroTap como experiencia formativa en el marco del enfoque CDIO, destacando su impacto tanto en el desarrollo tecnológico como en la formación de los estudiantes.

II. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto NeuroTap se estructuró bajo el enfoque CDIO, con énfasis en las fases de Implementar y Operar, orientadas a la materialización del sistema y su validación en contexto real [2].

A. Fase I: Implementar

Durante la fase de implementación se llevó a cabo la integración de los componentes electrónicos, incluyendo sensores táctiles, actuadores visuales, módulos de audio y dispositivos de humidificación, todos coordinados mediante un microcontrolador Arduino. Esta etapa contempló el ensamblaje físico del sistema, la programación de la lógica de control y la verificación de la interacción entre hardware y software.

B. Fase II: Operar

La fase de operación se desarrolló mediante un proceso iterativo basado en ciclos de integración progresiva (IPAC), en los cuales se realizaron pruebas de funcionamiento, ajustes técnicos y validación en entornos reales. Estos ciclos

permitieron evolucionar el sistema desde un prototipo inicial hasta un producto mínimo viable funcional, validado en condiciones reales de uso.

La Figura 1 muestra la integración del enfoque CDIO con la Metodología Ágil Híbrida de Desarrollo (MAHD), mediante ciclos iterativos IPAC que permiten la mejora progresiva del sistema a lo largo de las fases de implementación y operación.



FIG. 1. INTEGRACIÓN DEL ENFOQUE CDIO CON LA METODOLOGÍA MAHD MEDIANTE CICLOS IPAC.

Adicionalmente, se establecieron criterios de aceptación del sistema, orientados a evaluar su funcionamiento, seguridad, usabilidad y mantenibilidad. Estos criterios fueron validados mediante pruebas en campo, sesiones de operación continua y evaluación con usuarios finales .

III. DESARROLLO

A. Implementación del sistema NeuroTap

El sistema NeuroTap corresponde a un sistema multisensorial diseñado para estimular procesos cognitivos y sensoriales en niños mediante la integración de estímulos táctiles, visuales, auditivos y propioceptivos.

Desde el punto de vista técnico, el sistema está conformado por un microcontrolador Arduino encargado de gestionar la interacción entre entradas y salidas del sistema, incluyendo botones táctiles, luces LED, módulos de sonido y dispositivos de humidificación. La arquitectura del sistema se basa en una lógica de control por estados, lo que permite gestionar diferentes modos de operación y garantizar una respuesta coherente ante la interacción del usuario .

La implementación física consistió en el desarrollo de un tapete interactivo con botones de presión integrados, los cuales activan estímulos multisensoriales en tiempo real. El sistema fue diseñado bajo criterios de seguridad eléctrica, accesibilidad y facilidad de mantenimiento, considerando condiciones reales de uso en entornos educativos y terapéuticos.

La Figura 2 presenta la arquitectura funcional del sistema NeuroTap, evidenciando la interacción entre el usuario, los sensores de entrada, el sistema de control basado en microcontrolador y los actuadores multisensoriales, permitiendo la generación de estímulos en tiempo real. Asimismo, se incorporó una interfaz de control que permite al usuario configurar y supervisar las sesiones de estimulación, facilitando su operación por parte de docentes o terapeutas sin formación técnica especializada.



FIG. 2. ARQUITECTURA FUNCIONAL DEL SISTEMA NEUROTAP. (ELABORADA POR LOS AUTORES CON APOYO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL NOTEBOOKLM).

IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A. Resultados del sistema

Durante la fase de operación del sistema NeuroTap se realizaron diversas pruebas orientadas a validar su funcionamiento en condiciones reales.

Los resultados evidencian que el sistema logró una integración efectiva de los estímulos sensoriales, permitiendo una interacción fluida por parte de los usuarios. En particular, se observó una respuesta inmediata en la activación de estímulos visuales y auditivos ante la interacción táctil, favoreciendo la atención y participación de los niños .

Asimismo, el sistema mostró estabilidad durante sesiones de operación continua superiores a 30 minutos, sin presentar fallas eléctricas, recalentamientos o desconexiones, lo que valida su confiabilidad en entornos reales.

La representación mostrada en la Figura 3 permite evidenciar la materialización del sistema NeuroTap a nivel físico y funcional, integrando sus diferentes capas de interacción, control y hardware. A partir de esta implementación, se llevaron a cabo pruebas orientadas a verificar el comportamiento del sistema en condiciones reales de uso.



FIG. 3. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL SISTEMA NEUROTAP: DEL DISEÑO CONCEPTUAL AL PROTOTIPO FUNCIONAL. (ELABORACIÓN PROPIA, APOYADA EN HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL NOTEBOOKLM).

En este sentido, los resultados obtenidos durante dichas pruebas se sistematizan en la Tabla 1, donde se presentan los principales escenarios de evaluación y su desempeño en términos de respuesta, estabilidad y usabilidad.

TABLA I. VALIDACIÓN FUNCIONAL DEL SISTEMA NEUROTAP.

Escenario	**Resultado esperado**	**Resultado obtenido**
Interacción táctil	Activación de estímulos visuales y auditivos.	Activación inmediata (< 100 ms).
Activación humidificador	Funcionamiento estable y seguro.	Operación continua sin fallos.
Sesión prolongada	Estabilidad del sistema (> 30min).	Funcionamiento (> 40 min) sin fallos.
Usabilidad	Operación sin soporte técnico.	Uso exitoso (< 5 min).
Prueba con usuarios	Interacción positiva.	Alta participación y respuesta.

Como se observa en la Tabla 1, el sistema cumple con los criterios funcionales definidos, destacándose su rapidez de respuesta, estabilidad operativa y facilidad de uso.

B. Validación mediante criterios de aceptación

Con el fin de garantizar la calidad del sistema, se evaluaron los criterios de aceptación definidos para el producto mínimo viable. En este contexto, se establecieron diferentes pruebas orientadas a verificar el cumplimiento de los requisitos funcionales, operativos y de usabilidad del sistema propuesto.

Tal como se presenta en la Tabla 2, se definieron criterios específicos junto con sus respectivos métodos de validación, permitiendo una evaluación estructurada del desempeño del sistema en condiciones controladas. Estos criterios fueron diseñados considerando escenarios representativos de uso real, con el objetivo de asegurar la confiabilidad y estabilidad del sistema NeuroTap.

TABLA 2. EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DEL SISTEMA.

Criterio	**Método de validación**	**Resultado**
Funcionamiento mínimo	10 sesiones continuas	Cumple
Seguridad operativa	Pruebas eléctricas y térmicas	Cumple
Usabilidad	Prueba con operadores no técnicos	Cumple
Documentación	Manual técnico y de usuario	Cumple
Mantenibilidad	Procedimientos definidos	Cumple

Los resultados evidencian que el sistema cumple con los requisitos establecidos para su operación en entornos reales, garantizando condiciones adecuadas de seguridad, funcionalidad y usabilidad. Adicionalmente, se observa que el sistema mantiene un desempeño estable durante las pruebas realizadas, lo cual respalda su viabilidad como solución tecnológica en el contexto planteado.

C. Análisis del proceso formativo

El desarrollo del proyecto permitió evidenciar el fortalecimiento de competencias en los estudiantes, en coherencia con el enfoque CDIO.

La implementación en contextos reales implicó la toma de decisiones bajo restricciones técnicas, de seguridad y de usabilidad, lo cual favorece el desarrollo de pensamiento crítico y enfoque sistémico. Este tipo de aprendizaje experiencial ha demostrado ser altamente efectivo en la formación en ingeniería [4].

Asimismo, la interacción con usuarios reales permitió incorporar criterios de diseño centrado en el usuario, fortaleciendo la relación entre el desarrollo tecnológico y su impacto social [3].

IV. LECCIONES APRENDIDAS

El proceso de implementación y operación permitió identificar aprendizajes clave asociados a la integración de sistemas multisensoriales.

Como se sintetiza en la Figura 4, las principales lecciones obtenidas durante el desarrollo del sistema NeuroTap se organizan en torno a tres dimensiones clave: seguridad, sincronización y usabilidad, las cuales emergieron a partir de la interacción del sistema en condiciones reales de operación



FIG. 4. LECCIONES DE CAMPO EN EL DESARROLLO DEL SISTEMA NEUROTAP: DESAFÍOS, INTERVENCIONES Y RESULTADOS. (ELABORACIÓN PROPIA, APOYADA EN HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL NOTEBOOKLM).

Se evidenció la importancia de garantizar la seguridad eléctrica y sensorial del sistema antes de su uso, lo que llevó a la implementación de limitadores de corriente y protocolos de prueba más rigurosos. Asimismo, se identificó la necesidad de diseñar interfaces intuitivas, ya que la usabilidad impacta directamente la efectividad del sistema en contextos reales. Esto llevó a ajustes en la interfaz para mejorar la interacción con usuarios no técnicos.

Otro aspecto relevante fue la sincronización entre hardware y software, donde se presentaron retrasos que fueron corregidos mediante la optimización del sistema de control. Finalmente, se destaca la importancia del diseño inclusivo, adaptando el sistema a diferentes capacidades motrices, lo que permitió mejorar significativamente la interacción de los usuarios.

VI. CONCLUSIONES

El proyecto NeuroTap demuestra que la implementación del enfoque CDIO, particularmente en las fases de Implementar y Operar, permite articular de manera efectiva la formación en ingeniería con el desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas a problemáticas reales.

Los resultados evidencian que es posible desarrollar sistemas multisensoriales funcionales, seguros y de bajo costo, capaces de operar en entornos educativos y terapéuticos, cumpliendo con criterios de calidad, usabilidad y confiabilidad.

Asimismo, el proceso formativo permitió fortalecer competencias clave en los estudiantes, tales como la integración de sistemas, la toma de decisiones, el aseguramiento de la calidad y la responsabilidad social.

Finalmente, este tipo de experiencias consolida el potencial del enfoque CDIO como estrategia para vincular la formación académica con el entorno, promoviendo el desarrollo de soluciones con impacto real.

REFERENCIAS

[1] Bolognini, N., Russo, C., & Edwards, D. J. (2016). The sensory side of post-stroke motor rehabilitation. *Restorative Neurology and Neuroscience, 34*(4), 571–586.

[2] CDIO Initiative. (2023). *CDIO syllabus v3.0*.

[3] Dym, C. L., Agogino, A. M., Eris, O., Frey, D. D., & Leifer, L. J. (2005). Engineering design thinking, teaching, and learning. *Journal of Engineering Education, 94*(1), 103–120.

[4] Kolb, D. A. (2015). *Experiential learning*. Pearson.

[5] Miller, L. J., Schoen, S. A., Mulligan, S., & Sullivan, J. (2014). Sensory processing and integration. *Occupational Therapy International, 21*(2), 110–119.

[6] Pascual-Leone, A., Amedi, A., Fregni, F., & Merabet, L. B. (2005). The plastic human brain cortex. *Annual Review of Neuroscience, 28*, 377–401.

[7] Prince, M. J., & Felder, R. M. (2006). Inductive teaching and learning. *Journal of Engineering Education, 95*(2), 123–138.

[8] Sheppard, S. D., Macatangay, K., Colby, A., & Sullivan, W. M. (2009). *Educating engineers*. Jossey-Bass.

A Low-Cost Wearable Proof-of-Concept Heater for Thermal Therapy Applications

Ariel Scout Hudson *Weldon School of Biomedical Engineering*
Purdue University
West Lafayette, IN, USA
hudso195@purdue.edu

Jax P. Marrone
Weldon School of Biomedical Engineering
Purdue University
West Lafayette, IN, USA
jmarrone@purdue.edu

Seokkyoon Hong *School of Mechanical Engineering*
Purdue University
West Lafayette, IN, USA
hong350@purdue.edu

Juan C. Mesa
Weldon School of Biomedical Engineering
Purdue University
West Lafayette, IN, USA
jmesaagu@purdue.edu

***Abstract*—Conventional manufacturing methods for wearable electronics often rely on cleanroom-based microfabrication, multilayer architectures, and specialized materials, making them complex and resource-intensive. These constraints can limit the development of affordable devices for biomedical and research applications. As wearable electronics continue to expand, practical manufacturing approaches are needed that preserve device performance while reducing fabrication barriers. Thermal therapy and localized thermal management are particularly relevant in biomedical engineering, with applications in drug delivery, pain management, tissue conditioning, disease prevention, and physiological modulation. Here, we present a proof-of-concept low-cost wearable thermal platform (LCWTP) that integrates a micro-laser-patterned aluminum resistive heater with packaging tape and polyethylene terephthalate films for localized heat generation. The device exhibited mechanical flexibility and conformability, enabling placement on multiple anatomical sites with medical adhesive film. Thermal performance was experimentally characterized to evaluate heating behavior and repeatability, with heat activation controlled by a tunable DC-DC step-down circuit. Overall, this work demonstrates a replicable approach for wearable devices requiring localized thermal management.**

***Keywords*—Thermal Therapy, Wearable Electronics, Epidermal Devices, Joule Heating**

I. Introduction

Wearable devices are an expanding class of technologies designed to interface with the body for continuous monitoring, personalized feedback, and mobile therapeutic applications [1]–[3]. Their increasing relevance is reflected in the projected growth of the wearable technology market to US$160 billion by the end of 2026, as well as the continued transition from detachable devices toward integrated systems, including textile-embedded sensors, actuators, and therapeutic platforms [4]–[7]. Healthcare-focused wearables have shown comparable growth, with estimates reporting a market value of USD 24.57 billion in 2018 and an expected annual growth rate of 24.7%, reaching USD 139.35 billion by 2026 [8]. Despite this expansion, adoption remains influenced by socioeconomic factors, including income level, reinforcing the need for wearable technologies that are more affordable and broadly available [9].

To support the broader use of wearable technologies, fabrication methods must reduce production barriers while maintaining functional performance. However, many current approaches involve compromises between mechanical durability and manufacturing efficiency, particularly when they depend on specialized materials or complex fabrication workflows [10]–[13]. Manufacturing strategies based on lower-cost materials and reproducible processes are therefore important for expanding the practical use of wearable devices.

Reliable performance and skin conformability in wearable systems often depend on fabrication methods that require specialized facilities, equipment, and materials [14]. Cleanroom-based microfabrication and multilayer device architectures can increase production complexity, while components such as semiconductors, precision conductive materials, and multilayer circuitry further raise material and processing costs [15]. These challenges may be intensified by electronics supply chain disruptions and inflation, which can further constrain affordability for average consumers [16].

Among the many applications of wearable technologies, thermotherapy represents an important area for healthcare-related use. Thermotherapy refers to therapeutic approaches that increase skin temperature to promote localized blood flow and metabolic activity [17]–[19]. It has been investigated for pain relief, muscle stiffness, joint mobility, and recovery support following musculoskeletal injuries [19]. Wearable heat therapy devices typically use regulated heating patches to deliver localized heat to a target area [20]. These technologies may benefit athletes, post-surgical patients, and individuals experiencing musculoskeletal discomfort, making thermal therapy a broad area with opportunities for further development and innovation [21].

In this work, we introduce a proof-of-concept low-cost wearable thermal platform (LCWTP) for localized thermal stimulation, designed to address limitations of conventional heating technologies that are often single-use or require intermittent external heating. The device combines laser-patterned aluminum traces with PET film and transparent tape to produce a flexible resistive heater using readily available materials and replicable fabrication methods. The LCWTP demonstrates tunable Joule heating and flexible device integration, supporting its potential use in localized thermal stimulation and broader wearable electronics research.

II. Methodology

A. Device Fabrication

Serpentine aluminum conductive traces were patterned using laser micromachining (30 μm) and conventional lift-off processing, following previously reported approaches [22]–[24]. Polyethylene terephthalate films (PET) with a thickness of 200 μm served as the flexible substrate. After lift-off, the patterned aluminum traces were transferred onto the substrate surface, and Tegaderm film was applied to support attachment to the volunteer's skin during placement testing.

B. Heat Characterization and Performance

Thermal stimulation was produced through Joule heating using a programmable DC power supply (Keysight E3631A, Keysight Technologies, Santa Rosa, CA, USA). Voltage control was implemented with a TPS563200DDCR regulator (Texas Instruments, Dallas, TX, USA), configured according to the manufacturer's recommended circuit design [25]. Heating performance was characterized using a thermal camera (FLIR Technologies LLC, Wilsonville, OR, USA).

C. On-Site Wearability Test

A female volunteer wore the device at different body sites for a proof-of-concept assessment of placement and wearability. No invasive procedures were conducted, and the device was not operated under conditions that could introduce thermal injury risks.

III. Results

A. Device Fabrication and Assembly

The LCWTP was fabricated by patterning serpentine traces into a 100 μm aluminum film placed on a polymeric adhesive surface. Laser micromachining defined the conductive geometry (Fig. 1a), after which the patterned traces were released by lift-off (Fig. 1b) and transferred with clear packaging tape onto a flexible PET film (Fig. 1c). The assembled device was then affixed to a waterproof medical adhesive film for placement on skin or curved surfaces (Figs. 1d–f). The resulting structure was flexible enough to bend along curved surfaces, as shown in the fabricated prototypes (Figs. 1g,h), and could be positioned on body sites such as the forearm, calf, and back using medical adhesive fixation.

B. Thermal Characterization and Device Performance

The thermal performance of the LCWTP was evaluated at applied potentials of 1.2 V, 2.4 V, and 3.6 V. The device exhibited a voltage-dependent heating response, with higher potentials producing greater surface heating (Fig. 2a). At 1.2 V, the average and maximum temperatures were 27.58 °C and 29.36 °C, respectively. Increasing the applied potential to 2.4 V raised these values to 47.73 °C and 53.47 °C, while 3.6 V produced an average temperature of 71.33 °C and a maximum temperature of 78.30 °C. These results demonstrate tunable heating under the tested conditions. Although the highest temperatures are not intended for medical use or direct skin contact, they define the upper thermal output of the device in this proof-of-concept evaluation. The normalized resistance change increased approximately linearly with temperature (Fig. 2b), reaching an approximate $\Delta R/R$ of 0.22 near 80 °C. Thermal imaging showed a relatively uniform heat distribution across the serpentine-patterned region (Fig. 2c), and the voltage regulation circuit used for device operation is shown in Fig. 2d. Together, these results support the feasibility of the LCWTP for controllable localized thermal stimulation.

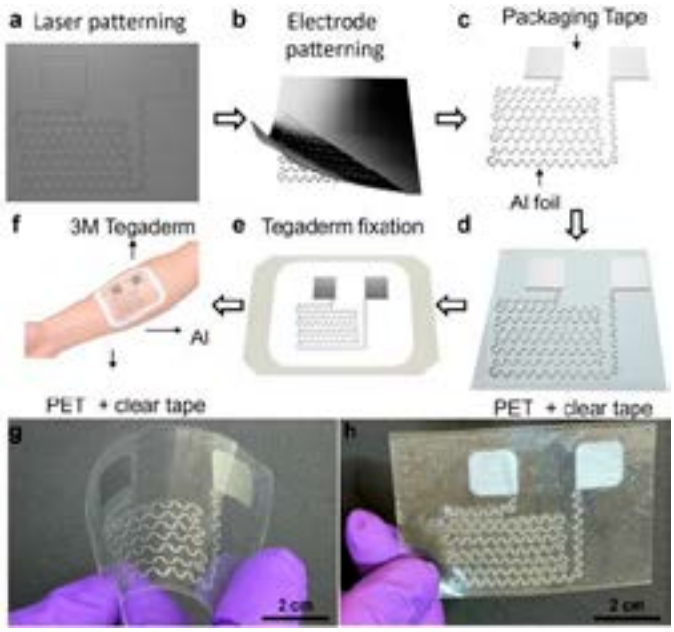


Fig. 1. Fabrication process and proof-of-concept demonstration for LCWTP.(a) Laser patterning of serpentine conductive traces on a thin aluminum film. (b) Lift-off of the patterned aluminum electrode structure after laser micromachining. (c) Transfer of the patterned aluminum traces onto clear packaging tape for placement on a flexible PET substrate. (d) Assembly of the patterned electrodes on PET with clear tape. (e) Fixation of the device using a waterproof medical adhesive film (Tegaderm). (f) Representative placement of the device onto the skin using Tegaderm fixation. (g,h) Fabricated LCWTP prototypes demonstrating flexibility and conformability to curved surfaces.

C. On-Site Wearability Test

The LCWTP was evaluated for placement on curved anatomical surfaces as a proof-of-concept wearability assessment. The device conformed to multiple body sites, including the anterior tibial region (Fig. 3a), forearm (Fig. 3b), and lower leg (Fig. 3c). These tests were limited to device placement and surface conformity; no thermal activation or thermal response measurements were performed on the volunteer.

To evaluate heating on a curved surface, the device was placed on a cylindrical tube approximating forearm curvature and thermally activated under benchtop conditions (Fig. 3d,e). The resulting thermal profile was consistent with the previous characterization, showing a quasi-uniform heat distribution across the patch. These results support the use of the LCWTP on curved anatomical surfaces while confirming its heating performance under non-human test conditions.

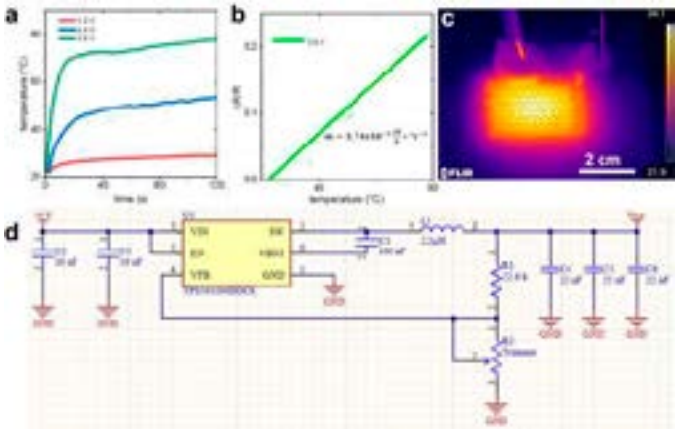


Fig. 2. Thermal characterization and circuit configuration of the LCWTP. (a) Temperature response of the device over time under applied voltages of 1.2 V, 2.4 V, and 3.6 V. (b) Normalized resistance change ($\Delta R/R$) as a function of temperature for the 3.6 V condition. (c) Representative thermal image showing localized heat distribution across the serpentine patterned heater. (d) Voltage regulation circuit based on the TPS563200DDCR regulator used for device operation.

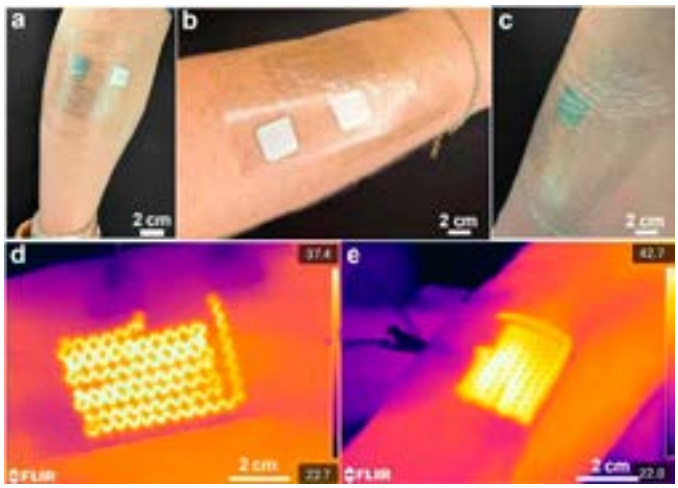


Fig. 3. Proof-of-concept evaluation of LCWTP conformability and benchtop thermal activation. The LCWTP was placed on different curved anatomical surfaces to assess wearability and surface conformability, including the anterior tibial region (a), forearm (b), and lower leg (c). No thermal activation or thermal response testing was conducted on human participants. Heating performance was evaluated separately under benchtop conditions using a cylindrical tube to emulate the curvature of a forearm (d,e). Infrared images show a quasi-uniform heat distribution across the patch during activation.

IV. Discussion

This study demonstrates a wearable thermal patch fabricated from laser-patterned aluminum traces and readily available flexible materials. The LCWTP produced voltage-dependent Joule heating with a relatively uniform thermal distribution across the serpentine region, indicating controllable heat generation under benchtop conditions. Its PET, transparent tape, and Tegaderm-based structure enabled simple assembly and attachment to curved surfaces, supporting the use of low-barrier fabrication methods for wearable thermal device prototyping. The on-site wearability assessment was limited to placement and surface conformity across different body locations. No thermal activation or temperature response testing was performed on human participants; therefore, the present results should be interpreted as a benchtop and placement-based proof of concept. Future work should evaluate thermal safety and closed-loop temperature control during controlled human testing, as well as device stability during wear and movement.

V. Conclusion

This work developed a low-cost wearable thermal patch for localized thermal stimulation using laser-patterned aluminum traces and flexible polymer films. The CWTP demonstrated voltage-controlled Joule heating under benchtop conditions and conformed to curved anatomical surfaces during non-heating placement tests. These results support its use as an early-stage wearable heating platform, with future studies needed to evaluate thermal safety and therapeutic performance under controlled human testing.

Acknowledgment

The authors thank Daniel Kuratomi for his help during the electrode patterning via laser cutting techniques.

References

[1] M. Babu, Z. Lautman, X. Lin, M. H. Sobota, and M. P. Snyder, "Wearable devices: implications for precision medicine and the future of health care," *Annual Review of Medicine*, vol. 75, no. 1, pp. 401–415, 2024.

[2] K. Guk, G. Han, J. Lim, K. Jeong, T. Kang, E.-K. Lim, and J. Jung, "Evolution of wearable devices with real-time disease monitoring for personalized healthcare," *Nanomaterials*, vol. 9, no. 6, p. 813, 2019.

[3] S. Hong, T. Yu, Z. Wang, and C. H. Lee, "Biomaterials for reliable wearable health monitoring: applications in skin and eye integration," *Biomaterials*, vol. 314, p. 122862, 2025.

[4] W. A. D. M. Jayathilaka, K. Qi, Y. Qin, A. Chinnappan, W. Serrano-García, C. Baskar, H. Wang, J. He, S. Cui, S. W. Thomas *et al.*, "Significance of nanomaterials in wearables: a review on wearable actuators and sensors," *Advanced Materials*, vol. 31, no. 7, p. 1805921, 2019.

[5] J. J. Ferreira, C. I. Fernandes, H. G. Rammal, and P. M. Veiga, "Wearable technology and consumer interaction: A systematic review and research agenda," *Computers in human behavior*, vol. 118, p. 106710, 2021.

[6] T. Park, S. Hong, L. Murray, J. Lee, A. Shah, J. C. Mesa, H. Lee, L. Couetil, and C. H. Lee, "Wearable smart textile band for continuous equine health monitoring," *Biosensors and Bioelectronics*, p. 118073, 2025.

[7] S. Hong, T. Park, Y. Lee, J. C. Mesa, T. Yu, Y. Ji, J. Lee, J. Jeong, S.-W. Kang, D. R. Kim *et al.*, "Smart garment for continuous respiration monitoring in canines," *ACS Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2111–2120, 2026.

[8] R. Chandrasekaran, V. Khattula, and E. Moustakas, "Use of wearable healthcare devices by us adults: patterns of use and key predictors," *JMIR*, vol. 22, no. 1, 2020.

[9] A. Nagappan, A. Krasniansky, and M. Knowles, "Patterns of ownership and usage of wearable devices in the united states, 2020-2022: survey study," *Journal of Medical Internet Research*, vol. 26, p. e56504, 2024.

[10] R. Wei, H. Li, Z. Chen, Q. Hua, G. Shen, and K. Jiang, "Revolutionizing wearable technology: advanced fabrication techniques for body-conformable electronics," *npj Flexible Electronics*, vol. 8, no. 1, p. 83, 2024.

[11] C. H. Kim, D. H. Lee, J. Youn, H. Lee, and J. Jeong, "Simple and cost-effective microfabrication of flexible and stretchable electronics for wearable multi-functional electrophysiological monitoring," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 14823, 2021.

[12] S. Hong, J. Lee, T. Park, J. Jeong, H. Joo, J. C. Mesa, C. B. Alston, Y. Ji, J. Yi, Y. Lee *et al.*, "Enhanced thermal conductivity in tough and environmentally resilient hydrogels," *Advanced Materials Interfaces*, vol. 13, no. 2, p. e00752, 2026.
[13] S. Hong, J. Lee, T. Park, J. Jeong, J. Lee, H. Joo, J. C. Mesa, C. B. Alston, Y. Ji, S. R. Vega *et al.*, "Spider silk-inspired conductive hydrogels for enhanced toughness and environmental resilience via dense hierarchical structuring," *Advanced Science*, vol. 12, no. 12, p. 2500397, 2025.
[14] Y. Pan, T. Wu, X. Li, and B. Gao, "Emerging cost-effective manufacturing technologies for advanced biomedical devices," *Advanced Materials Technologies*, p. e71017, 2026.
[15] C. F. Rodríguez, V. Andrade-Pérez, M. C. Vargas, A. Mantilla-Orozco, J. F. Osma, L. H. Reyes, and J. C. Cruz, "Breaking the clean room barrier: exploring low-cost alternatives for microfluidic devices," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 11, p. 1176557, 2023.
[16] J. Liu and H. Liu, "Research on flexible sensors for wearable devices: A review," *Nanomaterials*, vol. 15, no. 7, p. 520, 2025.
[17] L. A. Castellanos-Rivera, E. A. Mandujano-García, A. Ruiz-Morán, M. Barrón-Salazar, B. A. Morales-Ruiz, and C. J. Trujillo-Romero, "Analysis of the thermal distribution generated by a thermal patch to evaluate its feasibility to treat patient's pain relief," in *Latin American Conference on Biomedical Engineering*. Springer, 2019, pp. 508–518.
[18] J. Jo and S. H. Lee, "Heat therapy for primary dysmenorrhea: A systematic review and meta-analysis of its effects on pain relief and quality of life," *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, p. 16252, 2018.
[19] J. S. Petrofsky, M. Laymon, L. Berk, and G. Bains, "Effect of thermacare heatwraps and icy hot cream/patches on skin and quadriceps muscle temperature and blood flow," *Journal of Chiropractic Medicine*, vol. 15, no. 1, pp. 9–18, 2016.
[20] M. Kang, H. Jeong, S.-W. Park, J. Hong, H. Lee, Y. Chae, S. Yang, and J.-H. Ahn, "Wireless graphene-based thermal patch for obtaining temperature distribution and performing thermography," *Science advances*, vol. 8, no. 15, p. eabm6693, 2022.
[21] G. Zanoli, I. Albarova-Corral, M. Ancona, I. Grattagliano, T. Hotfiel, G. Iolascon, K. Krüger, and G. Rodríguez Maruri, "Current indications and future direction in heat therapy for musculoskeletal pain: A narrative review," *Muscles*, vol. 3, no. 3, pp. 212–223, 2024.
[22] B. Sadri, D. Goswami, M. Sala de Medeiros, A. Pal, B. Castro, S. Kuang, and R. V. Martinez, "Wearable and implantable epidermal paper-based electronics," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 10, no. 37, pp. 31 061–31 068, 2018.
[23] B. Sadri, A. M. Abete, and R. V. Martinez, "Simultaneous electrophysiological recording and self-powered biosignal monitoring using epidermal, nanotexturized, triboelectronic devices," *Nanotechnology*, vol. 30, no. 27, p. 274003, 2019.
[24] B. Sadri, "Low cost manufacturing of wearable and implantable biomedical devices," Ph.D. dissertation, Purdue University Graduate School, 2022.
[25] Texas Instruments, InC=c, "Tps563200 datasheet," 2023. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps563200.pdf?HQS=

Influencia de los espacios sociales académicos en el desarrollo de habilidades blandas: un análisis en estudiantes de ingeniería colombianos

Evolución de las competencias socioemocionales desde la formación inicial hasta la inserción profesional.

Autor: Zermatt del pilar Torres Villafañe
Estudiante De Ingeniería Eléctrica
Universidad de la Costa
Correo: ztorresv@cuc.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7679-0300

Autor: Ana Renata Peñaranda Velasco
Estudiante de Ingeniería Industrial
Universidad de Santander
Correo: renatapenaranda0203@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3757-8278

Autor: Miguel Ángel Noel García
Estudiante de Ingeniería de Sistemas
Universidad de Cartagena
Correo: mnoelg@unicartagena.edu.co
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8981-9771

Autor: Hugo Alonso Rivera Anguiano:
Estudiante de Ingeniería Industrial
Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
Correo: L191050269@pabellon.tecnm.mx
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-0690-9893

***Abstract*: This research examines how the university social environment influences the development of soft skills in engineering students and recent graduates. Although technical competence is traditionally the main focus of engineering education, evidence shows that skills such as communication, teamwork, time management, and leadership are essential for both academic success and effective professional integration.**

A mixed-methods approach (quantitative and qualitative) is used to analyze four distinct groups: ordinary students, high-achieving students, ordinary recent graduates, and high-achieving recent graduates. The study focuses on participation in academic social spaces, including study groups, collaborative projects, research groups, and student associations. Data will be collected through surveys to measure participation levels and perceived skill development, complemented by interviews to explore academic and professional experiences in greater depth.

The expected results indicate significant differences in soft skill development among the groups. Specifically, higher social engagement is anticipated to correlate with stronger competency development. The core objective is to demonstrate that these soft skills facilitate better adaptation to professional demands and promote more effective collaborative performance. This highlights the necessity of strengthening social interaction spaces as an essential component of comprehensive engineering education.

Keywords—Soft skills, Engineering education, Academic social spaces, Academic performance

I. INTRODUCTION

En la formación en ingeniería, el énfasis tradicional ha estado centrado en el desarrollo de competencias técnicas; sin embargo, en los últimos años ha cobrado relevancia el papel de las habilidades blandas en el desempeño académico y la inserción profesional (Berrio y Perez, 2002; García et al., 2020) . Competencias como la comunicación, el trabajo en equipo, la gestión del tiempo y el liderazgo resultan fundamentales en entornos cada vez más colaborativos y multidisciplinarios. En este contexto, el entorno social universitario se presenta como un espacio clave para el desarrollo de dichas habilidades, especialmente a través de la participación en actividades académicas y extracurriculares.

La presente investigación tiene como objetivo analizar cómo la participación en espacios sociales académicos influye en el desarrollo de habilidades blandas en estudiantes y recién graduados de ingeniería. Para ello, se consideran cuatro grupos de estudio: estudiantes ordinarios, estudiantes activos, graduados ordinarios y graduados activos. Esta clasificación permite identificar diferencias en función de la etapa formativa y el nivel de involucramiento social, aportando evidencia sobre la importancia de fortalecer estos espacios como parte integral de la educación en ingeniería.

II. METODOLOGIA

La investigación se desarrolló mediante una metodología mixta, combinando enfoques cuantitativos y cualitativos para analizar el impacto de los espacios sociales académicos en el

desarrollo de habilidades blandas en estudiantes y recién graduados de ingeniería.

Para la recolección de información se diseñó una encuesta estructurada compuesta por preguntas relacionadas con la participación en actividades extracurriculares, trabajo en equipo, liderazgo, comunicación, gestión del tiempo y resolución de problemas. Además, se incluyeron preguntas de percepción sobre la influencia del entorno universitario y de los espacios colaborativos en el fortalecimiento de dichas habilidades.

La muestra estuvo conformada por 31 participantes pertenecientes a diferentes universidades y programas de ingeniería. La selección de los participantes se realizó mediante un muestreo por conveniencia, donde cada integrante del grupo investigador contactó y encuestó aproximadamente a 10 personas de su entorno académico y universitario. Esto permitió obtener respuestas de estudiantes y recién graduados con distintos niveles de participación en actividades extracurriculares y grupos sociales académicos.

Dentro de los participantes se incluyeron estudiantes vinculados a organizaciones y espacios académicos como grupos de estudio, semilleros, voluntarios y asociaciones universitarias. La encuesta fue aplicada de manera virtual mediante formularios digitales, facilitando la recolección y organización de los datos obtenidos.

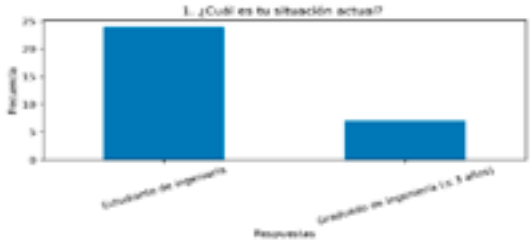
Posteriormente, los resultados fueron clasificados y analizados de acuerdo con variables como nivel de participación extracurricular, frecuencia de trabajo colaborativo y percepción del desarrollo de habilidades blandas. Finalmente, la información recopilada permitió identificar tendencias y diferencias entre los participantes, estableciendo una relación entre la participación en espacios sociales académicos y el fortalecimiento de competencias blandas en el ámbito Universitario y profesional.

III. RESULTADOS

La encuesta fue aplicada a 31 participantes entre estudiantes y recién graduados de ingeniería. Del total de encuestados, el 77% correspondió a estudiantes de ingeniería y el 23% a graduados recientes (ver Tabla 1 y Gráfica 1).

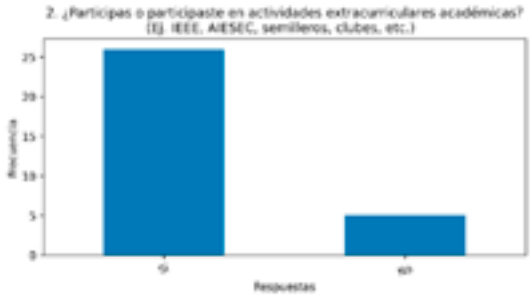
Respuesta	**Respuesta**
Frecuencia	24
Estudiante de ingeniería (≤3)	7

Tabla 1. Resultados población encuestada



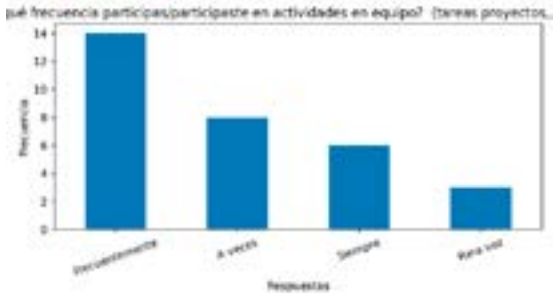
Gráfica 1. Población encuestada

Uno de los hallazgos principales fue que la mayoría de los participantes (84%) afirmó haber participado en actividades extracurriculares académicas como IEEE, AIESEC, ACOFI, semilleros o clubes universitarios (ver Gráfica 2).



Gráfica 2. Frecuencia de participación en actividades extracurriculares

Sin embargo, la frecuencia de participación fue mayormente ocasional (ver Gráfica 3), lo que indica que, aunque existe interés, la participación constante todavía es limitada.



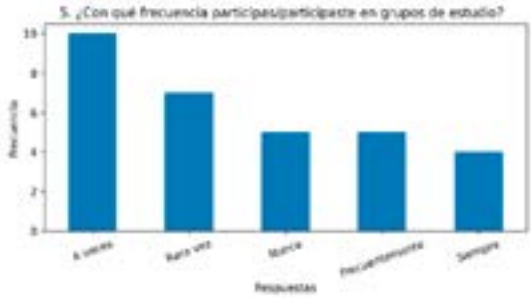
Gráfica 3. Frecuencia de participación en actividades de equipo

En relación con las actividades colaborativas, la mayoría indicó participar frecuentemente en trabajos en equipo (ver Gráfica 4) y proyectos colaborativos (ver Gráfica 5) . Esto sugiere que los espacios sociales académicos favorecen la interacción y el desarrollo de competencias interpersonales.

Respecto al desarrollo de habilidades blandas, los resultados mostraron que:

- La comunicación efectiva fue evaluada principalmente en un nivel alto (ver Gráfica 6) .
- El trabajo en equipo obtuvo valoraciones altas en la mayoría de los participantes (ver Gráfica 7).
- El liderazgo presentó niveles entre medios y altos (ver Gráfica 8) .
- La gestión del tiempo fue la habilidad con resultados más equilibrados, predominando un nivel medio (ver Gráfica 9) .

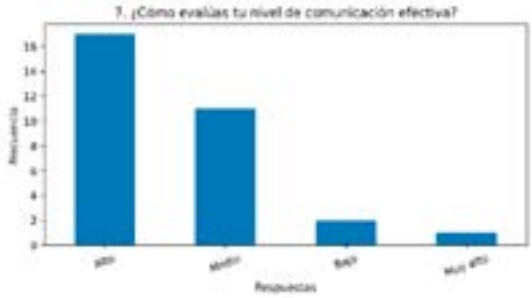
La resolución de problemas fue una de las competencias mejor valoradas (ver Gráfica 10).



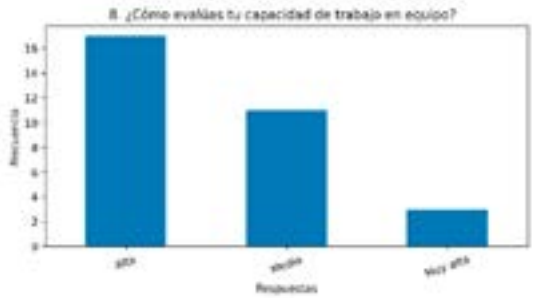
Gráfica 4. Frecuencia de participación en grupos de estudio



Gráfica 5. Frecuencia de participación en proyectos colaborativos

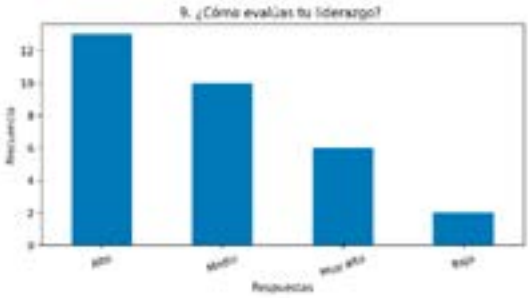


Gráfica 6. Autoevaluación de comunicación efectiva en estudiantes y graduados de ingeniería

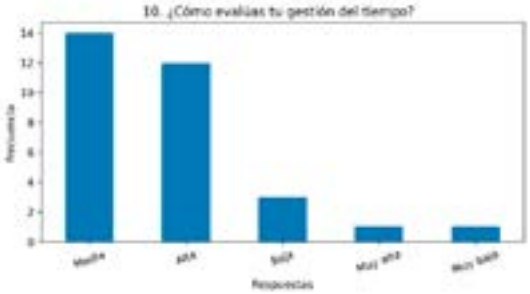


Gráfica 7. Autopercepción de habilidad de trabajo en equipo

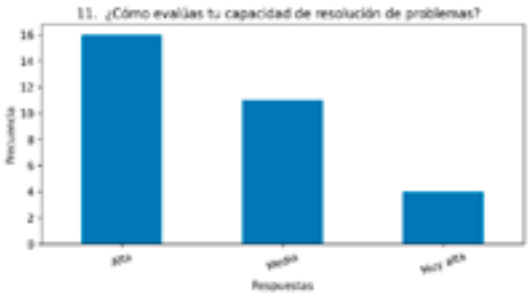
Además, la mayoría de los encuestados consideró que tanto el entorno universitario como la participación en actividades extracurriculares influyeron significativamente en el desarrollo de sus habilidades blandas. Igualmente, casi todos afirmaron que estas habilidades han tenido un impacto positivo en su desempeño académico o profesional.



Gráfica 8. Autopercepción en habilidad de liderazgo

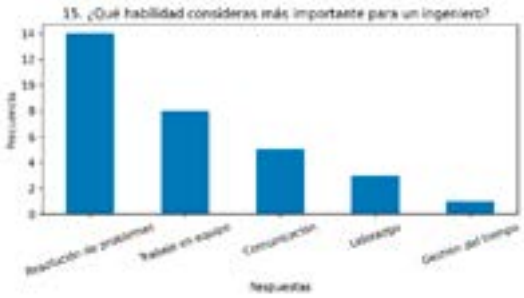


Gráfica 9. Autopercepción en habilidad de gestión del tiempo

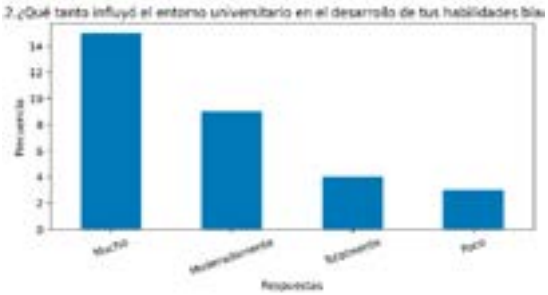


Gráfica 10. Autopercepción en habilidad de resolución de problemas.

En cuanto a las habilidades más importantes para un ingeniero, la resolución de problemas fue la opción más seleccionada, seguida por el trabajo en equipo y la comunicación (Ver Gráfica 11).



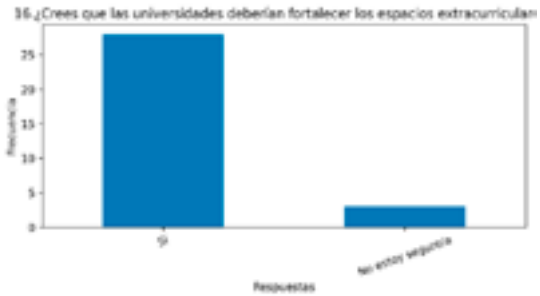
Gráfica 11. Habilidades más importantes para ingenieros



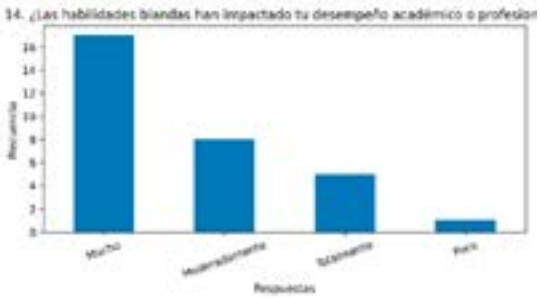
Gráfica 12. Frecuencia de influencia del entorno universitario en el desarrollo de habilidades blandas.

Finalmente, el 90% de los participantes consideró que las universidades deberían fortalecer los espacios extracurriculares y de voluntariado (ver Gráfica 13). Entre las principales recomendaciones mencionadas en las respuestas abiertas se destacan:

- Mejor organización interna de las actividades.
- Mayor divulgación y comunicación de eventos.
- Incentivos para motivar la participación estudiantil.
- Más continuidad en los proyectos.
- Vinculación de las actividades con las carreras profesionales y necesidades reales de la comunidad.



Gráfica 13. Opinión de fortalecimiento de espacios extracurriculares



Gráfica 14. Frecuencia del impacto de habilidades blandas en entornos académicos y profesionales

Estos resultados evidencian que los espacios sociales y extracurriculares tienen una influencia positiva en el desarrollo de habilidades blandas en estudiantes y graduados de ingeniería (Ver Gráfica 12), fortaleciendo competencias necesarias para el ámbito académico y profesional (Ver Gráfica 14).

IV. CONCLUSION

Los resultados obtenidos en la investigación permitieron evidenciar que la participación en espacios sociales académicos y actividades extracurriculares si influye positivamente en el desarrollo de habilidades blandas en estudiantes y recién graduados de ingeniería. Competencias como la comunicación, el trabajo en equipo, el liderazgo y especialmente, la resolución de problemas fueron identificadas como habilidades fundamentales tanto para el desempeño académico como para la adaptación al entorno profesional.

La investigación también mostró que los estudiantes con mayor participación en grupos académicos, organizaciones estudiantiles y proyectos colaborativos tienden a desarrollar con más facilidad competencias interpersonales y capacidades de liderazgo. Esto demuestra que la formación integral de un ingeniero no depende únicamente del conocimiento técnico adquirido en el aula, sino también de las experiencias sociales y colaborativas vividas durante la etapa universitaria.

Actualmente, muchas empresas valoran cada vez más a profesionales capaces de adaptarse, comunicarse efectivamente y resolver problemas en situaciones reales. En numerosos casos, las organizaciones priorizan candidatos con un alto nivel de habilidades blandas y capacidad de resolución frente a personas que poseen únicamente conocimientos técnicos. Esto se debe a que las empresas buscan profesionales que puedan trabajar en equipo, liderar procesos, tomar decisiones y desenvolverse adecuadamente en entornos laborales dinámicos y multidisciplinarios.

Por esta razón, la investigación resalta la importancia de que las universidades continúen fortaleciendo espacios extracurriculares, espacios de voluntariado, semilleros y actividades colaborativas que permitan a los estudiantes desarrollar este tipo de competencias. Finalmente, se concluye que las habilidades blandas representan un complemento

esencial en la formación de los futuros ingenieros y constituyen una ventaja significativa para enfrentar las exigencias del mercado laboral actual.

V. REFERENCIA

Memorias de congresos

- Mora, J. P. G., Nieto, L. M. P., Arias, A. M. R., & Anguiano, H. A. R. (2025). Prospectiva e impacto de la ingeniería en Colombia: una perspectiva desde el Capítulo Estudiantil ACOFI. Encuentro Internacional de EducacióN En IngenieríA, 1-12. https://doi.org/10.26507/paper.4467

Fuentes electrónicas

- *7 soft skills great engineers need*. (s. f.). https://www-titanrecruitment-com-au.translate.goog/blog/2025/01/7-soft-skills-great-engineers-need?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Mark, I. (2026, 26 marzo). Engineering Soft Skills or Durable Skills | Siemens Software. Academic. https://blogs-sw-siemens-com.translate.goog/academic/engineering-soft-skills-the-top-3-durable-skills-that-help-you-get-hired/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Herrera, C. A. H., & Torres, J. C. N. (2020). Las habilidades blandas en estudiantes de ingeniería de tres instituciones públicas de educación superior. RIDE Revista Iberoamericana Para la Investigación y el Desarrollo Educativo, 10(20). https://doi.org/10.23913/ride.v10i20.678
- Mora, J. P. G., Nieto, L. M. P., Arias, A. M. R., & Anguiano, H. A. R. (2025). Prospectiva e impacto de la ingeniería en Colombia: una perspectiva desde el Capítulo Estudiantil ACOFI. Encuentro Internacional de EducacióN En IngenieríA, 1-12. https://doi.org/10.26507/paper.4467
- EducacióN En IngenieríA, 1-12. https://doi.org/10.26507/paper.4467
- Fuentes, G. Y., Moreno-Murcia, L. M., Rincón-Téllez, D. C., & Silva-García, M. B. (2021). Evaluación de habilidades blandas en la educación superior. Formación Universitaria, 14(4), 49-60. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062021000400049
- Guerra-Báez, S. P. (2019). Una revisión panorámica al entrenamiento de las habilidades blandas en estudiantes universitarios. Psicología Escolar e Educacional, 23, e186464. https://doi.org/10.1590/2175-35392019016464
- Cimatti, B. (2016). Definition, development, assessment of soft skills and their role for the quality of organizations and enterprises. International Journal for Quality Research, 10(1), 97-130. https://doi.org/10.18421/IJQR10.01-05

TERRA INITIATIVE: Un proyecto intergeneracional

Innovacion y ancestralidad: nuevas formas de ingenieria desde territorios indigenas

Zermatt del Pilar Torres Villafañe
Programa de Ingeniería Eléctrica Universidad de la Costa ztorresv@cuc.edu.co |
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7679-0300

Abstract: ***The Sierra Nevada de Santa Marta is an ecologically strategic territory in northern Colombia, ancestrally protected by the Arhuaco, Kogui, Kankuamo, and Wiwa Indigenous Peoples, whose worldview understands the territory as a living system in balance. From this perspective, Indigenous communities have developed conservation strategies based on traditional land-use planning, water protection, and land acquisition as mechanisms for environmental restoration and territorial sustainability.***

Within this context, TERRA INITIATIVE emerges as a model that integrates renewable energy, territorial conservation, and engineering education. Beyond its energy function, the project represents a transformation in the relationship between Indigenous communities and engineering by creating educational opportunities for Indigenous youth in science, technology, and engineering fields that were historically perceived as distant from Indigenous territorial realities.

This experience redefines engineering as a discipline grounded in the observation of nature, environmental balance, and intercultural dialogue. By articulating Western technological innovation with Indigenous ancestral knowledge, the project challenges the paradigm that associates Indigenous Peoples with underdevelopment and demonstrates that sustainable development can be achieved through models that respect cultural identity, ecological balance, and intergenerational responsibility.

The article reflects on how engineering education can be transformed through the dialogue between technological innovation and Indigenous knowledge systems, proposing new approaches to sustainability, territorial autonomy, and intercultural engineering education.

Keywords— Educational engineering, Sustainability, Indigenous peoples, Renewable energy, Ancestral territory, Interculturality, Territorial conservation, Sierra Nevada de Santa Marta

I. Introduction

La Sierra Nevada de Santa Marta es uno de los ecosistemas estratégicos más importantes de Colombia y del continente americano. Ubicada al norte del país, entre los departamentos de Magdalena, Cesar y La Guajira, constituye el macizo montañoso costero más alto del mundo y alberga una amplia diversidad biológica, climática e hídrica que sostiene gran parte de la región Caribe. Este territorio ancestral ha sido habitado históricamente por los pueblos indígenas Arhuaco, Kogui, Kankuamo y Wiwa, quienes lo conciben como un sistema vivo donde el equilibrio entre naturaleza, espiritualidad y comunidad garantiza la continuidad de la vida. A lo largo del tiempo, estos pueblos han desarrollado estrategias propias de conservación basadas en el ordenamiento territorial tradicional, la protección de las fuentes hídricas y la relación de reciprocidad con la naturaleza. Sin embargo, los procesos de colonización, expansión agroindustrial, extractivismo y conflicto armado transformaron profundamente el territorio, desplazando comunidades indígenas hacia zonas ambientalmente frágiles y generando tensiones entre los modelos tradicionales de conservación y las dinámicas contemporáneas de desarrollo.



Fig 1. Delimitación territorial de los 4 pueblos indígenas.

A. La problemática central

En este contexto surge una problemática central: históricamente, el concepto de desarrollo ha sido asociado a modelos de crecimiento que priorizan la explotación de los recursos naturales y la expansión tecnológica sobre el equilibrio ambiental y cultural. Bajo esta visión, los pueblos

indígenas han sido frecuentemente relacionados con el atraso o con formas de vida alejadas de la modernidad, desconociendo que muchas de las bases del pensamiento ingenieril nacieron precisamente de la observación de la naturaleza y de la adaptación inteligente al entorno.

B. Ingeniería ancestral

Desde tiempos inmemoriales, las civilizaciones humanas —incluyendo numerosas culturas indígenas— desarrollaron sistemas hidráulicos, arquitecturas bioclimáticas, técnicas agrícolas y formas avanzadas de organización territorial que hoy constituyen patrimonios irremplazables de la humanidad. Estas construcciones no fueron producto de la casualidad ni de explicaciones místicas, sino de procesos de ingeniería fundamentados en la observación de los ciclos naturales, el comportamiento del agua, los materiales y las dinámicas del territorio.

C. El cambio de paradigma

No obstante, con el paso del tiempo, la relación entre humanidad y naturaleza cambió progresivamente: se pasó de diseñar en función del entorno a intentar transformar el entorno en función de las necesidades humanas.

Frente a este panorama, TERRA INITIATIVE emerge como una experiencia que propone nuevas formas de articulación entre innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y saberes ancestrales indígenas. Más allá de la implementación de energías renovables en territorio indígena, el proyecto representa una transformación en la manera en que los jóvenes indígenas se relacionan con la ingeniería, la ciencia y la tecnología, resignificando estas disciplinas como herramientas para la protección territorial, la autonomía y la continuidad cultural.

Pregunta de investigación: ¿Cómo puede la formación en ingeniería contribuir al desarrollo sostenible de los territorios indígenas sin romper los principios de equilibrio entre naturaleza, cultura y comunidad?

ll. Metodología

El presente artículo se desarrolla desde un enfoque cualitativo, reflexivo e intercultural, orientado al análisis de las relaciones entre ingeniería educacional, sostenibilidad territorial y saberes ancestrales indígenas en la Sierra Nevada de Santa Marta. La investigación parte de la experiencia territorial y académica del autor, articulando elementos de observación, análisis documental y reflexión crítica sobre los procesos contemporáneos de conservación, formación en ingeniería y transición hacia modelos sostenibles en comunidades indígenas.

A. Revisión documental

Para el desarrollo del trabajo se realizó una revisión de documentos relacionados con estrategias de conservación territorial, programas de recuperación de tierras ancestrales, educación en ingeniería y sostenibilidad ambiental en la Sierra Nevada de Santa Marta.

B. Experiencias comunitarias

Asimismo, se incorporaron elementos derivados de experiencias comunitarias vinculadas a procesos de autonomía energética, formación de jóvenes indígenas y fortalecimiento del gobierno propio.

C. Perspectiva intercultural

El análisis se fundamenta en una perspectiva intercultural que reconoce el diálogo entre conocimiento científico y saberes ancestrales como una herramienta para comprender nuevas formas de desarrollo y educación en ingeniería. Desde esta visión, se aborda la observación de la naturaleza como principio histórico de la ingeniería y como elemento presente en las prácticas territoriales indígenas, permitiendo reflexionar sobre modelos de innovación orientados al equilibrio entre tecnología, comunidad y medio ambiente.

D. Estudio de caso territorial

Finalmente, el artículo adopta el estudio de caso territorial como estrategia de análisis, tomando la experiencia de la Sierra Nevada de Santa Marta como referencia para discutir cómo la formación en ingeniería puede contribuir a la sostenibilidad ambiental, la autonomía territorial y el fortalecimiento cultural de las futuras generaciones indígenas.

lll. Contexto Territorial y Conservación Indígena

La Sierra Nevada de Santa Marta constituye el sistema montañoso litoral más alto del mundo y uno de los territorios ecológicamente más importantes de América Latina. Ubicada al norte de Colombia, entre los departamentos de Magdalena, Cesar y La Guajira, su estructura geográfica alberga múltiples pisos térmicos, ecosistemas estratégicos y más de treinta cuencas hidrográficas que abastecen de agua a gran parte de la región Caribe. Debido a su importancia ambiental y cultural, la Sierra Nevada ha sido reconocida como Reserva de Biosfera y Patrimonio de la Humanidad.

Este territorio ancestral es habitado históricamente por los pueblos indígenas Arhuaco, Kogui, Kankuamo y Wiwa, quienes comparten una visión del territorio fundamentada en la Ley de Origen, entendiendo la Sierra Nevada como un sistema vivo e interconectado donde el equilibrio entre naturaleza, espiritualidad y comunidad garantiza la permanencia de la vida. Desde esta perspectiva, el territorio no se concibe únicamente como un espacio físico o productivo, sino como un organismo integral cuya estabilidad depende de la relación armónica entre los seres humanos y los ecosistemas.

A partir de esta comprensión territorial, los pueblos indígenas han desarrollado estrategias de conservación basadas en el ordenamiento ancestral del territorio, la protección de los nacederos de agua, la recuperación de semillas nativas y la regulación del uso del suelo según las características ecológicas de cada zona. Estas prácticas buscan mantener el equilibrio ambiental mediante procesos de adaptación al entorno natural, priorizando la conservación sobre la transformación agresiva del territorio. Sin embargo, durante décadas, procesos de colonización, expansión de la frontera agrícola, actividades extractivas y conflicto armado generaron el desplazamiento progresivo de las comunidades indígenas hacia las zonas altas de la Sierra Nevada, aumentando la presión ambiental sobre ecosistemas estratégicos y fuentes hídricas fundamentales para la región Caribe. Frente a esta problemática, el Pueblo Arhuaco, junto con los demás pueblos indígenas de la Sierra Nevada y entidades ambientales del Estado colombiano, impulsan programas como «Guardabosques Corazón del Mundo» como una estrategia integral de conservación y restauración territorial.

A. Programa Guardabosques Corazón del Mundo

Este programa tiene como objetivo principal la adquisición y saneamiento de predios ubicados en la zona media de la Sierra Nevada, permitiendo la recuperación de áreas ambientalmente sensibles y reduciendo la presión sobre los nacederos de agua. Bajo este modelo, aproximadamente el 70 % de las tierras adquiridas se destinan a la regeneración natural de los ecosistemas y el 30 % restante a programas de soberanía alimentaria y proyectos productivos sostenibles.

- 70% Regeneración natural
  Porcentaje de tierras adquiridas destinadas a la regeneración natural de los ecosistemas en la Sierra Nevada.

- 30% Soberanía alimentaria
  Porcentaje restante destinado a programas de soberanía alimentaria y proyectos productivos sostenibles.

Además de la recuperación territorial, el programa implementó la estrategia de los «Pueblos Talanquera» o pueblos culturales, concebidos como espacios de contención frente a la expansión de la colonización y como mecanismos de fortalecimiento del gobierno propio indígena. Estos asentamientos funcionan como corredores de protección ambiental y cultural, integrando procesos de conservación, recuperación ecológica y permanencia territorial.

Más allá de una política de preservación ambiental, el Programa Guardabosques Corazón del Mundo representa una forma de ingeniería territorial basada en la observación de la naturaleza y en la adaptación a las dinámicas ecológicas del entorno. Esta visión recupera principios históricos presentes en antiguas civilizaciones humanas, donde la planificación hidráulica, la arquitectura y la organización territorial se construían en función de los ciclos naturales y no en oposición a ellos. Desde esta perspectiva, la experiencia de los pueblos indígenas de la Sierra Nevada propone una alternativa contemporánea al paradigma tradicional del desarrollo, planteando modelos de sostenibilidad fundamentados en el equilibrio entre territorio, comunidad y naturaleza.

IV. Ingeniería Educacional e Interculturalidad

Históricamente, la formación en ingeniería ha estado asociada a modelos de desarrollo orientados principalmente hacia la industrialización, la expansión urbana y el aprovechamiento intensivo de los recursos naturales. Bajo esta lógica, las comunidades indígenas fueron excluidas de los procesos científicos y tecnológicos, al considerarse que sus formas de conocimiento pertenecían únicamente al ámbito cultural o tradicional y no al campo técnico o ingenieril. Esta separación generó una distancia progresiva entre los pueblos indígenas y carreras como la ingeniería, la ciencia y la tecnología, percibidas durante décadas como disciplinas ajenas al territorio y vinculadas, en muchos casos, a dinámicas externas que transformaban el entorno sin considerar los principios de equilibrio ambiental y cultural.

Sin embargo, esta percepción desconoce que muchas sociedades indígenas han desarrollado históricamente formas complejas de ingeniería basadas en la observación de la naturaleza, la adaptación al entorno y el entendimiento de los ciclos ecológicos. Las antiguas estructuras arquitectónicas, los sistemas hidráulicos, las técnicas agrícolas y los modelos de organización territorial presentes en diferentes civilizaciones del mundo evidencian que el desarrollo tecnológico no surgió únicamente desde la ingeniería moderna, sino también desde conocimientos construidos a partir de la relación directa con el territorio. En este sentido, la ingeniería ancestral no representaba una intervención contra la naturaleza, sino una manera de integrarse a ella.

A. TERRA INITIATIVE como transformación.

A partir de esta reflexión, la experiencia de TERRA INITIATIVE representa un punto de transformación en la relación entre los pueblos indígenas y la educación en ingeniería. Más allá de la implementación de energías renovables en territorio indígena, el proyecto ha permitido que nuevas generaciones comiencen a resignificar carreras como ingeniería eléctrica, ingeniería ambiental, ciencia y tecnología como herramientas orientadas a la protección territorial, la autonomía energética y la sostenibilidad de las futuras generaciones.

B. Ingeniería intercultural

En este contexto, formar ingenieros indígenas no implica únicamente ampliar el acceso a la educación superior, sino construir procesos educativos capaces de dialogar con la cosmovisión, las necesidades y las dinámicas territoriales de las comunidades. La ingeniería educacional adquiere entonces un carácter intercultural, donde el conocimiento científico occidental y los saberes ancestrales no se entienden como opuestos, sino como formas complementarias de comprender y resolver los desafíos contemporáneos.

C. Nueva redefinición

Desde esta perspectiva, la ingeniería deja de concebirse exclusivamente como una herramienta de transformación física del entorno y se redefine como una disciplina orientada al equilibrio entre innovación, territorio y comunidad. La observación de la naturaleza, principio presente tanto en antiguas formas de ingeniería como en los sistemas de conocimiento indígena, vuelve a ocupar un lugar central en la manera de pensar el desarrollo tecnológico. Así, experiencias como TERRA INITIATIVE demuestran que es posible construir modelos de educación en ingeniería donde la innovación tecnológica no implique la pérdida de identidad cultural, sino el fortalecimiento de la autonomía y la continuidad territorial.

En consecuencia, la ingeniería educacional intercultural se presenta como una oportunidad para cuestionar el paradigma que históricamente ha asociado a los pueblos indígenas con el atraso. Por el contrario, estas experiencias evidencian que los territorios indígenas pueden convertirse en espacios de innovación, sostenibilidad y formación de nuevas generaciones de ingenieros comprometidos con un desarrollo que respete los límites ecológicos, la diversidad cultural y el equilibrio intergeneracional.

V. Análisis y síntesis

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que las experiencias de conservación territorial y formación en ingeniería desarrolladas en la Sierra Nevada de Santa Marta representan una contribución significativa al debate contemporáneo sobre sostenibilidad, educación intercultural y desarrollo tecnológico. Más allá de un caso local, esta experiencia se inserta en una discusión global relacionada con el papel de los pueblos indígenas en la protección ambiental y en la construcción de modelos alternativos de desarrollo.

A. 6,2% Población indígena mundial
Actualmente, los pueblos indígenas representan aproximadamente el 6,2 % de la población mundial, equivalente a más de 476 millones de personas.

B. 476M Personas indígenas protegen el 80% de la biodiversidad del mundo

A pesar de que solo representan el 6.2% distintos organismos internacionales reconocen que los territorios indígenas concentran y protegen una parte significativa de la biodiversidad del planeta, además de albergar una gran proporción de los bosques intactos y ecosistemas estratégicos aún conservados.

Estos datos evidencian que las comunidades indígenas no solo cumplen un papel cultural o histórico, sino también una función fundamental en la sostenibilidad ambiental global.

- Superando paradigmas

En este contexto, la experiencia analizada demuestra que el paradigma que históricamente ha asociado a los pueblos indígenas como anti desarrollistas resulta limitado frente a las actuales crisis climáticas y ecológicas. Las estrategias de recuperación territorial, conservación ambiental y gestión sostenible desarrolladas en la Sierra Nevada evidencian la existencia de modelos organizativos y territoriales basados en principios de equilibrio ecológico y responsabilidad colectiva que hoy adquieren relevancia frente a los desafíos globales de sostenibilidad.

- Innovación sin ruptura cultural

Asimismo, los resultados permiten cuestionar la idea de que el desarrollo tecnológico debe construirse necesariamente desde la explotación intensiva de la naturaleza. Durante gran parte de la modernidad, la ingeniería estuvo orientada hacia la capacidad de transformar el entorno natural para responder a necesidades económicas y productivas. Sin embargo, la experiencia indígena recupera una lógica distinta, donde la observación de la naturaleza, la adaptación al territorio y el equilibrio ambiental constituyen principios fundamentales para el diseño de soluciones sostenibles

En este sentido, el caso de TERRA INITIATIVE demuestra que la innovación tecnológica y los saberes ancestrales no son categorías opuestas, sino dimensiones complementarias capaces de construir nuevas formas de desarrollo. La incorporación de energías renovables y procesos de formación en ingeniería dentro de territorios indígenas evidencia que es posible generar innovación tecnológica sin romper las dinámicas culturales y ambientales de las comunidades.

De igual manera, esta experiencia aporta elementos relevantes al campo de la ingeniería educacional, al mostrar que la formación de ingenieros puede desarrollarse desde enfoques interculturales y territorialmente contextualizados. La

educación en ingeniería deja de concebirse únicamente como un proceso técnico desvinculado de la realidad social y ambiental, y pasa a entenderse como una herramienta para fortalecer la autonomía territorial, la sostenibilidad y la continuidad intergeneracional de las comunidades.

Por lo tanto, esta investigación contribuye a ampliar la comprensión de la ingeniería educacional desde perspectivas no tradicionales, demostrando que los territorios indígenas pueden convertirse en espacios de innovación, producción de conocimiento y formación profesional orientados hacia modelos de desarrollo más sostenibles, equilibrados y ambientalmente responsables.

Vl. Conclusión

La experiencia desarrollada en la Sierra Nevada de Santa Marta evidencia que la relación entre ingeniería, sostenibilidad y territorio puede replantearse desde enfoques interculturales y ambientalmente responsables. Los procesos de conservación impulsados por los pueblos indígenas, junto con la incorporación de proyectos de energía renovable y formación en áreas STEM, demuestran que la innovación tecnológica puede articularse con los conocimientos ancestrales sin romper los principios de equilibrio entre naturaleza, comunidad y cultura.

A. Cuestionando el paradigma del atraso

Asimismo, esta investigación permite cuestionar el paradigma que históricamente ha asociado a los pueblos indígenas con el atraso tecnológico. Por el contrario, las experiencias analizadas muestran que los territorios indígenas pueden convertirse en espacios de innovación, sostenibilidad y formación de nuevas generaciones de ingenieros comprometidos con la protección territorial y la responsabilidad intergeneracional.

B. El papel de la ingeniería educacional

En este sentido, la ingeniería educacional adquiere un papel fundamental al promover procesos formativos contextualizados, donde el diálogo entre ciencia y ancestralidad contribuya a la construcción de modelos de desarrollo más equilibrados y sostenibles.

C. Líneas futuras de investigación

Finalmente, el estudio evidencia la necesidad de continuar investigando sobre ingeniería intercultural, sostenibilidad y educación territorial, especialmente en relación con el impacto de los procesos de transición energética y formación profesional en comunidades indígenas. Estas discusiones pueden aportar nuevas perspectivas para comprender cómo la educación en ingeniería puede responder a los desafíos ambientales y sociales contemporáneos desde enfoques más inclusivos y territorialmente contextualizados.

Referencias

- World Bank - Indigenous Peoples Overview. https://www.worldbank.org/en/topic/indigenouspeoples
- UNESCO - Sierra Nevada de Santa Marta Biosphere Reserve.
- Programa Guardabosques Corazón del Mundo – Radio Santa Fe.
- https://www.radiosantafe.com/2017/02/25/el-puebloarhuaco-recibio-primeras-500-hectareas-de-sierra-nevada-para-plan-guardabosques-corazon-del-mundo/ Programa Guardabosques Corazón del Mundo – El Campesino. https://elcampesino.co/
- programa-guardabosques-la-sierracorazon-del-mundo-recibira-1500-millones-pesos/
- Consejo Territorial de Cabildos de la Sierra Nevada de Santa Marta (CTC).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) – Indigenous Peoples and Biodiversity. https://www.fao.org/indigenous-peoples/en/
- United Nations – Indigenous Peoples. https://www.un.org/development/desa/indigenouspeoples/
- International Renewable Energy Agency (IRENA) – Renewable Energy and Indigenous Communities. https://www.irena.org/
- https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/gobierno-nacional-da-luz-verde-para-la-construccion-de-parques-solares-terra-i-y-terra-ii-que-llevaran-energia-limpia-al-pueblo-arhuaco-en-la-sierra-nevada/
- https://italia.embajada.gov.co/sala-de-prensa/noticias/la-embajada-de-colombia-en-roma-reafirma-su-apoyo-mamo-kuncha-y-la-comitiva-indigena-en-su-visita-al-papa-francisco-con-un-mensaje-de-proteccion-para-la-sierra-nevada-de-santa-marta
- https://greenwood.energy/es/2022/04/07/greenwood-energy-presenta-terr%CA%8C-initi%CA%8Ctive-un-proyecto-solar-a-gran-escala-con-un-importante-impacto-ambiental-y-social-desarrollado-en-conjunto-con-pueblos-indigenas-de-colombia/

Engineering to transform realities: strengthening STEM vocations and female leadership from the ACOFI Student Chapter

1st Valentina Sánchez Mosquera
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
Valentina.sanchez4@utp.edu.co

2nd Julieth Ximena Albarran Vargas
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia
julieth2215594@correo.uis.edu.co

3nd Leidy Laura Rodríguez Cardenas
Universidad Tecnológica de Bolívar
Cartagena de Indias, Colombia
leirodriguez@utb.edu.co

4nd Isabella Sandryth Higuera Parodis
Universidad Autónoma de Bucaramanga
Bucaramanga, Colombia
ihiguera626@unab.edu.co

***Abstract*— The low participation of women in engineering programs —particularly in socioeconomically vulnerable contexts— remains a structural challenge in Colombia. The most recent data from the National Higher Education Information System (SNIES) reveals a concerning trend: in 2024, women represented 32.35% of those enrolled in STEM programs, a proportion that has been declining from the 32.9% recorded in 2022, despite the increase in the absolute number of women entering these careers. In response, the ACOFI Student Chapter, in collaboration with Cátedra Matilda and IEEE Women in Engineering (WIE), developed a project with an educational, social, and formative approach, aimed at increasing female participation in STEM areas and promoting early vocational interest among girls, boys, and young people from vulnerable communities. The project was implemented through workshops, talks, and playful-pedagogical activities led by female undergraduate students from four Colombian universities. Impact assessment was conducted through structured participant observation, recording vocational intentions before and after sessions. Results are partial and methodological strengthening is ongoing; nevertheless, positive and observable changes in the STEM vocational interest of participants are reported, along with greater female involvement in the student spaces linked to the project.**

Keywords*— *Early vocational interest, Educational intervention, Female leadership, Partial results, STEM Education in Colombia, Women in Engineering

I. Introduction (*Heading 1*)

In recent years, numerous international initiatives have sought to strengthen gender equity in STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics); however, female participation in engineering programs continues to represent a structural challenge in Colombia. Factors such as gender stereotypes, the lack of female role models, and limited early exposure to science and technology continue to drive the low representation of women in these disciplines [1].

A recent analysis of SNIES data reveals a trend that runs counter to global efforts: in 2024, 226,831 women enrolled in STEM programs in Colombia —an absolute increase from 216,662 in 2023— yet their percentage participation fell to 32.35%, down from 32.55% in 2023 and 32.9% in 2022 [2].

This means that while more women are entering STEM programs, men are doing so at a faster rate, widening the gap. In fields such as electrical engineering, the situation is especially critical: 90% of graduates are men [3]. At the labor market level, only 24% of STEM professionals in Colombia are women as of 2025, a figure below the global average of 28.2% reported by the World Economic Forum [4][5].

Communities facing economic, educational, and territorial limitations encounter additional barriers to accessing engineering training experiences, making it urgent to foster STEM vocations from an early age in these contexts [6]. In response, the ACOFI Student Chapter —in coordination with Cátedra Matilda and IEEE Women in Engineering (WIE)— developed academic, social, and pedagogical activities targeting children and young people from vulnerable communities, particularly in Tierra Bomba (Bolívar) and educational institutions in Colombia's Andean region. These activities were led primarily by female engineering students from four universities: Universidad Tecnológica de Pereira, Universidad Industrial de Santander, Universidad Tecnológica de Bolívar, and Universidad Autónoma de Bucaramanga.

This article reports partial results from this ongoing experience, presenting the methodology implemented, the observations recorded, and the available quantitative indicators, with the aim of documenting lessons learned and contributing to the debate on effective strategies for the inclusion of women and girls in STEM in Colombia.

II. Marco Teorico

A. The Gender Gap in STEM in Colombia: 2022–2024 Trend

Table I summarizes the recent evolution of female participation in STEM programs in Colombia based on SNIES data. The most notable finding is that, although the absolute number of women grows, their percentage participation decreases slightly year after year, indicating that current strategies are insufficient to reverse the structural trend.

Year	Women in STEM	Total STEM	Female participation
2022	–	–	32,9 %
2023	216.662	665.000 (est.)	32,55 %
2024	226.831	701.069	32,35 %

Table I. Female participation in STEM programs in Colombia (2022–2024). Source: SNIES-MEN [2].

In specific engineering programs, the inequity is even more pronounced. According to an analysis by Fundación Universitaria Salesiana using SNIES and OLE data, the gender distribution among graduates shows: electrical engineering (90.06% men), mechanical engineering (86.8%), electronics and telecommunications (82.57%), systems and computer science (73.05%), and civil engineering (53.35%) [3]. Electrical engineering therefore holds the greatest gender gap among engineering graduates in Colombia.

In broader terms, Colombia reached a historic record of 2,553,560 students enrolled in higher education in 2024 —an increase of 3.10% compared to 2023, driven by the free tuition policy at public institutions [7]. However, this growth has not narrowed the gender gap in engineering, which reaffirms the need for specific, targeted interventions.

B. UTP Data: Female Enrollment in Engineering (2013–2024)

The Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) maintains an updated institutional statistics system that enables historical tracking of indicators by program and gender. Historical data on admissions by sex in electrical engineering (2013–2023) show that female participation has remained between 10% and 20% of admitted students over the past decade [8], consistent with the national trend. Fig. 1 illustrates the comparative evolution of enrollment by sex across the main engineering programs at the faculty.

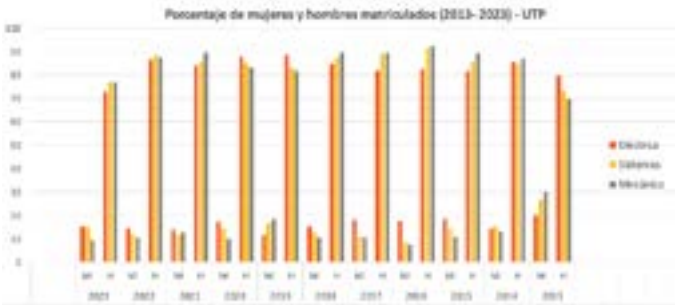


Fig. 1: Percentage of women and men enrolled by engineering program at UTP (2013–2023). Source: Office of Planning, Universidad Tecnológica de Pereira [8].

C. Factors Explaining the Gap

The specialized literature identifies multiple contributing factors. Gender stereotypes that associate technical ability with the male gender emerge as early as age six, reducing girls' willingness to explore intellectually demanding fields [9]. The Matilda Effect —described by Rossiter in 1993— perpetuates the historical invisibilization of women's contributions to science [10]. Further barriers include non-inclusive environments in engineering faculties [11] and persistent wage gaps: in Colombia, women in STEM earn on average between 20% and 24% less than their male peers [12].

D. Early Educational Interventions and Peer Mentoring

International evidence indicates that early educational interventions are among the most effective factors in increasing female interest in STEM. UNESCO and the IEA note that "half of the world's potential in mathematics and science is being lost" because high-achieving girls hold lower vocational aspirations in these areas, even when their academic performance equals or exceeds that of boys [13]. Peer mentoring —with role models at comparable formative stages— has shown positive effects on self-efficacy and vocational interest [14].

E. WIE-UTP and Cátedra Matilda

IEEE Women in Engineering (WIE) is one of the largest international professional organizations dedicated to promoting women engineers and scientists. Its chapter at UTP (established in 2017) has carried out talks at schools, STEM workshops, technical seminars, and campaigns to raise the visibility of local female role models [15]. Cátedra Matilda —coordinated by ACOFI, CONFEDI, and LACCEI— seeks to make visible the role of women in Latin American engineering and to combat the Matilda Effect in academic environments [16].

III. METHODOLOGY

This work was developed under a descriptive mixed-methods approach, combining participant observation —the primary impact evaluation strategy— with the analysis of quantitative indicators from secondary sources. It is acknowledged that result measurement strategies are in the process of development and strengthening.

A. Activity Design and Implementation

Activities were structured in three complementary modalities: (1) Motivational talks: awareness sessions on engineering as a profession and on the historical and current role of women in science and technology, featuring international and local female role models, conducted with students from grades 1 through 11. (2) STEM workshops: hands-on activities covering physical phenomena, computational thinking, basic electronics, and

renewable energy, with emphasis on the active participation of girls; these include the STEM Social Appropriation of Knowledge Pilot at Fundación Gimnasio Pereira (2022). (3) Activities in vulnerable communities: interventions in Tierra Bomba (Bolívar) and other areas with limited STEM access. In all modalities, activities were led primarily by female undergraduate students affiliated with the ACOFI Student Chapter and WIE.

B. Evaluation Strategy: Participant Observation

At the start of each activity, facilitators posed an open question to participants: what would they like to study in the future, and why? It was recorded how many girls and young women spontaneously mentioned engineering or other STEM areas as a vocational option. At the close of the session, the same question was repeated and changes were documented. This method is appropriate for the context —children in diverse community and school settings— and allows for the capture of immediate shifts in perception without imposing the formality of a written instrument. Its limitations (absence of control groups, reliance on facilitators' records) are acknowledged and inform the design of more robust tools for future stages.

C. Computational Tool

Development has begun on a Python-based tool for the aggregated recording and analysis of participation levels and vocational interest observed during sessions. The tool is currently in a testing phase; to date, no consolidated results have been produced. Its validation constitutes a line of future work for the project.

D. Complementary Indicators

Secondary evidence sources used include: (1) historical enrollment data by sex at UTP (2013–2024), from the Office of Institutional Planning [8]; (2) data on female participation within the ACOFI Student Chapter and WIE-UTP; and (3) national STEM enrollment statistics from SNIES and ACOFI reports [2][7].

IV. PARTIAL RESULTS AND OBSERVED IMPACT

The results presented below are partial and correspond to one phase of an ongoing project.

A. Vocational Changes Observed in Sessions

The open vocational question applied at the start and close of each activity enabled identification of a consistent trend: in approximately 80% of groups, at the start of the session no girl —or at most one— mentioned engineering or a STEM career as a vocational option. By the end of the activity, in that same group, two or more students —in most cases girls— included engineering, physics, programming, or other STEM fields among their future options.

This change cannot be interpreted as a definitive vocational decision —it is a reflection made in the immediate context of the activity— but it does represent an observable shift in the perception of engineering as a real possibility. Participants frequently expressed surprise upon learning about the work carried out by women engineers and upon discovering that they themselves could actively participate in technical experiments. The role of the university facilitators —close in age and background to the participants— was repeatedly identified as the most motivating element of the sessions.

B. Female Participation in the ACOFI Chapter and WIE

Throughout the project's execution period, an increase was observed in the active participation of women within the ACOFI Student Chapter and WIE-UTP, reflected in greater female presence in leadership roles, activity organization, and institutional representation. This phenomenon has a multiplier effect: students who lead the project become role models for the generations entering engineering faculties, contributing to the building of more inclusive academic communities.

C. Quantitative Context: The National Trend as Structural Evidence

SNIES data (Table I) situates the project in a context of urgency: female percentage participation in STEM fell from 32.9% (2022) to 32.35% (2024), despite the absolute increase in enrollment [2]. This finding demonstrates that simple enrollment growth does not guarantee closing the gender gap, and reinforces the need for active, sustained interventions. For UTP specifically, the historical pattern of low female participation in electrical engineering (between 10% and 20% of admitted students) has shown no significant change over a decade [8], underscoring the urgency of the work carried out by the ACOFI Student Chapter in the region.

D. Limitations and Evaluation Roadmap

The team acknowledges the limitations of the current evaluation approach (no standardized instruments, no control groups, no longitudinal follow-up). The roadmap for upcoming phases includes: (1) design and validation of a standardized instrument adapted to different age groups and contexts; (2) full operationalization of the Python tool; and (3) establishment of follow-up mechanisms with the participating educational institutions to track real vocational decisions in the medium term.

V. DISCUSION

The findings are consistent with international evidence: the primary barrier preventing academically high-achieving girls from choosing STEM careers is not ability, but the lack of exposure to meaningful experiences and role models that make that option visible as attainable [13]. The observed pattern —increased vocational interest at the end of each session—

suggests that even relatively brief interventions hold the potential to reshape entrenched perceptions.

The most recent national data lends the project additional significance: if the percentage gender gap in STEM widens slightly in 2024 despite the absolute increase in women, it becomes clear that overall enrollment growth is insufficient. Local, targeted interventions such as the one described here are necessary complements to national-level policies.

The decision to use young university women as facilitators — thereby reducing the perceived distance between participants and the world of engineering— is supported by the literature [14]. Transparency about methodological limitations is itself a contribution: documenting what was done, what was observed, and what remains to be measured builds cumulative knowledge on STEM initiatives led by undergraduate students, an area with limited presence in Colombian academic literature.

VI. CONCLUSIONES

The most recent SNIES data (2024) confirms that the gender gap in STEM in Colombia is not closing at the required pace: while more women enroll in absolute terms, the percentage participation decreases slightly. This context makes the project described here a necessary and timely response from within the student university space.

Activities developed by the ACOFI Student Chapter, in coordination with WIE and Cátedra Matilda, succeeded in bringing engineering closer to girls, boys, and young people from vulnerable communities across different regions of Colombia. Observations point to immediate positive changes in participants' vocational perceptions, with the role of university facilitators as the key differentiating element of the strategy.

Results are partial. The main methodological lesson is the need to systematize evaluation instruments to document actual impact with greater rigor. The project is advancing toward a more robust measurement system that includes formal instruments and longitudinal follow-up. It is recommended to scale the initiative, establish follow-up mechanisms with the institutions that received interventions, and build partnerships with the productive sector to make visible the real career trajectories of women engineers in the workforce.

REFERENCES

[1] V. Sánchez Mosquera and WIE-UTP team, "Female leadership in STEM fields," presentation at WIE-UTP, Universidad Tecnológica de Pereira, 2023.

[2] El Tiempo, "Female participation in STEM programs is declining rather than growing: the gender gap in science and technology is widening," El Tiempo, Life & Education, Mar. 4, 2026. [Online]. Available: https://www.eltiempo.com/vida/educacion/participacion-de-mujeres-en-carreras-stem-esta-cayendo-en-lugar-de-crecer-brecha-de-genero-en-ciencia-y-tecnologia-se-hace-mas-grande-3537340

[3] Fundación Universitaria Salesiana / Sociedad Colombiana de Ingenieros (SCI), "Overview of women in engineering in Colombia," analysis using SNIES-OLE-MEN data, 2023. [Online]. Available: https://sci.org.co/el-panorama-que-enfrentan-las-mujeres-en-la-ingenieria/

[4] Infobae / United Nations, "In Colombia, only 24% of science and technology professionals are women: closing the gap," Infobae, Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.infobae.com/tecno/2025/07/16/en-colombia-solo-el-24-de-los-profesionales-en-ciencia-y-tecnologia-son-mujeres-como-cerrar-la-brecha/

[5] World Economic Forum (WEF), Global Gender Gap Report 2024, Geneva, Switzerland, 2024.

[6] Organization of Ibero-American States (OEI), "Gender gaps in STEM areas in Latin America," 2023.

[7] Ministry of National Education (MEN) / SNIES, "Official higher education statistics 2024," press release, Jul. 31, 2025. [Online]. Available: https://www.mineducacion.gov.co/portal/salaprensa/Comunicados/425173

[8] Office of Planning, Universidad Tecnológica de Pereira, "Statistics and strategic indicators — historical data on admitted students by sex (2013–2024)," updated Dec. 2024. [Online]. Available: https://estadisticas.utp.edu.co

[9] L. Bian, S.-J. Leslie, and A. Cimpian, "Gender stereotypes about intellectual ability emerge early and influence children's interests," Science, vol. 355, no. 6323, pp. 389–391, Jan. 2017, doi: 10.1126/science.aah6524.

[10] M. W. Rossiter, "The Matthew Matilda Effect in Science," Social Studies of Science, vol. 23, no. 2, pp. 325–341, 1993.

[11] N. Hamid-Betancur and M. Torres-Madronero, "The Gender Gap in Engineering Programs in Colombia," Ingeniería e Investigación, vol. 41, no. 2, 2021, doi: 10.15446/ing.investig.86758.

[12] Colombian Association of Engineers (ACIEM), "Women in engineering: labor and wage gaps," La Nota Económica, Jun. 2024. [Online]. Available: https://lanotaeconomica.com.co/movidas-empresarial/mujeres-en-la-ingenieria-una-mirada-al-panorama-actual-de-brechas-laborales-y-salariales/

[13] UNESCO and IEA, "Missing out on half of the world's potential: Fewer female than male top achievers in mathematics and science want a career in these fields," Compass: Briefs in Education, no. 17, Apr. 2022.

[14] E. J. Hernández-Leal, G. P. Gasca-Hurtado, and D. H. Agudelo, "Characterization of female student populations in engineering programs in Colombia: registration, admission, enrollment, and graduation," in Proc. LEIRD 2023, Dec. 2023.

[15] IEEE Women in Engineering (WIE), "Women in Engineering initiatives and educational outreach programs," 2024.

[16] Cátedra Matilda and Women in Engineering, ACOFI–CONFEDI–LACCEI, "Matilda and women in engineering in Latin America," vol. 3, R. Giordano Lerena and A. Páez Pino, Eds., 2023. [Online]. Available: https://catedramatilda.org/category/publicaciones/

[17] Colombian Association of Engineering Faculties (ACOFI), "Report: Only 3 out of 10 engineering students in Colombia are women," ACIS, 2024. [Online]. Available: https://www.acis.org.co/blog/noticias-2/solo-3-de-cada-10-estudiantes-de-ingenieria-en-colombia-son-mujeres

Ciclo Autónomo de Observabilidad y Diagnóstico Operativo Mediante LLM Local Sobre Infraestructura Virtualizada

1st Maryam Hernández Giraldo
Capítulo Estudiantil ACOFI
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
mhernandezg_@uqvirtual.edu.co

2nd Luis E. Sepúlveda-Rodríguez
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
lesepulveda@uniquindio.edu.co

***Resumen*— La creciente complejidad de los sistemas distribuidos ha puesto de manifiesto las limitaciones de la monitorización tradicional basada en umbrales estáticos, creando desafíos importantes en la visibilidad contextual, la trazabilidad operativa y la toma de decisiones en tiempo real. Aunque la literatura reciente sobre AIOps propone la convergencia de Big Data, Machine Learning y orquestación inteligente como una solución estratégica, la mayoría de los estudios asume conocimientos previos avanzados y depende de infraestructuras complejas o entornos corporativos de alto presupuesto. Esto genera un vacío en entornos académicos y laboratorios de bajo costo, donde la experimentación práctica suele estar limitada.**

***Este artículo presenta el diseño e implementación de un prototipo de AIOps funcional y de baja complejidad construido sobre virtualización de Tipo II usando Oracle VM VirtualBox. Al usar dos máquinas virtuales de Linux Mint—configuradas como un nodo de control y un nodo de carga—se simuló un entorno de producción bajo condiciones de estrés, lo que permitió capturar y procesar métricas operativas dentro de un contexto virtualizado.**

***El sistema integra un motor de automatización (n8n desplegado vía Docker) y un Modelo de Lenguaje Grande (LLM) ejecutado localmente a través de Ollama (modelo Llama 3), estableciendo una arquitectura donde la virtualización y la IA funcionan de manera complementaria. Cada 60 segundos, el entorno recoge métricas de CPU, memoria y carga, las procesa con IA y clasifica el riesgo operativo. Finalmente, el sistema genera recomendaciones en lenguaje natural, que se registran para asegurar trazabilidad y apoyar la toma de decisiones críticas.**

***A diferencia de las propuestas centradas en la automatización total, este sistema adopta un modelo de Humano-en-el-bucle, posicionándose como un observador analítico permanente que mejora las capacidades de respuesta humanas.**

Palabras clave —AIOps; infraestructura virtualizada ; Human-in-the-loop; observabilidad operativa.

I. Introducción

La administración de infraestructuras tecnológicas contemporáneas enfrenta una tensión estructural derivada de la complejidad creciente de los sistemas distribuidos y del volumen exponencial de telemetría que generan. Los métodos tradicionales de monitoreo, basados en umbrales estáticos y reglas predefinidas, resultan progresivamente insuficientes para garantizar visibilidad contextual, trazabilidad operativa y toma de decisiones en tiempo real [7], [12]. Ante esta limitación, el paradigma Artificial Intelligence for IT Operations (AIOps) ha emergido como una estrategia que converge inteligencia artificial, automatización y observabilidad para habilitar una gestión proactiva, predictiva y basada en datos [4], [9]. Sin embargo, la literatura predominante asume entornos corporativos de alto presupuesto, infraestructuras cloud complejas y equipos de ingeniería especializados, lo que excluye sistemáticamente a laboratorios académicos y entornos de bajo costo de la experimentación práctica con estas tecnologías [7], [12].

Este vacío metodológico y tecnológico motiva la propuesta de un prototipo funcional de ciclo autónomo de observabilidad y diagnóstico operativo, diseñado para ser reproducible, de bajo costo y ejecutable sobre infraestructura virtualizada local. La arquitectura planteada contempla la integración de un hipervisor de tipo II (Oracle VM VirtualBox), un motor de orquestación ligero (n8n desplegado en Docker) y un modelo de lenguaje de gran escala (LLM) ejecutado on-premise mediante Ollama utilizando Llama 3. Asimismo, el enfoque adopta un esquema Human-in-the-Loop (HITL), priorizando la interpretabilidad y la supervisión humana sobre procesos de automatización completamente autónomos. Dentro del alcance propuesto, el sistema busca realizar recolección periódica de métricas de CPU, memoria y carga del sistema, procesarlas mediante razonamiento contextual y generar recomendaciones en lenguaje natural orientadas al apoyo de la toma de decisiones operativas.

Bajo esta perspectiva, el presente documento expone los avances de una propuesta de trabajo de grado, orientada al diseño, implementación y validación de un sistema AIOps mínimo viable sobre infraestructura virtualizada local. La propuesta se estructura en diferentes fases metodológicas que permiten distinguir entre los componentes actualmente predefinidos y los resultados esperados de las etapas posteriores de implementación. De esta manera, se busca demostrar la viabilidad técnica de la observabilidad operativa inteligente en entornos académicos con recursos limitados, integrando automatización operativa, análisis contextual mediante

modelos de lenguaje y supervisión humana dentro de un enfoque Human-in-the-Loop (HITL).

II. Marco teórico

2.1. De la monitorización reactiva a la observabilidad basada en AIOps

La administración de infraestructuras modernas enfrenta una contradicción estructural: mientras los sistemas distribuidos generan volúmenes crecientes de telemetría, los métodos de monitoreo basados en reglas fijas y umbrales estáticos no escalan adecuadamente ante la complejidad de las arquitecturas contemporáneas basadas en microservicios. Esta tensión ha sido identificada como una limitación sistémica de la administración tradicional de sistemas, cuyos enfoques dependientes de intervención manual y automatización basada en reglas presentan dificultades para responder a las demandas operativas modernas [12]. Como consecuencia, se incrementan las tasas de falsas alertas y disminuye la capacidad de detectar anomalías complejas cuyo comportamiento no se ajusta a patrones discretos dentro de entornos descentralizados.

Estudios recientes demuestran que la definición dinámica de umbrales y el modelado de datos mediante técnicas de aprendizaje profundo proporcionan mecanismos más robustos para el monitoreo y la detección de anomalías en redes y sistemas distribuidos [9]. Esta transición representa una ruptura con los enfoques tradicionales de monitoreo reactivo, ya que los sistemas AIOps no se limitan a comparar métricas contra valores predefinidos, sino que aprenden patrones de comportamiento normal y detectan desviaciones operacionalmente significativas. De manera complementaria, investigaciones sobre infraestructuras de escritorio virtualizado (VDI) evidencian que la incorporación de modelos de machine learning en estrategias AIOps permite reducir tiempos de respuesta, optimizar el consumo de recursos y disminuir la dependencia de la gestión manual de incidentes, favoreciendo esquemas de administración proactiva de capacidad [4].

2.2. LLMs como motores de razonamiento operativo y viabilidad local

Los Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLMs) introducen capacidades cualitativamente nuevas en el análisis de datos operativos. A diferencia de los modelos de machine learning entrenados para tareas específicas, estos modelos exhiben capacidades de razonamiento generalizable que les permiten analizar logs y métricas de manera contextual, generando diagnósticos y recomendaciones en lenguaje natural. Investigaciones recientes destacan su potencial en tareas como diagnóstico de fallos, inferencia causal y respuesta inteligente a consultas aplicadas sobre datos operativos complejos [1].

Un aspecto crítico para entornos académicos y escenarios con recursos limitados corresponde a la viabilidad de ejecutar LLMs localmente. En este contexto, propuestas recientes orientadas al análisis semántico de logs mediante modelos de código abierto demuestran que el procesamiento local permite preservar la privacidad de los datos operativos y reducir la dependencia de servicios externos [11]. De manera complementaria, estudios enfocados en automatización industrial evidencian que los grandes modelos de IA fortalecen el análisis de series de tiempo incluso bajo condiciones de disponibilidad limitada de datos y restricciones computacionales propias de aplicaciones reales [6]. Asimismo, la literatura reciente sobre agentes inteligentes y modelos multimodales refuerza la viabilidad técnica de integrar LLMs en arquitecturas distribuidas ligeras, favoreciendo esquemas de razonamiento contextual y automatización operativa ejecutados de manera local [5].

2.3. Virtualización y orquestación ligera como arquitectura base

La virtualización de tipo II representa una plataforma metodológicamente rigurosa para el desarrollo de sistemas AIOps. Özdemir y Özcan [4] validan pipelines completos sobre telemetría de producción en clústeres VDI, obteniendo resultados que "demuestran la viabilidad práctica de AIOps para la gobernanza holística del rendimiento de VDI en tiempo real". Zhang et al. [3] establecen que "las máquinas virtuales (VM) han surgido como un elemento vital en la infraestructura de la nube, ofreciendo flexibilidad, optimización de recursos y una gestión eficiente de la carga de trabajo", posicionándolas como fuentes primarias de telemetría operativa.

En este contexto, la orquestación transforma el análisis en acción operativa. Liu et al. [10] proponen arquitecturas donde "los agentes de IA sirven como el núcleo de la toma de decisiones autónoma, habilitando el monitoreo en tiempo real de los estados del sistema y la ejecución dinámica de control". Nguyen et al. [9] validan el despliegue de módulos AIOps mediante contenedores, señalando que "el desarrollo de todo el stack de software mediante composición declarativa simplifica el despliegue y la gestión de AIOps a lo largo del tiempo". Chen et al. [2] establecen que la automatización del ciclo completo es necesaria para que un sistema AIOps sea genuinamente operativo, principio replicado en este trabajo mediante cron y n8n como equivalente funcional académico.

2.4. Detección dinámica de anomalías y principio Human-in-the-Loop

En infraestructuras distribuidas, la anomalía se define como desviación significativa del comportamiento esperado, inferido a partir de patrones históricos, no como superación de umbrales fijos. Nguyen et al. [9] establecen formalmente esta distinción al contrastar la detección basada en umbrales estáticos con la "línea de base dinámica" producida por modelos de deep learning, donde "las anomalías en el monitoreo de red se identifican como desviaciones significativas de los valores del nivel de actividad normal". Zhang et al. [3] identifican tres tipologías críticas en entornos VM (secuencia de eventos anómalos, anomalía de intervalo de tiempo y anomalía de parámetros), conceptualmente equivalentes a las variaciones de CPU, memoria y carga que evalúa este prototipo. Long et al. [1] enfatizan que los LLMs exhiben "reconocimiento de patrones complejos" que les permiten identificar dependencias de larga distancia, justificando su uso como motor analítico capaz de razonar sobre combinaciones de métricas no aprendidas por modelos supervisados.

La supervisión humana no es una limitación temporal, sino un principio de diseño deliberado. Liu et al. [10] formalizan roles donde los operadores humanos actúan como "supervisores, colaboradores y tomadores de decisiones finales", mientras los agentes de IA proporcionan análisis y recomendaciones. Matsikira et al. [12] proyectan que en el futuro "la IA podría habilitar sistemas TIC completamente autónomos que manejen cada aspecto de la administración de sistemas", pero identifican explícitamente desafíos actuales como costos elevados y necesidad de personal capacitado, subrayando por qué el modelo HITL es la respuesta técnicamente honesta al estado actual de madurez de AIOps. Nguyen et al. [9] ilustran esta postura en monitoreo de seguridad, donde "el control sobre el flujo de datos benignos depende de los operadores SOC, quienes filtran los datos maliciosos basándose en los resultados del monitoreo". Liu et al. [10] establecen además que los LLMs "mejoran la credibilidad y transparencia de las decisiones de despacho, ayudando a los operadores a comprender y validar mejor las salidas del modelo", dimensión materializada en este trabajo mediante recomendaciones en lenguaje natural registradas en logs estructurados.

III. Metodología

Este trabajo adopta un enfoque de investigación aplicada con diseño de prototipo funcional, siguiendo los principios de *Design Science Research* para sistemas de información. La metodología se estructura en cuatro fases secuenciales: (i) definición de requisitos arquitectónicos, (ii) implementación del entorno virtualizado distribuido, (iii) integración de automatización y modelo de lenguaje, y (iv) validación experimental bajo condiciones controladas de estrés operativo. Este enfoque permite evaluar la viabilidad técnica, la reproducibilidad y la utilidad analítica del sistema en un contexto académico de recursos limitados.

3.1. Arquitectura del sistema

El prototipo se compone de tres capas interconectadas que replican el ciclo de observabilidad operativa:

- **Capa de infraestructura virtualizada:** Hipervisor Oracle VM VirtualBox 7.0 (tipo II). Dos máquinas virtuales con Linux Mint 21.3 Cinnamon: *nodo-control* (2 vCPU, 4 GB RAM, 20 GB disco) como centro de administración y orquestación, y *nodo-carga* (idéntica configuración) como fuente de telemetría y sistema observado.
- **Capa de red y comunicación:** Cada VM dispone de dos adaptadores de red: NAT para acceso a internet y descarga de paquetes, y Host-only para comunicación privada entre nodos. IPs asignadas: 192.168.56.102 (control) y 192.168.56.103 (carga). Conectividad validada mediante ping y acceso remoto seguro mediante OpenSSH server.
- **Capa de inteligencia y automatización:** Motor de flujo n8n v1.25.0 desplegado en Docker Desktop sobre el host físico Windows, integrado con Ollama v0.1.30 ejecutando el modelo llama3:8b-instruct-q4_0 localmente. La API de Ollama se expone a la red Host-only para consulta remota desde el nodo-control.

3.2. recolección y procesamiento de datos

Cada 60 segundos, el nodo-control ejecuta scripts en Bash/Python que consultan métricas operativas del nodo-carga vía SSH. Se capturan:
Uso de CPU (%)
Memoria disponible y utilizada (MB)
Carga promedio del sistema (1-min, 5-min, 15-min)
Estado de procesos críticos y contexto de ejecución
Los datos se normalizan, estructuran y serializan en un objeto JSON con metadatos temporales (timestamp, nodo_origen, intervalo), garantizando trazabilidad operativa y compatibilidad directa con el motor de análisis. Esta frecuencia de muestreo equilibra la granularidad diagnóstica con la carga computacional en hardware convencional.

3.3. Integración del motor de IA y modelo Human-in-the-Loop

El análisis de métricas se realiza mediante un LLM local ejecutado con Ollama, eliminando dependencia de APIs externas y asegurando privacidad de datos operativos. Se diseñó un prompt estructurado que:
Contextualiza las métricas recibidas como estado actual del sistema.

Solicita clasificación de riesgo operativo (bajo, medio, alto) con justificación técnica.

Exige recomendaciones accionables en lenguaje natural, priorizando intervenciones verificables y de bajo impacto.

El sistema opera bajo un modelo Human-in-the-Loop (HITL): el LLM genera diagnósticos y sugerencias, pero la ejecución de acciones correctivas sobre la infraestructura permanece bajo supervisión humana. Esta distribución de roles se alinea con el principio de diseño responsable en IA operativa, donde la inteligencia artificial amplifica la capacidad analítica del operador sin reemplazar su juicio crítico [9], [10].

IV. Resultados preliminares y factibilidad técnica del proyecto

La fase actual del proyecto permitió validar preliminarmente la factibilidad técnica de la arquitectura propuesta mediante pruebas controladas sobre un entorno virtualizado local. Debido a que el trabajo se encuentra en desarrollo, los resultados presentados corresponden a avances experimentales iniciales orientados a verificar la integración funcional entre virtualización, automatización, monitoreo distribuido y análisis contextual mediante modelos de lenguaje ejecutados localmente.

En primer lugar, se validó el despliegue operativo de los componentes principales del entorno experimental. El motor de automatización n8n fue ejecutado exitosamente mediante contenedores Docker sobre el host anfitrión Windows, manteniéndose accesible a través del puerto 5678/TCP durante las pruebas realizadas. Asimismo, se confirmó la disponibilidad

local del modelo llama3 mediante Ollama, verificando la posibilidad de ejecutar inferencias LLM completamente on-premise sin dependencia de servicios cloud externos. Esta integración constituye uno de los principales resultados preliminares del proyecto, ya que demuestra la viabilidad de incorporar capacidades de razonamiento contextual dentro de entornos académicos con recursos computacionales limitados.

De manera complementaria, se validó la comunicación distribuida entre máquinas virtuales Linux Mint sobre Oracle VM VirtualBox mediante OpenSSH. La arquitectura permitió establecer conectividad remota entre el nodo-control y el nodo-carga, habilitando la ejecución automatizada de scripts de monitoreo y transferencia de métricas operativas a través de la red Host-only configurada para el laboratorio.

TABLE I. ESTADO PRELIMINAR DE VALIDACIÓN DEL ENTORNO EXPERIMENTAL

Componente	Estado	Resultado
Docker Desktop	Operativo	Validado
Contenedor n8n	Activo	Validado
Ollama	Operativo	Validado
Modelo llama 3	Disponible localmente	Validado
Open SSH	Funcional	Validado
Comunicación entre nodos	Estable	Validado
Recolección de métricas	Operativa	Validado

Posteriormente, se realizaron pruebas preliminares del ciclo autónomo de observabilidad mediante la ejecución periódica de scripts de captura y análisis de métricas operativas. El sistema logró recolectar información asociada al uso de CPU, consumo de memoria y carga promedio del sistema, generando eventos estructurados almacenados en archivos de trazabilidad JSON. Durante las pruebas de funcionamiento normal, el sistema clasificó el riesgo operativo como bajo y generó recomendaciones orientadas al monitoreo preventivo y mantenimiento programado.

Con el propósito de validar el comportamiento del sistema ante condiciones anómalas, se ejecutaron cargas artificiales utilizando la herramienta stress sobre el nodo observado. Bajo estas condiciones, el entorno registró incrementos en la carga operativa y produjo clasificaciones dinámicas de riesgo medio y alto, acompañadas de recomendaciones contextualizadas en lenguaje natural. Entre las respuestas generadas se identificaron eventos como “ADVERTENCIA: Monitoreo intensivo activado” y “ALERTA CRÍTICA: Intervención inmediata requerida”, evidenciando la capacidad preliminar del sistema para detectar condiciones de sobrecarga y generar diagnósticos interpretables.

TABLE II. EVENTOS OPERATIVOS DETECTADOS DURANTE LAS PRUEBAS PRELIMINARES

Timestamp	Riesgo detectado	Estado de estrés	Decisión generada
21:46:08	Bajo	False	Sistema estable
21:46:12	Medio	False	Monitoreo intensivo
21:50:17	Medio	True	Advertencia operativa
21:52:15	Alto	True	Intervención inmediata

De manera adicional, las pruebas permitieron validar la persistencia estructurada de eventos operativos y decisiones generadas por el sistema. Los registros almacenados incluyen metadatos temporales, clasificación de riesgo, contexto de estrés operativo y recomendaciones asociadas, fortaleciendo la trazabilidad del ciclo de observabilidad y facilitando futuras etapas de análisis comparativo y validación experimental.

Aunque los resultados actuales corresponden a una fase preliminar de implementación, las pruebas realizadas evidencian la factibilidad técnica de integrar virtualización ligera, automatización distribuida y modelos de lenguaje locales dentro de un mismo entorno académico reproducible. En este sentido, el proyecto busca consolidar en etapas posteriores un ciclo autónomo de observabilidad capaz de incorporar análisis contextual más robusto, correlación avanzada de métricas, generación automática de diagnósticos y evaluación comparativa de desempeño bajo distintos escenarios de carga operativa. De manera complementaria, se contempla como línea futura de evolución arquitectónica la posible migración y escalabilidad del entorno hacia hipervisores de tipo I, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema sobre infraestructuras con mayor nivel de aislamiento, rendimiento y cercanía a escenarios de producción empresarial.

Como resultado esperado de las siguientes fases metodológicas, se proyecta validar experimentalmente la estabilidad del sistema bajo cargas prolongadas, medir tiempos de respuesta asociados al análisis mediante LLM, evaluar precisión en la clasificación de riesgo operativo y analizar el impacto del enfoque Human-in-the-Loop (HITL) sobre la interpretabilidad y utilidad de las recomendaciones generadas. Asimismo, se espera consolidar un entorno reproducible de bajo costo que pueda servir como referencia metodológica para futuros laboratorios académicos interesados en la implementación práctica de arquitecturas AIOps sobre infraestructura virtualizada local y potencialmente extrapolables a entornos basados en hipervisores de tipo I.

V. Discusión

Los resultados preliminares obtenidos permiten discutir el proyecto desde tres perspectivas complementarias. La primera se relaciona con la viabilidad académica de implementar arquitecturas AIOps sobre infraestructura virtualizada de bajo costo. A diferencia de gran parte de la literatura reciente, donde las propuestas suelen desarrollarse sobre entornos cloud complejos o infraestructuras corporativas altamente especializadas [7], [12], el presente trabajo demuestra que es posible construir un ciclo funcional de observabilidad operativa utilizando recursos accesibles dentro de un laboratorio académico. La integración entre virtualización tipo II, automatización ligera y modelos de lenguaje ejecutados localmente permitió reproducir escenarios básicos de monitoreo inteligente sin depender de plataformas comerciales externas ni servicios cloud propietarios.

La segunda perspectiva se asocia con el papel de los LLMs como motores de razonamiento contextual dentro del proceso de observabilidad. Los resultados preliminares muestran que el modelo local logró interpretar métricas operativas, clasificar niveles de riesgo y generar recomendaciones en lenguaje natural coherentes con el estado del sistema. Este comportamiento coincide con lo planteado por Long et al. [1], quienes destacan que los LLMs poseen capacidades de reconocimiento de patrones complejos y razonamiento contextual aplicables al análisis operativo. Asimismo, los hallazgos obtenidos refuerzan lo señalado por Zhang et al. [11] respecto a la viabilidad de ejecutar análisis semántico de logs y eventos completamente on-premise, aspecto especialmente relevante para contextos académicos donde las restricciones presupuestales y de privacidad limitan el acceso a soluciones de AIOps a gran escala.

Una tercera perspectiva corresponde al valor metodológico del enfoque Human-in-the-Loop (HITL). En lugar de plantear un modelo completamente autónomo, el sistema se diseñó como un observador analítico capaz de asistir al operador humano mediante diagnósticos interpretables y recomendaciones contextualizadas. Esta decisión se alinea con lo propuesto por Liu et al. [10], quienes establecen que los agentes de IA deben complementar la capacidad de decisión humana y no reemplazarla completamente. De igual manera, Matsikira et al. [12] advierten que, aunque la automatización total representa una tendencia futura en AIOps, aún persisten limitaciones relacionadas con interpretabilidad, supervisión y confiabilidad operativa. En este contexto, el modelo HITL implementado constituye una aproximación técnicamente prudente y metodológicamente coherente para escenarios académicos de experimentación.

Desde la perspectiva de la observabilidad operativa, las pruebas realizadas también evidencian que incluso métricas relativamente simples —CPU, memoria y carga promedio— pueden adquirir valor diagnóstico cuando son interpretadas contextual y correlacionalmente mediante IA. Esto resulta consistente con Nguyen et al. [9], quienes sostienen que los enfoques AIOps modernos no dependen exclusivamente de umbrales estáticos, sino de la capacidad de detectar desviaciones significativas respecto al comportamiento operativo esperado. Aunque el prototipo actual no incorpora modelos avanzados de aprendizaje profundo ni correlación masiva de eventos, los resultados preliminares sugieren que la combinación entre telemetría estructurada y razonamiento contextual puede constituir una base funcional para sistemas de observabilidad más sofisticados.

El proyecto también posee un valor formativo importante dentro de la educación en ingeniería. La construcción del entorno experimental integró competencias relacionadas con virtualización, redes, automatización, observabilidad, análisis de datos operativos e inteligencia artificial aplicada. En consecuencia, el aporte del trabajo no se limita únicamente al desarrollo técnico del prototipo, sino también a la construcción de una experiencia reproducible de aprendizaje aplicado sobre tecnologías emergentes de AIOps dentro de contextos universitarios con recursos limitados.

Dado que el proyecto continúa en desarrollo, los resultados actuales corresponden principalmente a una validación preliminar de integración y funcionamiento. En este sentido, futuras etapas deberán profundizar en aspectos como estabilidad bajo cargas prolongadas, precisión del análisis contextual, tiempos de respuesta del LLM y evaluación comparativa sobre infraestructuras de virtualización más robustas. No obstante, los avances alcanzados permiten sostener que la propuesta constituye una base técnicamente viable para explorar observabilidad inteligente y diagnóstico operativo asistido por IA en escenarios académicos reproducibles.

Estos resultados preliminares permiten discutir no solo la viabilidad técnica del prototipo, sino también su valor metodológico y formativo dentro de contextos académicos.

VI. Conclusiones

El trabajo presentado permitió validar preliminarmente la viabilidad técnica de un ciclo autónomo de observabilidad y diagnóstico operativo basado en virtualización ligera, automatización distribuida y modelos de lenguaje ejecutados localmente. Los resultados obtenidos evidencian que es posible implementar capacidades básicas de AIOps dentro de un entorno académico reproducible, utilizando infraestructura virtualizada tipo II y herramientas open source.

Como principales avances se logró: i) implementar una arquitectura distribuida funcional sobre máquinas virtuales Linux; ii) integrar n8n, Docker y Ollama para el análisis local de métricas operativas; iii) validar la comunicación remota y recolección periódica de datos; y iv) generar clasificaciones de riesgo y recomendaciones contextualizadas en lenguaje natural bajo condiciones normales y escenarios de estrés controlado.

Asimismo, el proyecto aporta una aproximación académica al modelo Human-in-the-Loop (HITL), donde la inteligencia artificial actúa como apoyo analítico para la toma de decisiones operativas y no como reemplazo del operador humano. Esto fortalece el valor formativo del trabajo en áreas

como observabilidad, virtualización, automatización e inteligencia artificial aplicada.

Como trabajo futuro se plantea ampliar la validación experimental del sistema, evaluar desempeño bajo cargas prolongadas y explorar la migración hacia hipervisores de tipo I, con el objetivo de consolidar una arquitectura AIOps reproducible y potencialmente escalable a escenarios de infraestructura más cercanos a producción.

References

[1] S. Long, J. Tan, B. Mao, F. Tang, Y. Li, M. Zhao, and N. Kato, "A survey on intelligent network operations and performance optimization based on large language models," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 27, Jan. 2025, doi: 10.1109/COMST.2025.3526606.

[2] R. Chen, Y. Pu, B. Shi, and W. Wu, "An automatic model management system and its implementation for AIOps on microservice platforms," J. Supercomput., vol. 79, pp. 11410–11426, Feb. 2023, doi: 10.1007/s11227-023-05123-4.

[3] H. Zhang, Y. Zhou, H. Xu, J. Shi, X. Lin, and Y. Gao, "Anomaly detection in virtual machine logs against irrelevant attribute interference," PLoS ONE, vol. 20, no. 1, p. e0315897, Jan. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0315897.

[4] M. A. Özdemir and H. Özcan, "Artificial intelligence for IT operations–based performance optimization in desktop virtualization," Electrica, vol. 25, no. 1, pp. 1–10, Sep. 2025, doi: 10.5152/electrica.2025.25032.

[5] K. Mohanaprasad, G. Rohith, A. Mondal, S. Singh, S. Tiwari, and J. Sharma, "HARMONY: A framework for multimodal LLM-powered AI agents in smart homes via the model context protocol," IEEE Access, vol. 14, Jan. 2026, doi: 10.1109/ACCESS.2026.3653992.

[6] L. Zhang, W. Cheng, S. Zhang, J. Xing, Z. Nie, X. Chen, D. Lan, Y. Liu, Y. Yang, and Z. Pang, "How large AI model empowers time-series forecasting for the operation and maintenance of industrial automation system," IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 21, 2025, doi: 10.1109/TII.2025.3575118.

[7] S. S. Gill et al., "Modern computing: Vision and challenges," Telematics Inform. Rep., vol. 13, p. 100116, 2024, doi: 10.1016/j.teler.2024.100116.

[8] A. R. Yeruva, "Monitoring data center site infrastructure using AIOps architecture," Eduvest – J. Univers. Stud., vol. 3, no. 1, pp. 265–277, Jan. 2023.

[9] G. Nguyen, S. Dlugolinsky, V. Tran, and Á. L. García, "Network security AIOps for online stream data monitoring," Neural Comput. Appl., vol. 36, pp. 14925–14949, May 2024, doi: 10.1007/s00521-024-09863-z.

[10] G. Y. Liu, Y. C. Tang, W. X. Guo, and J. Dang, "Redesigning power grid dispatching automation systems by integrating LLMs, KGs, and AI agents," CSEE J. Power Energy Syst., vol. 11, no. 3, 2025, doi: 10.17775/CSEEJPES.2025.03480.

[11] C. Zhang, W. Xu, J. Liu, L. Zhang, G. Liu, J. Guan, Q. Zhou, and S. Zhou, "SemanticLog: Towards effective and efficient large-scale semantic log parsing," IEEE Trans. Softw. Eng., Oct. 2025, doi: 10.1109/TSE.2025.3625121.

[12] N. Matsikira, T. Masamha, G. Mazambani, and N. Mashavakure, "The role of artificial intelligence in enhancing ICT systems administration," Inf. Technol., vol. 22, no. 1, pp. 96–104, Jun. 2025.

Empaques que te hablan, cuidan y protegen: desarrollo de un biomaterial activo-inteligente a base de almidón modificado para envasado de alimentos.

Adolfo Alberto Camargo Blanco
Fac. Inteligencia Artificial e Ingenierías
Universidad de Caldas
Manizales, Colombia
adolfocamargo0308@gmail.com

Andrés Chávez Salazar
Fac. Inteligencia Artificial e Ingenierías
Universidad de Caldas
Manizales, Colombia
andres.chavez@ucaldas.edu.co

Diego Emmanuel Boldrini
Departamento de Ingeniería Quimica
Universidad Nacional del Sur
Bahía Blanca, Argentina
boldriniemmanueldiego@gmail.com

Resumen: Los empaques plásticos convencionales generan residuos no biodegradables y los biomateriales disponibles se limitan a actuar como empaques pasivos, sin capacidad para prolongar la vida útil ni informar sobre el estado del alimento. El deterioro de los alimentos ocurre internamente antes de ser detectable sensorialmente, lo que provoca pérdidas económicas significativas y riesgos para la salud. El objetivo de este trabajo es desarrollar un biomaterial a base de almidón de maíz termoplástico (TPS) modificado mediante entrecruzamiento con ácido cítrico e incorporación de antocianinas extraídas de repollo morado (Brassica oleracea), que integre funcionalidad indicadora de pH, con factibilidad de procesamiento por extrusión reactiva y termocompresión. Comprendiendo la extracción hidroalcohólica acidificada de antocianinas; mezcla del almidón con glicerol (plastificante), ácido cítrico (entrecruzante) y extracto antociánico; extrusión reactiva en doble tornillo co-rotante para obtener pellets funcionales; termocompresión de los pellets para obtener láminas; caracterización fisicoquímica, mecánica, barrera (permeabilidad al vapor de agua), absorción de agua, actividad antioxidante y respuesta colorimétrica. Se espera que el entrecruzamiento con ácido cítrico mejore la estabilidad térmica y mecánica, reduzca la hidrofobicidad y limite la retrogradación, mientras que las antocianinas aporten un cambio de color visible al superar pH 7. Una búsqueda en Scopus muestra que, de 9.672 documentos sobre almidón de maíz, solo 17 integran biomaterial, biodegradabilidad y empaques activos-inteligentes procesados por extrusión. Este desarrollo contribuiría a reducir el desperdicio de alimentos, mejorar la seguridad alimentaria y ofrecer una alternativa biodegradable a los empaques convencionales, con potencial de transferencia a la industria transformadora de plásticos.

Palabras claves: *Almidón termoplástico; empaque activo; empaque inteligente; antocianinas; extrusión.*

I. Introducción

La acumulación de residuos plásticos convencionales derivados de envases de un solo uso representa una de las crisis ambientales más críticas del siglo XXI. A nivel mundial, se producen más de 400 millones de toneladas anuales de plásticos, de los cuales aproximadamente el 40 % se destina a empaques, y menos del 10 % se recicla efectivamente [1]. En el sector alimentario, los plásticos sintéticos como polietileno, polipropileno y poliestireno dominan el mercado debido a sus excelentes propiedades de barrera, bajo costo y procesabilidad [2]. Sin embargo, su naturaleza no biodegradable genera micro plásticos que contaminan ecosistemas terrestres y acuáticos, afectando la cadena trófica y la salud humana [2]. Esta situación ha impulsado la búsqueda de alternativas biodegradables a partir de fuentes renovables, entre las cuales el almidón destaca por su abundancia, bajo costo y capacidad de formar matrices termoplásticas [3]. La transición de empaques biodegradables obtenidos por casting hacia procesos industriales de alto rendimiento requiere el uso de tecnologías como la extrusión y el termoformado [4].

La extrusión de polímeros es un proceso termo mecánico continuo en el que los pellets (gránulos) poliméricos son alimentados a un cilindro calefaccionado, transportados por un tornillo sinfín, fundidos por la combinación de calor conducido y calor generado por fricción, homogeneizados y finalmente forzados a través de un dado (matriz) que les confiere una forma transversal específica [5]. Este proceso es fundamental en la industria de polímeros, ya que aproximadamente el 50-60% de todos los plásticos pasan por un proceso de extrusión en algún punto de su fabricación [6]. Diversos estudios han demostrado que el almidón termoplástico (TPS) puede procesarse por extrusión, pero su alta sensibilidad térmica y su reología pobre limitan la calidad del producto final [4]. Para superar estas limitaciones, se han propuesto modificaciones químicas del almidón, que mejoran la estabilidad térmica y el índice de fluidez [7]. El termoformado permite conformar láminas extruidas en envases rígidos mediante vacío o presión positiva, manteniendo la integridad de los compuestos bioactivos si las temperaturas de proceso son controladas [5].

El maíz una de las principal fuente de almidón para aplicaciones industriales. En 2024, la producción mundial de maíz alcanzó 1.218 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de 5.802 kg/ha [8]. América del Sur produjo 185,8 millones de toneladas en el mismo año, lo que representa el 15,3% del total mundial, con un rendimiento de 5.593 kg/ha. Argentina aportó 57,5 millones de toneladas, equivalentes al 4,72% de la producción mundial y al 30,9% de la producción sudamericana, con un rendimiento de 6.581 kg/ha que supera en 13% el promedio global [8]. Colombia, por su parte, produjo 1,49 millones de toneladas, apenas el 0,12% del total mundial y el 0,80% de la producción sudamericana, con un rendimiento de 4.343 kg/ha, un 25% inferior a la media mundial y un 22% inferior a la media sudamericana [8]. Estas asimetrías

evidencian una brecha de productividad, pero también una oportunidad para diversificar el uso del maíz colombiano hacia aplicaciones de mayor valor agregado, como los biomateriales. La disponibilidad de esta materia prima hace del almidón de maíz un polisacárido estratégico para el desarrollo de empaques biodegradables en la región [9].

Los bioplásticos comerciales a base de almidón se utilizan principalmente como sistemas pasivos, actuando como separación física entre el alimento y el medio externo. No obstante, investigaciones recientes han desarrollado películas de almidón que se comportan como envasado activos [10]. En los avances el sistemas no informan al consumidor sobre el estado real del alimento, el deterioro de alimentos inicia sin cambios organolépticos y sin por ser detectado por el consumidor. Este desacoplamiento temporal entre el deterioro real y su percepción sensorial provoca dos consecuencias graves: enfermedades transmitidas por alimentos (ETA) por consumo de productos aparentemente sanos, y desperdicio masivo [11].

Para superar estas limitaciones, han surgido los conceptos de empaque activo y empaque inteligente. Un empaque activo modifica las condiciones del ambiente interno para prolongar la vida útil, mediante la liberación controlada de agentes [12]. Un empaque inteligente, en cambio, monitorea el estado del alimento y lo comunica al usuario, generalmente a través de un cambio colorimétrico asociado a variaciones de pH, temperatura o presencia de metabolitos microbianos [13]. En la última década, se han explorado matrices de almidón, sin embargo, la mayoría de estos desarrollos se limitan a películas obtenidas por casting –técnica de laboratorio de baja productividad– y no han sido escalados a procesos industriales para la producción de platicos como extrusión y termoformado [5].

Una búsqueda sistemática en la base de datos Scopus revela una brecha significativa. El término “corn starch” aplicado a título, resumen y palabras clave arroja 9.672 documentos, lo que demuestra la madurez del campo de investigación. No obstante, al combinar este término con “packing*” obtenemos como resultado 48 documentos y si además le agregamos otro termino como “(biomaterial OR biodegradable)” los resultados se reducen drásticamente a solo 17 documentos. Esto indica que, a pesar del amplio conocimiento sobre almidón de maíz, su aplicación específica como biomaterial para empaques activos-inteligentes procesables por extrusión es un nicho aún poco explorado. No se ha evaluado estudios que integran funcionalidades (antioxidante, antimicrobiana ò indicadora) en una misma matriz termoplástica modificada para mejorar su procesabilidad [14].

Para comprender el estado del arte y la estructura conceptual de la investigación sobre biomateriales de almidón de maíz aplicados a empaques activos e inteligentes, se realizó un análisis bibliométrico y de co-ocurrencia de palabras clave. La búsqueda se efectuó en la base de datos Scopus empleando la siguiente ecuación de búsqueda: ("corn starch" AND packaging*) OR (biomaterial* AND biodegradable*). Esta estrategia combinó los términos centrales del almidón de maíz con los conceptos de empaque, biomaterial y biodegradabilidad, recuperando un total de 680 documentos. Se exportó en formato CSV para su procesamiento en el software VOSviewer (versión 1.6.20), herramienta especializada en la construcción y visualización de redes bibliométricas.

El análisis se centró en la co-ocurrencia de términos. Se estableció un umbral mínimo de aparición de 16 ocurrencias por término, asegurando que solo los conceptos con relevancia estadística en el campo fueran incluidos en la red. Posteriormente, se realizó una limpieza manual del tesauro, eliminando palabras, términos no relacionados con el objeto de estudio y duplicados semánticos. Este proceso de filtrado redujo el conjunto a aquellos términos que realmente representan los ejes temáticos centrales de la literatura especializada.

La Figura 1 muestra la red de co-ocurrencia resultante, donde cada nodo representa un término clave y el tamaño del nodo es proporcional a su frecuencia. Los colores indican los diferentes clústeres temáticos identificados por el algoritmo de agrupamiento de VOSviewer. Se observan cinco clústeres principales. El clúster rojo agrupa términos asociados a la biodegradación y degradación, incluyendo procesos como extrusión y gelificación, así como técnicas de caracterización morfológica (microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X). El clúster azul reúne conceptos relacionados con polímeros y aditivos alimentarios, destacando la química de los materiales y los agentes antimicrobianos. El clúster verde se centra en conservantes alimentarios y actividad antibacteriana frente a patógenos como Staphylococcus aureus y Escherichia coli. Los clústeres amarillo y anaranjado abordan temas específicos de empaques comestibles y propiedades mecánicas y de permeabilidad de películas compuestas.

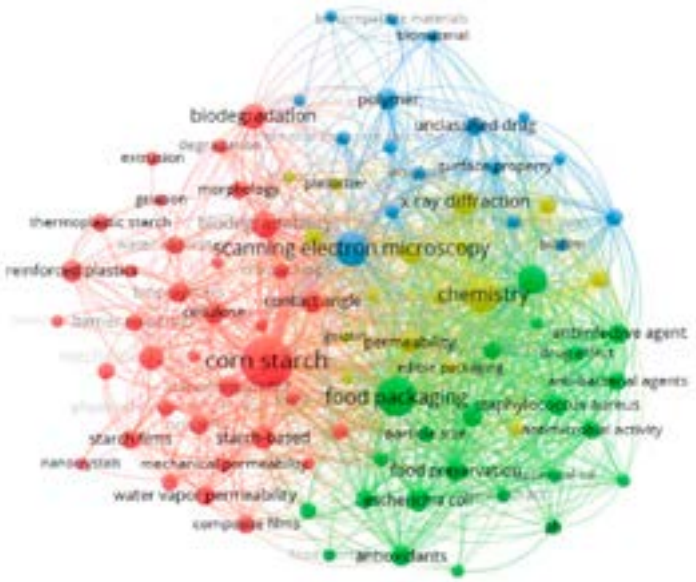


Figura 1. Red de co-ocurrencia de términos clave en artículos sobre almidón de maíz para empaques biodegradables (n = 680 documentos, umbral mínimo de ocurrencia = 16). Los colores representan clústeres temáticos: rojo (degradación y caracterización), azul (polímeros y agentes antimicrobianos), verde (conservación alimentaria), amarillo (empaques comestibles) y naranja (aditivos alimentarios). Elaboración propia con VOSviewer.

Frente a este escenario, se plantea la siguiente hipótesis: la modificación química del almidón de maíz termoplástico (TPS) mediante entrecruzamiento con ácido cítrico puede mejorar

varias propiedades críticas para aplicaciones en envases, especialmente aquellas relacionadas con estabilidad frente al agua, integridad mecánica y estabilidad térmica, con incorporación de antocianinas a la matriz de almidón termoplástico desarrollando un biomaterial antioxidante e indicador de pH, con factibilidad de ser procesado por extrusión o termoformado para la obtención de empaques activos-inteligentes.

II. Materiales y Métodos

A. Materiales

Se empleará almidón de maíz comercial. Como plastificante se utilizará glicerol anhidro. El entrecruzamiento del almidón termoplástico se llevará a cabo utilizando ácido cítrico monohidratado. Las antocianinas se obtendrán a partir de extracto de repollo morado (Brassica oleracea) mediante extracción hidroalcohólica acidificada. Para la extracción se emplearán etanol absoluto, agua destilada y ácido clorhídrico agente acidificante. Para los ensayos analíticos se utilizarán: radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo), reactivo ABTS, Trolox, buffer fosfato, soluciones buffer pH 2–12, KBr espectroscópico para FTIR. Todos los reactivos serán de grado analítico y utilizados sin purificación adicional.

B. Métodos

Obtención del extracto rico en antocianinas: Las antocianinas serán extraídas a partir de repollo morado fresco previamente triturado. La extracción se realizará mediante maceración sólido-líquido utilizando una mezcla etanol/agua (70:30 v/v) acidificada con HCl 0.01 M.

La relación sólido:solvente será de 1:20 (g:mL), realizando la extracción bajo agitación magnética durante 2 h a temperatura ambiente y en oscuridad para minimizar la degradación fotooxidativa. Posteriormente, el extracto será filtrado y concentrado mediante evaporación rotatoria utilizando un evaporador rotatorio Buchi Rotavapor R-300 a 40 °C. Finalmente, el extracto será almacenado a 4 °C protegido de la luz hasta su utilización. El contenido total de antocianinas será determinado mediante el método diferencial de pH, expresando los resultados como mg equivalentes de cianidina-3-glucósido por gramo de extracto [15].

Preparación de mezclas almidón termo plastificado (TPS): Las formulaciones serán preparadas utilizando almidón de maíz, glicerol, ácido cítrico y extracto antociánico. Inicialmente, el glicerol será mezclado con el ácido cítrico y el extracto de antocianinas hasta obtener una solución homogénea. Posteriormente, esta mezcla será incorporada al almidón mediante agitación mecánica. Las formulaciones serán acondicionadas durante 24 h en recipientes herméticos a temperatura ambiente para favorecer la difusión homogénea del plastificante y reactivos. Las concentraciones de ácido cítrico y antocianinas serán variables según el diseño experimental y teniendo en cuenta estudios previos [15,16].

Extrusión reactiva y obtención de pellets: La producción del TPS entrecruzado se realizará mediante extrusión reactiva utilizando una extrusora doble tornillo co-rotante. Las formulaciones serán alimentadas directamente a la tolva y procesadas bajo diferentes condiciones de temperatura y velocidad de tornillo teniendo en cuenta publicaciones previas [15,16]. El material extruido será enfriado a temperatura ambiente y pelletizado utilizando un pelletizador de cuchilla rotatoria.

Obtención de films/láminas: Los pellets de TPS serán transformados en films mediante termocompresión utilizando una prensa hidráulica calefaccionada. Las muestras serán procesadas a temperaturas entre 120-140 °C durante 5-10 min bajo presión controlada. El espesor final de los films será medido utilizando un micrómetro digital con precisión de ±1 µm.

Caracterización fisicoquímica [15,16,17]

Espectroscopía FTIR: La confirmación del entrecruzamiento químico será realizada mediante espectroscopía infrarroja FTIR en el rango 4000–400 cm^{-1}. La formación de enlaces éster será evaluada mediante la aparición de bandas alrededor de 1710–1740 cm^{-1}.

DSC: Las transiciones térmicas y fenómenos de retrogradación serán estudiados mediante calorimetría diferencial de barrido. Las muestras serán calentadas entre 25 y 250 °C bajo atmósfera de nitrógeno.

TGA: La estabilidad térmica será evaluada mediante análisis termogravimétrico. Los ensayos serán realizados entre 25 y 600 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min bajo flujo de nitrógeno.

DRX: La estructura cristalina y el grado de retrogradación serán determinados utilizando un difractómetro. Los patrones serán registrados entre 5° y 40° (2θ).

SEM: La morfología superficial y de fractura será evaluada mediante microscopía electrónica de barrido. Las muestras serán recubiertas con oro previamente al análisis.

Propiedades mecánicas: Las propiedades mecánicas serán determinadas según ASTM D882 utilizando una máquina universal de ensayos. Se determinarán: resistencia a la tracción, elongación a la rotura, módulo elástico.

Propiedades de barrera: La permeabilidad al vapor de agua será determinada siguiendo ASTM E96. La permeabilidad al oxígeno podrá determinarse utilizando un permeámetro de gases bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa.

Absorción de agua y solubilidad: La absorción de agua, swelling y solubilidad en agua serán evaluados mediante inmersión de las muestras en agua destilada durante tiempos determinados.

Actividad antioxidante: La capacidad antioxidante será evaluada mediante los ensayos DPPH y ABTS utilizando un espectrofotómetro UV-Vis.

Evaluación colorimétrica y respuesta al pH: La respuesta colorimétrica de los films será evaluada exponiendo las muestras a soluciones buffer de pH 2–12. Los parámetros colorimétricos L*, a* y b* serán determinados utilizando un colorímetro comercial. El cambio total de color (ΔE) será calculado para evaluar sensibilidad frente a variaciones de pH.

Identify applicable funding agency here. If none, delete this text box.

Estabilidad de antocianinas: La retención de antocianinas luego del procesamiento térmico será determinada mediante espectroscopía UV-Vis y cuantificación por método diferencial de pH.

III. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos serán analizados mediante diseño experimental y metodología de superficie de respuesta, con el objetivo de optimizar simultáneamente la formulación y las condiciones de procesamiento del TPS funcionalizado. Las variables independientes incluirán: concentración de ácido cítrico, contenido de antocianinas, contenido de glicerol, temperatura de extrusión, velocidad de tornillo. Las variables respuesta seleccionadas para la optimización serán: resistencia mecánica, elongación a la rotura, permeabilidad al vapor de agua, absorción de agua, estabilidad térmica, retención de antocianinas, actividad antioxidante, sensibilidad colorimétrica (ΔE), estabilidad dimensional durante almacenamiento. Los datos experimentales serán analizados mediante ANOVA y pruebas de comparación múltiple de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$. La optimización global buscará maximizar: estabilidad mecánica, estabilidad térmica, actividad antioxidante, sensibilidad colorimétrica, retención de antocianinas, y minimizar: absorción de agua, permeabilidad al vapor, pérdida de propiedades durante almacenamiento. El análisis estadístico será realizado utilizando el software Statgraphics.

IV. Conclusiones

Se espera desarrollar pellets de almidón de maíz termoplástico funcionalizados con antocianinas y parcialmente entrecruzados con ácido cítrico mediante extrusión reactiva, obteniendo un biomaterial procesable industrialmente y con potencial aplicación en envases activos e inteligentes.

El entrecruzamiento con ácido cítrico permitiría mejorar la estabilidad térmica, mecánica y dimensional del TPS, además de reducir su sensibilidad al agua y limitar fenómenos de retrogradación durante el almacenamiento.

La incorporación de antocianinas aportaría capacidad antioxidante y respuesta colorimétrica dependiente del pH, posibilitando el desarrollo de sistemas inteligentes capaces de monitorear cambios asociados al deterioro alimentario.

Asimismo, la optimización simultánea de formulación y condiciones de extrusión permitiría establecer relaciones entre estructura, procesamiento y propiedades funcionales, contribuyendo al diseño de materiales biodegradables con mayor viabilidad tecnológica para aplicaciones de envasado sustentable.

References

[1] T. Degnan and S. L. Shinde, “Waste-plastic processing providesglobal challenges and opportunities,” MRS Bull., vol. 44, no. 06, pp. 436–437, Jun. 2019. http://dx.doi.org/10.1557/mrs.2019.133.

[2] J. Di, B. K. Reck, A. Miatto, and T. E. Graedel, “United States plastics: Large flows, short lifetimes, and negligible recycling,” Resour. Conserv. Recycl., vol. 167, no. 105440, p. 105440, Apr. 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105440.

[3] A. Shafqat, A. Tahir, A. Mahmood, A. B. Tabinda, A. Yasar, and A. Pugazhendhi, “A review on environmental significance carbon foot prints of starch based bio-plastic: A substitute of conventional plastics,” Biocatal. Agric. Biotechnol., vol. 27, no. 101540, p. 101540, Aug. 2020. http://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101540.

[4] L. MoÅ› cicki, M. Mitrus, A. WÃ3jtowicz, T. Oniszczuk, A. Rejak, and L. Janssen, “Application of extrusion-cooking for processing of thermoplastic starch (TPS),” Food Res. Int., vol. 47, no. 2, pp. 291–299, Jul. 2012. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2011.07.017.

[5] C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, 5th ed. Cincinnati, OH: Hanser Gardner Publications, 2014. http://dx.doi.org/10.3139/9781569905395.

[6] Rosato, D. V.“” in Plastics Engineered Product Design, Elsevier, 2003, pp. xvii–xviii. http://dx.doi.org/10.1016/b978-185617416-9/50001-6.

[7] F. Xie et al., “Thermoplastic starch,” J. Renew. Mater., vol. 2, no. 2, pp. 95–106, May 2014. http://dx.doi.org/10.7569/jrm.2014.634104.

[8] “FAOSTAT.” Accessed: May 08, 2026. [Online]. Available: https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL

[9] Karen Trejo Cuevas, Guadalupe Rodríguez Castillejos, Jared Reyes Gallardo, Cristian Lizarazo Ortega, Cristina Hernández Jiménez, “Almidón, una plataforma versátil en la industria de alimentos,” Rev. boliv. quím., vol. 41, no. 1, Apr. 2024, doi: 10.34098/2078-3949.41.1.6. https://doi.org/10.34098/2078-3949.41.1.6.

[10] C. L. Virgüez, “RECUBRIMIENTOS COMESTIBLES A BASE DE ALMIDÓN,” Repository UNAD. Accessed: May 08, 2026. [Online]. Available: https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/21299/52975967_.pdf

[11] P. Kathait, P. K. Omre, P. Kumar, and K. K. Gaikwad, “Development of a PVA-starch antioxidant film incorporating beetroot stem waste extract for active food packaging,” J. Polym. Environ., vol. 31, no. 10, pp. 4160–4169, Oct. 2023. https://doi.org/10.1007/s10924-023-02840-y.

[12] U. Amin et al., “Biodegradable active, intelligent, and smart packaging materials for food applications,” Food Packag. Shelf Life, vol. 33, no. 100903, p. 100903, Sep. 2022. http://dx.doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100903.

[13] Y. Qin, Y. Liu, H. Yong, J. Liu, X. Zhang, and J. Liu, “Preparation and characterization of active and intelligent packaging films based on cassava starch and anthocyanins from Lycium ruthenicum Murr,” Int. J. Biol. Macromol., vol. 134, pp. 80–90, Aug. 2019. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.029.

[14] L. Zhao, Y. Liu, L. Zhao, and Y. Wang, “Anthocyanin-based pH-sensitive smart packaging films for monitoring food freshness,” J. Agric. Food Res., vol. 9, no. 100340, p. 100340, Sep. 2022. http://dx.doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100340.

[15] T. M. A. R. D. Vedove, B. C. Maniglia, and C. C. Tadini, “Production of sustainable smart packaging based on cassava starch and anthocyanin by an extrusion process,” J. Food Eng., vol. 289, no. 110274, p. Not Available, Jan. 2021. http://dx.doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100340.

[16] Y. Jiugao, W. Ning, and M. Xiaofei, “The effects of citric acid on the properties of thermoplastic starch plasticized by glycerol,” Starke, vol. 57, no. 10, pp. 494–504, Oct. 2005. http://dx.doi.org/10.1002/star.200500423.

[17] L. Castillo et al., “Thermoplastic starch films reinforced with talc nanoparticles,” Carbohydr. Polym., vol. 95, no. 2, pp. 664–674, Jun. 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.03.026.

Desarrollo de una bebida fermentada tipo kumis saborizada con gulupa (*Passiflora edulis*) como estrategia de innovación agroalimentaria y fortalecimiento productivo en el eje cafetero

Tatiana Acevedo Aranzazu
Fac. Inteligencia Artificial e Ingenierías
Universidad de Caldas
Manizales, Colombia
tatiana.802010253@ucaldas.edu.co

Ximena Sánchez Ospina
Fac. Inteligencia Artificial e Ingenierías
Universidad de Caldas
Manizales, Colombia
ximena.sanchez30045caldas.edu.co

Andrés Chávez Salazar
Fac. Inteligencia Artificial e Ingenierías
Universidad de Caldas
Manizales, Colombia
andres.chavez@ucaldas.edu.co

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo desarrollar una bebida fermentada tipo kumis saborizada con gulupa (Passiflora edulis), como una estrategia de innovación agroalimentaria orientada al aprovechamiento sostenible de frutas nativas y a la generación de valor agregado en el sector lácteo del Eje Cafetero. Esta investigación surge ante la necesidad de diversificar la oferta de productos lácteos fermentados, promover el consumo de alimentos funcionales y fortalecer la articulación entre la ingeniería de alimentos, la producción agrícola local y las tendencias actuales de alimentación saludable.

La gulupa es una fruta tropical autóctona con alto contenido de compuestos bioactivos, tales como polifenoles, flavonoides, vitamina C y fibra dietaría, los cuales le confieren propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y digestivas. Su incorporación en matrices fermentadas como el kumis permite potenciar el valor nutricional y el perfil sensorial del producto final, generando una alternativa funcional atractiva para los consumidores. No obstante, pese a su alto potencial, la gulupa continúa siendo subutilizada en el desarrollo de productos agroindustriales, lo que limita su aprovechamiento económico y su posicionamiento en mercados con mayor valor agregado.

Desde el enfoque ingenieril, el proyecto implicó el diseño, la estandarización y el control del proceso fermentativo, considerando variables críticas como la temperatura, el tiempo de fermentación, la concentración de cultivos lácticos y la proporción óptima de pulpa de gulupa. Se desarrollaron diversos prototipos experimentales con el fin de evaluar la influencia de la fruta sobre las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales del kumis. Se realizaron análisis de pH, acidez titulable, °Brix, viscosidad, contenido de grasa y proteína, así como recuento de microorganismos viables, lo que permitió validar la estabilidad del proceso, la calidad del producto y su potencial probiótico.

Los resultados evidenciaron una fermentación eficiente, caracterizada por una disminución progresiva del pH, un incremento de la acidez y un alto recuento de bacterias lácticas viables, superando los mínimos establecidos para considerar un alimento como probiótico. Asimismo, la evaluación sensorial mostró una alta aceptación por parte de los consumidores, destacando atributos como sabor, aroma y apariencia, lo que confirma la viabilidad tecnológica y comercial del producto desarrollado.

Desde la perspectiva social y regional, este proyecto contribuye a la promoción de hábitos de alimentación más saludables, al fortalecimiento de la identidad agroalimentaria del Eje Cafetero y a la dinamización de la economía local mediante la integración de pequeños productores rurales en cadenas de valor agroindustriales. En el ámbito ambiental, el aprovechamiento de materias primas locales favorece prácticas productivas más sostenibles, alineadas con los principios de economía circular y producción responsable. En conjunto, esta investigación representa una propuesta integral que articula la ingeniería de alimentos, la innovación tecnológica, el desarrollo social y la sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: *Gulupa (Passiflora edulis); Bebida fermentada; Innovación agroalimentaria*

I. Introducción

Uno de los principales desafíos actuales de la industria alimentaria es responder a la creciente demanda de los consumidores por alimentos que no solo nutran, sino que también promuevan activamente la salud. En este contexto, los productos lácteos fermentados, como el kumis, han ganado protagonismo por su aporte en el equilibrio de la microbiota intestinal y sus efectos positivos sobre la salud digestiva e inmunológica [1], [8]. Según un estudio desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia, el kumis posee un gran potencial como vehículo para el desarrollo de alimentos funcionales mediante su enriquecimiento con compuestos bioactivos de origen natural [1]. Este enfoque permite la creación de productos más nutritivos y con valor agregado, incentivando el consumo de derivados lácteos en distintos grupos poblacionales [2].

La incorporación de ingredientes como la gulupa (*Passiflora edulis f. edulis*) en productos lácteos representa una alternativa innovadora con alto potencial. Esta fruta, originaria de regiones andinas como el Eje Cafetero, es rica en compuestos bioactivos como polifenoles, flavonoides, vitamina C y fibra, lo que le confiere propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y digestivas [3], [5], [6]. Su sabor exótico y aroma intenso la convierten además en una opción sensorialmente atractiva para productos alimenticios. Sin embargo, su uso industrial sigue siendo limitado, en parte por el desconocimiento de sus

beneficios y por la escasa exploración en matrices fermentadas como el kumis [3], [12].

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de frutas en bebidas fermentadas puede favorecer el crecimiento y la estabilidad de bacterias ácido lácticas, además de mejorar las propiedades funcionales y microbiológicas del producto final [4]. Asimismo, el desarrollo de bebidas fermentadas enriquecidas naturalmente representa una estrategia innovadora para aumentar el valor nutricional y funcional de los derivados lácteos [7].

Esta investigación se enfoca en el desarrollo de un kumis saborizado con gulupa como producto de origen del Eje Cafetero, con el objetivo de diversificar los productos lácteos fermentados, promover el consumo de probióticos y aportar al aprovechamiento sostenible de frutas nativas con alto valor funcional [8].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Materias primas

Para la elaboración del kumis saborizado se utilizó leche entera pasteurizada, cultivo láctico comercial y pulpa de gulupa (Passiflora edulis f. edulis) proveniente del Eje Cafetero colombiano. Las materias primas fueron seleccionadas bajo criterios de calidad e inocuidad.

Elaboración del kumis saborizado con gulupa

La leche fue acondicionada e inoculada con el cultivo iniciador, sometiéndose posteriormente a fermentación bajo condiciones controladas de tiempo y temperatura. Una vez alcanzadas las características fermentativas deseadas, se adicionó la pulpa de gulupa y se homogenizó la mezcla hasta obtener el producto final.

Análisis fisicoquímicos

Durante el proceso fermentativo se realizaron mediciones de pH, acidez titulable y sólidos solubles (°Brix). Adicionalmente, al producto final se le determinó viscosidad, contenido de grasa mediante el método Gerber y contenido de proteína por el método Kjeldahl, de acuerdo con la NTC 8968:2021. [11].

Análisis microbiológico

El análisis microbiológico se realizó mediante recuento de bacterias ácido lácticas por siembra en placa, expresando los resultados en unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/mL), con el fin de verificar la viabilidad microbiana del producto fermentado.

Evaluación sensorial

La aceptación sensorial del producto se evaluó mediante una prueba hedónica aplicada a 20 consumidores no entrenados. Se valoraron los atributos de sabor, olor, apariencia, viscosidad, cremosidad y acidez utilizando una escala hedónica de cinco puntos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento fermentativo

Durante el proceso de fermentación se evidenció una disminución progresiva del pH desde 6,88 hasta 4,43, comportamiento asociado a la actividad metabólica de las bacterias ácido lácticas y a la producción de ácido láctico. Paralelamente, la acidez titulable aumentó de 16 °D a 90 °D, indicando un adecuado desarrollo fermentativo y una correcta acidificación del producto.

Asimismo, los sólidos solubles disminuyeron de 18 a 14 °Brix debido al consumo de azúcares fermentables por parte de los microorganismos durante el proceso. Estos cambios son característicos de bebidas lácteas fermentadas y evidencian una fermentación eficiente y estable.

TABLA 1. DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

Parámetro	*Valor inicial*	*Valor final*
pH	6.88	4.43
Acidez titulable (°D)	16	90
Sólidos solubles (°Brix)	18	14



Fig.1. fermentación del pH en función del tiempo



Fig.2. fermentación de la acidez en función del tiempo

De acuerdo con la Resolución 2310 de 1986 del Ministerio de Salud de Colombia, el kumis se define como un producto obtenido mediante fermentación láctica con cultivos específicos viables y abundantes [9], características que se relacionan directamente con la disminución del pH y el incremento de la acidez observados durante el proceso.

Además, la acidificación alcanzada favorece la inhibición de microorganismos alterantes y patógenos, contribuyendo a la inocuidad del producto final.
El incremento de la acidez titulable hasta 90 °D evidencia una fermentación activa y adecuada. Este comportamiento se encuentra asociado a la acumulación de ácido láctico producido por las bacterias fermentativas y corresponde a valores esperados en productos lácteos fermentados comerciales. La relación inversa observada entre pH y acidez confirma el correcto desempeño metabólico del cultivo iniciador y la estabilidad del proceso tecnológico empleado.

Propiedades fisicoquímicas del producto final

El kumis saborizado con gulupa presentó características fisicoquímicas acordes con las reportadas para bebidas lácteas fermentadas, evidenciando una adecuada estabilidad estructural y conservación de la calidad nutricional del producto.
La viscosidad obtenida fue de 11.060 cP, valor que refleja una adecuada formación del gel lácteo como consecuencia de la acidificación generada durante la fermentación. Este comportamiento se relaciona con la desestabilización de las micelas de caseína y la formación de una red proteica responsable de la textura característica del kumis. Además, la incorporación de gulupa no afectó negativamente las propiedades reológicas del producto, favoreciendo una consistencia homogénea y estable.
El contenido de grasa fue de 3,2%, encontrándose dentro de los rangos esperados para bebidas fermentadas elaboradas a partir de leche entera, según lo establecido en la Resolución 2310 de 1986 para productos lácteos fermentados. Este parámetro influye directamente sobre atributos sensoriales como cremosidad, cuerpo y palatabilidad, contribuyendo a la aceptación del producto final.
Por otra parte, el contenido de proteína registró valores de 3,53% y 3,51% en los lotes evaluados, evidenciando que la adición de gulupa no ocasionó una disminución significativa del aporte proteico de la matriz láctea.

TABLA 2. PROPIEDAD FISICOQUÍMICAS DEL KUMIS

Parámetro	***Resultado***
Viscosidad (Cp)	11.060
Grasa (%)	3.2
Proteína lote 1 (%)	3.53
Proteína lote 2 (%)	3.51

Análisis microbiológico

El recuento microbiológico del kumis saborizado con gulupa alcanzó un valor de 4,34 × 10^8 UFC/mL, evidenciando una elevada viabilidad de bacterias ácido lácticas en el producto final. Estos resultados reflejan un adecuado desarrollo del proceso fermentativo y una correcta adaptación de los microorganismos a la matriz láctea adicionada con gulupa.

La alta concentración microbiana obtenida se encuentra asociada a la actividad metabólica de las bacterias ácido lácticas responsables de la fermentación, las cuales contribuyen a la producción de ácido láctico, la disminución del pH y la estabilidad microbiológica del producto. Además, el ambiente ácido generado durante la fermentación favorece la inhibición de microorganismos alterantes y potencialmente patógenos, mejorando las condiciones de inocuidad del kumis [4].

De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 805 para leches fermentadas, estos productos deben contener microorganismos viables y abundantes hasta el final de su vida útil [10], condición que fue cumplida en el presente estudio. Asimismo, diversos autores señalan que concentraciones superiores a 10^6 UFC/mL son necesarias para considerar un alimento fermentado con potencial probiótico [4], [8], por lo que el valor obtenido en esta investigación supera ampliamente dicho criterio.

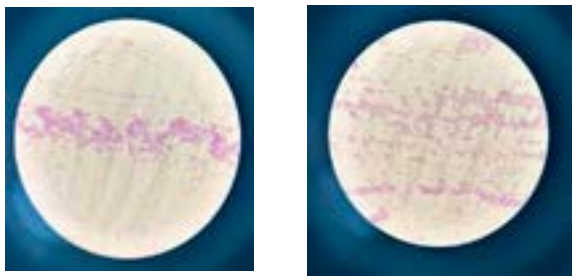


Fig.3. resultado microscópico del recuento en placa

La evaluación sensorial realizada a 20 consumidores evidenció una adecuada aceptación del kumis saborizado con gulupa, destacándose principalmente los atributos de sabor, olor y apariencia. Los resultados obtenidos indican que la incorporación de gulupa favoreció positivamente las características organolépticas del producto, generando una percepción agradable entre los evaluadores.
El sabor fue el atributo mejor valorado, lo cual sugiere una adecuada armonía entre la acidez característica del kumis y las notas frutales y aromáticas aportadas por la gulupa.
Respecto al olor y la apariencia, ambos atributos presentaron puntuaciones favorables, reflejando una percepción positiva relacionada con el aroma característico de la fruta y la homogeneidad visual del producto. La apariencia constituye un factor determinante en la intención de consumo, especialmente en bebidas fermentadas, debido a que influye directamente en la percepción inicial de calidad por parte del consumidor.
La acidez fue evaluada de manera positiva y coherente con las características esperadas para un producto lácteo fermentado. Sin embargo, una ligera disminución en su aceptación frente al atributo sabor podría estar asociada a la percepción natural de acidez propia de la gulupa, aunque sin afectar negativamente la aceptabilidad global del producto.

TABLA 3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN SENSORIAL

	Resultados prueba de perfil sensorial del Kumis gulupa					
N° sujeto	Sabor	Cremosidad	Apariencia	Viscosidad	Acidez	Olor
1	5	4	4	4	5	5
2	5	4	4	3	4	5
3	4	5	5	4	3	5
4	5	4	4	4	3	4
5	5	4	4	4	4	4
6	5	4	5	3	4	5
7	5	4	4	3	3	5
8	4	4	4	3	4	4
9	5	4	5	4	2	4
10	4	5	5	3	3	4
11	5	4	5	5	5	5
12	5	4	4	3	5	4
13	5	4	4	2	5	5
14	4	3	5	5	4	4
15	5	3	4	4	4	5
16	5	4	4	5	4	5
17	4	3	5	4	4	4
18	5	4	5	5	5	5
19	5	4	4	4	5	4
20	5	4	5	5	5	5



Fig.3. perfil sensorial del kumis saborizado

IV. CONCLUSIONES

- Desde el enfoque social, el proyecto busca promover hábitos de alimentación más saludables a través del desarrollo de un kumis funcional enriquecido con gulupa, fomentando el consumo de probióticos y frutas nativas con beneficios para la salud digestiva e inmunológica. Esto contribuye al bienestar general de la población, especialmente en comunidades donde los productos lácteos son parte fundamental de la dieta.
- En el ámbito económico, la propuesta puede incentivar la diversificación de productos en la industria láctea y generar nuevas oportunidades para pequeños productores de gulupa del Eje Cafetero, fortaleciendo así los encadenamientos productivos y el desarrollo local.
- Desde el punto de vista ambiental, el uso de frutas locales favorece el aprovechamiento sostenible de los recursos agrícolas del país, reduciendo la dependencia de ingredientes importados y promoviendo una agroindustria más consciente con el entorno y la biodiversidad regional.
- Adicionalmente, el proyecto puede tener un impacto académico y científico, al aportar conocimiento sobre la incorporación de frutas tropicales en matrices fermentadas, abriendo nuevas líneas de investigación en alimentos funcionales.
- Este proyecto contribuye directamente al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 3: Salud y bienestar, al fomentar una alimentación más saludable; y al ODS 12: Producción y consumo responsables, al promover el aprovechamiento de materias primas locales de forma sostenible e innovadora.

REFERENCES.

[1] J. Osorio, “Influencia de diferentes cepas probióticas y el tiempo de fermentación en el contenido de ácido linoléico conjugado y el perfil de ácidos grasos durante el almacenamiento del kumis elaborado con dos sustratos diferentes,” Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2010. [Online]. Available: http://www.bdigital.unal.edu.co/3680/1/75083238.2011.pdf

[2] A. R. Castillo, “Efecto de la inulina y harina de quinua en las características fisicoquímicas, sensoriales y de crecimiento de las bacterias ácido lácticas en kumis,” Trabajo de grado, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia, 2016. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/31ce2f19-30f2-41f3-9766-41c4c747cd45/content

[3] J. Zhang, S. Tao, G. Hou, F. Zhao, Q. Meng, and S. Tan, “Phytochemistry, nutritional composition, health benefits and future prospects of Passiflora: A review,” Food Chemistry, vol. 428, p. 136825, 2023, doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136825.

[4] T. F. Borgonovi, J. I. I. Fugaban, J. E. V. Bucheli, S. N. Casarotti, W. H. Holzapfel, S. D. Todorov, and A. L. B. Penna, “Dual role of probiotic lactic acid bacteria cultures for fermentation and pathogenic bacteria control in fruit-enriched fermented milks,” Probiotics and Antimicrobial Proteins, vol. 16, no. 5, pp. 1801–1816, 2024, doi: 10.1007/s12602-023-101.

[5] A. M. A. Fonseca, M. V. Geraldi, M. R. M. Junior, A. J. D. Silvestre, and S. M. Rocha, “Purple passion fruit (Passiflora edulis f. edulis): A comprehensive review on nutritional value, phytochemical profile and associated health effects,” Food Research International, vol. 160, p. 111665, 2022, doi: 10.1016/j.foodres.2022.111665.

[6] R. Urrialde, A. Gómez Cifuentes, B. Pintos, M. A. Gómez-Garay, and B. Cifuentes, “Bioactive compounds from plants. Development of new or novel food,” Nutrición Hospitalaria, vol. 39, no. Spec3, pp. 8–11, 2022, doi: 10.20960/nh.04302.

[7] A. O. Amaya, “Elaboración de una bebida láctea fermentada enriquecida naturalmente con ácidos grasos esenciales,” Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2016. [Online]. Available: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/56956/angelamarlenamayaortiz.2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[8] M. Larrea, et al., “Alimentos funcionales: probióticos, prebióticos y simbióticos,” 2022. [Online]. Available: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/191694/LarreaQuilesHernando%20-%2

[9] [10] Ministerio de Salud de Colombia, “Resolución 2310 de 1986: por la cual se reglamenta parcialmente el Título V de la Ley 09 de 1979 en lo referente a procesamiento, composición, requisitos y comercialización de los derivados lácteos,” Bogotá, Colombia, 1986.

[10] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “NTC 805: Leches fermentadas,” Bogotá, Colombia.

[11] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “NTC 8968:2021,” Bogotá, Colombia, 2021.

[12] “Fruta gulupa (Passiflora edulis Sims), su potencial de exportación, matriz y firma de maduración: una revisión,” Ciencia y Agricultura, [Online]. Available: https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencia_agricultura/article/view/13822/11607

VeriBrief:A Multi-agent Retrieval-augmented Generation System for Decision Support

Imane Bahji
Dept. of Electrical and Comp. Eng.
The University of New Mexico
Albuquerque, NM, USA

Manel Martínez-Ramón
Dept. of Electrical and Comp. Eng.
The University of New Mexico
Albuquerque, NM, USA

Ramiro Jordan
Dept. of Electrical and Comp. Eng.
The University of New Mexico
Albuquerque, NM, USA

***Abstract*—VeriBrief is a fully local, multi-agent retrieval-augmented generation (RAG) system for evidence-grounded economic policy decision support. The system orchestrates a five-stage LangGraph pipeline—retrieval, research, analysis, synthesis, and critique—producing cited, structured responses while detecting out-of-scope queries via a cosine-similarity evidence gate. Evaluation on eight questions drawn from official U.S. macroeconomic releases compared VeriBrief against a single-pass RAG baseline. After correction of a context-propagation architectural defect discovered during evaluation, the multi-agent system achieved 66.7% refusal precision on unanswerable queries versus 0% for the baseline, and reduced overall unsupported claim rate from 65.3% to 49.5%. The primary novelty lies in combining three ideas not previously integrated in a single evaluated system: treating groundedness as an architectural contract, implementing refusal as a first-class measurable outcome, and formalizing the context-propagation principle as a design requirement for multi-stage LLM pipelines. Key limitations include evidence-gate failure on policy-counterfactual queries and an unsupported claim rate regression on structured policy-template output.**

***Keywords*—retrieval-augmented generation, multi-agent systems, LangGraph, hallucination reduction, economic decision support, local LLM, evidence contract, refusal, grounded generation.**

I. Introduction

Large language models (LLMs) have rapidly transitioned from research prototypes into tools embedded in real institutional workflows. Across policy, law, finance, and academic environments, they are increasingly used for document synthesis, summarization, drafting, briefing, and analysis writing [1], [2]. Their appeal is clear: they reduce writing time, lower cognitive load, support faster iteration on complex materials, and reduce operational costs for repetitive work.

These same properties that make LLMs attractive also make them risky in high-stakes settings. LLMs can generate fluent, coherent, and professionally structured text even when that text is not supported by evidence. They can produce outputs that appear valid by mimicking formal tone, persuasive framing, and sometimes even fabricated citation-like structures [3]. In settings where generated text may influence policy choices or strategic decisions, these failures do not remain isolated technical errors—they become institutional risks.

A. The Hallucination Problem in Institutional Contexts

The risk is not hypothetical. In *Mata v. Avianca* (S.D.N.Y. 2023), attorneys submitted ChatGPT-generated briefs citing multiple precedents that did not exist. The citations were plausibly formatted, topically coherent, and presented without uncertainty markers. When opposing counsel could not locate the cases, the court ordered production of the underlying opinions; the submitted copies were found to be fabricated. The court held the conduct sanctionable under Rule 11 and its inherent authority, imposing monetary penalties. This is hallucination operating as a material institutional failure, propagating through a professional workflow and into the legal record.

During this research, a directly comparable failure was observed using ChatGPT 5.2 Instant under a paid subscription in 2026. When prompted to provide peer-reviewed academic citations supporting claims about institutional AI adoption, the model returned a structured, formatted list of papers with named authors, publication years, abstracts, and source attribution badges. Upon verification, four of the five returned citations were entirely fabricated. When prompted to self-verify, the model identified its own fabrications, acknowledging that it had "made up" three citations and generated others as "invented placeholder[s] based on plausible topic." The model had presented all five with equal confidence and no uncertainty markers. This behavior illustrates that citation hallucination is not limited to older or less capable model versions—it persists in current state-of-the-art commercial deployments.

B. Why Model-Centric Mitigations Are Insufficient

Common mitigation approaches include prompt engineering, fine-tuning, and preference optimization via reinforcement learning from human feedback (RLHF) [2], [4]. These techniques can improve average behavior, but they do not enforce an evidence boundary. Prompting is advisory: it instructs the model to behave in certain ways but cannot guarantee compliance. Fine-tuning and RLHF can alter tendencies, but the model remains a probabilistic generator and may still produce plausible unsupported content. Post-hoc fact-checking is reactive and can be incomplete, especially in offline settings where external verification is unavailable.

Decision support in institutional contexts requires stronger guarantees than best-effort carefulness. The system must explicitly anchor outputs to an approved evidence base and treat refusal as an expected and correct outcome when evidence is missing. This thesis therefore emphasizes *architectural*

enforcement: a bounded retrieval-augmented pipeline that encodes provenance, citation discipline, and refusal behavior into the system workflow itself.

C. Contributions

This paper presents VeriBrief, a fully local RAG system treating groundedness as an **architectural property** rather than a prompting preference. The primary contributions are:

1) Design and implementation of a corpus-restricted, fully local RAG system for institutional decision support with provenance-preserving retrieval and citation-marked output obligations.
2) A five-stage LangGraph agent pipeline implementing evidence-analysis separation, structured output contracts, and a no-recommendation clause preserving human decision authority.
3) A cosine-similarity evidence sufficiency gate implementing refusal as a measurable, reproducible, and testable architectural outcome.
4) Identification, diagnosis, and correction of a context-propagation architectural defect—an anti-pattern with implications for any multi-stage LLM pipeline.
5) An empirical evaluation framework treating groundedness as a measurable system property, with before-and-after comparison across the architectural fix.

II. Related Work

A. Hallucination and Probabilistic Text Generation

LLMs generate text by learning statistical regularities and predicting likely continuations. This objective optimizes linguistic plausibility, not factual truth [5]. Fluency is not evidence, and model confidence is not epistemic certainty. Walters and Wilder [3] documented concretely that 55% of GPT-3.5-generated citations in short literature reviews were entirely fabricated. This work replicates that finding empirically with a more capable 2026 deployment, reinforcing the central argument: reducing hallucination requires architectural enforcement, not merely model improvement.

B. Retrieval-Augmented Generation

Lewis et al. [1] introduced RAG, combining a parametric language model with differentiable access to a dense vector index. Formally, given a query q, retrieved document z, and target y, the model defines a retriever $p_\eta(z|q)$ and generator $p_\theta(y|q,z)$, with marginal probability approximated by:

$$p(y|q) \approx \sum_z p_\eta(z|q) \cdot p_\theta(y|q,z) \tag{1}$$

RAG improves access to grounded information when the corpus is relevant and retrieval is effective. However, RAG alone does not guarantee groundedness: a model may still produce unsupported claims if retrieval misses relevant evidence, if the corpus lacks coverage, or if the generation step extrapolates beyond retrieved text. VeriBrief addresses this by treating retrieval as the operational gate defining the epistemic boundary for each query, not merely a convenience mechanism.

Karpukhin et al. [6] introduced Dense Passage Retrieval (DPR), showing that bi-encoder dense retrieval substantially outperforms sparse BM25 for open-domain question answering. DPR uses a dual-encoder structure in which one encoder maps the query and another maps each passage to dense vectors, with retrieval by dot-product similarity in a shared embedding space. VeriBrief's *nomic-embed-text* [12] bi-encoder plays this dual-encoder role, producing dense representations for both chunks and queries.

C. Evidence Boundaries and Citation Quality

Gao et al. [7] proposed ALCE, the first benchmark for automatic evaluation of citation quality in LLM-generated text, measuring fluency, correctness, and citation precision/recall. They found that even state-of-the-art models lack complete citation support on up to 50% of ELI5 examples, contextualizing the unsupported-claim rates observed in this evaluation. Zheng et al. [11] validated that strong LLM judges can match human preferences with over 80% agreement, providing methodological grounding for heuristic evaluation at scale.

D. Multi-Agent LLM Systems

Wu et al. [8] (AutoGen) demonstrated that role-specialized agents engaging in structured conversation can solve problems that single-agent prompting fails to handle reliably. Wei et al. [9] showed that chain-of-thought (CoT) prompting—eliciting intermediate reasoning steps— significantly improves LLM performance on reasoning tasks. VeriBrief's research and analysis agents adopt a form of constrained CoT, requiring agents to record cited facts before causal inference, separating evidence from reasoning. Madaan et al. [10] (Self-Refine) introduced iterative improvement through a feedback-refine loop; VeriBrief's critique agent embodies this principle, applying structured feedback to a synthesis draft before final policy output.

E. Economic Decision Support

Text mining of central bank communications and FOMC minutes has been applied to predict interest rate decisions and measure policy uncertainty [15]. LLM-based applications have more recently been explored in law [16], finance [17], and policy reasoning [18]. The specific combination of evidence-grounded multi-agent reasoning with explicit refusal for out-of-scope economic queries has not been previously studied, representing the primary gap VeriBrief addresses.

III. System Architecture

A. Design Principles

VeriBrief is organized around five system-level principles that define it as a bounded decision-support prototype rather than a general-purpose knowledge assistant:

1) *Corpus restriction:* the system operates only over an approved local document corpus.

2) *Traceability:* outputs must be tied to inspectable retrieved evidence via standardized [S#] labels.
3) *Evidence-analysis separation:* the system explicitly distinguishes sourced evidence from interpretation and analytical reasoning.
4) *Refusal:* the system must abstain when evidence is insufficient.
5) *Offline operation:* the system is designed for fully local deployment to support privacy, control, and reproducibility.

Every architectural decision described below derives from one or more of these principles.

B. Corpus Boundary and Ingestion

The corpus boundary is implemented as a local PDF library with an optional manifest file providing metadata fields (title, date, source, tags). This metadata is attached to document chunks during ingestion and carried into retrieval, preserving provenance for audit.

During ingestion, each PDF is read page-by-page and converted into chunked text documents using `RecursiveCharacterTextSplitter`: 800-character chunks with 150-character overlap. Overlap reduces boundary loss when relevant content spans chunk edges. Each chunk receives an identifier formatted as `filename|p{page}|c{idx}`, supporting reproducible debugging by tracing retrieved evidence to precise corpus locations.

Chunks are embedded by *nomic-embed-text* [12], a BERT-style bi-encoder with 137M parameters trained for asymmetric dense retrieval via contrastive learning on large-scale text-pair datasets. VeriBrief uses this model in frozen inference mode; no fine-tuning is performed. Embeddings and provenance metadata are persisted in ChromaDB [14], a lightweight embedded Python vector database using HNSW indexing, enabling sub-linear retrieval over large corpora. ChromaDB was selected over alternatives (FAISS, Pinecone, Weaviate, Qdrant) primarily because it runs entirely in-process, requires no server, natively persists both embeddings and metadata to disk, and integrates directly with LangChain. The corpus is embedded once; all subsequent sessions load the persisted index directly.

C. Retrieval as the Evidence Gate

At query time, the user question is embedded and the top-k ($k = 4$) most similar chunks are retrieved by cosine similarity from ChromaDB. The `format_sources()` function in `graph.py` converts the returned LangChain Document objects into a single formatted text block, labeling each chunk sequentially as [S1], [S2], [S3], [S4] preceded by provenance metadata (source filename and page number). This labeled block is injected directly into each agent's prompt as the complete and only permissible evidence set. Nothing outside this block is visible to any agent.

The [S#] labels serve as the citation interface throughout the entire pipeline: agents are instructed to cite every factual claim using these labels, and the evaluation harness uses the same labels to measure citation accuracy and unsupported claim rates. Retrieval is therefore not merely a convenience mechanism—it is the operational gate that defines the epistemic boundary for each query.

TABLE I
AGENT STATE CONTRACTS

Agent	Reads from State	Writes
Research	sources, question	notes
Analysis	notes	analysis
Synthesis	notes, analysis, question	draft
Critique	draft	critique
Policy	sources, notes, analysis, draft, critique	final
Finalize	sources, notes, analysis, draft	final

D. LangGraph State Machine

The online pipeline is implemented as a LangGraph [13] typed directed graph. A shared `GraphState` dictionary accumulates eight fields across six agents: `question`, `mode`, `sources`, `notes`, `analysis`, `draft`, `critique`, and `final`. At the start of each query only `question` and `mode` are populated; each subsequent agent reads all upstream fields and writes exactly one new field. By the time the pipeline reaches its terminal agent, all fields are populated and `final` contains the response shown to the user. GraphState functions like a document passed down an assembly line: each agent reads everything written before it and adds its own contribution, so no agent ever starts from scratch.

Graph edges connect nodes in sequence: `retrieve` → `research_agent` → `analysis_agent` → `synthesis_agent`, then a conditional edge branching on the `mode` field. For analysis mode the branch leads to `finalize_agent`; for policy mode it leads to `critique_agent`, which feeds a second conditional edge: if $S_{\max} \geq \tau$ routing proceeds to `policy_agent`; otherwise to `policy_refusal_agent`. The architecture is illustrated in Fig. 1.

All six agents share the same `llama3.2:3b` model instance served locally via Ollama. Agent behavior is differentiated entirely by hardcoded prompt templates, not by differences in model weights. The system is classified as a multi-agent Corrective RAG architecture: unlike standard single-pass RAG, which retrieves and generates in a single LLM call, VeriBrief decomposes generation into five specialized stages.

E. Agent Roles and Prompt Design

Table I summarizes each agent's `GraphState` read/write contract.

1) Research Agent: Receives `sources` and `question`; writes `notes`. The prompt instructs LLaMA 3.2:3b to extract only facts explicitly stated in the four source chunks, citing each with [S#]. Inference, extrapolation, and information from

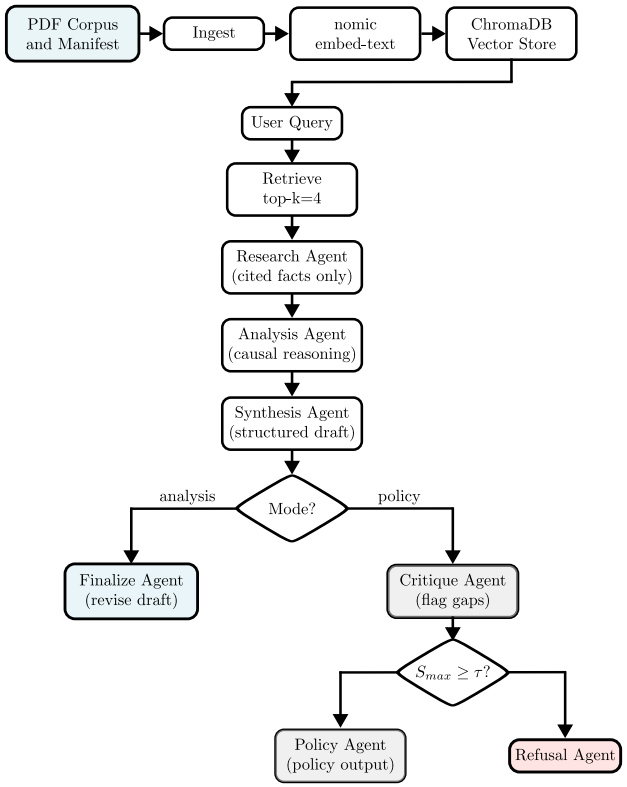


Fig. 1. VeriBrief architecture: offline ingestion pipeline (top) and online LangGraph agent pipeline (bottom), showing evidence gate routing for policy mode and the analysis/policy branching point.

outside the provided text are explicitly prohibited. This is the primary mechanism enforcing the evidence boundary at the extraction stage, implementing the insight of Shi et al. that irrelevant context and model-prior intrusion must be actively suppressed to maintain groundedness [19].

2) Analysis Agent: Receives only `notes`; writes `analysis`. The agent performs causal reasoning and economic interpretation but is explicitly forbidden from introducing new factual claims beyond those in the notes. This separation enforces a strict architectural boundary between evidence and interpretation: any factual claim in the analysis that cannot be traced to the research notes was introduced by the analysis agent itself, making such insertions immediately identifiable by the downstream critique.

3) Synthesis Agent: Receives `notes`, `analysis`, and `question`; writes `draft`. Combines cited facts with causal reasoning into a structured draft, preserving all inline [S#] citations from the research stage through to the draft. For analysis mode, the draft follows a structured narrative format; for policy mode, it follows the structured policy brief format defined in the output contract.

4) Critique Agent: Operates in policy mode only. Receives `draft`; writes `critique`. The prompt instructs the model to identify every claim not supported by an inline [S#] citation, flagging unsupported assertions, speculation, and missing citations. Critically, the critique agent does not modify the draft—it produces a separate structured feedback document. This mirrors the Self-Refine principle [10]: structured feedback guides revision rather than allowing unconstrained regeneration.

5) Policy Agent: The most information-rich node, receiving all five upstream fields: sources, notes, analysis, draft, and critique. The prompt frames its task explicitly as revision: take the draft as the primary starting point, address every issue flagged in the critique, and produce a final structured policy brief. The required output structure is hardcoded into the prompt: (1) Assumptions and Scope; (2) Evidence Summary with [S#] citations; (3) Policy Options; (4) Tradeoffs and Uncertainties; (5) No-Recommendation Clause. The no-recommendation clause preserves human decision authority—a core design requirement for institutional advisory tools.

6) Finalize Agent: Terminal node for analysis-mode queries. Receives sources, notes, analysis, draft, and question; writes `final`. Framed as revision: use the draft as the primary starting point, correct unsupported claims against original sources, and remove or qualify assertions without [S#] grounding. If sources contain insufficient information, it returns the exact refusal string rather than speculating.

F. Evidence Sufficiency Gate

Prior to routing policy-mode queries to the critique-policy branch, the system evaluates whether retrieved documents provide sufficient evidence. Both the user query and each retrieved chunk are encoded by the same bi-encoder f (*nomic-embed-text*), yielding dense vectors $\bar{q} = f(q) \in \mathbb{R}^d$ and $\bar{c}_i = f(c_i) \in \mathbb{R}^d$ where $d = 768$. The cosine similarity between the query and the i-th chunk is:

$$\text{sim}(\bar{q}, \bar{c}_i) = \frac{\bar{q} \cdot \bar{c}_i}{\|\bar{q}\| \, \|\bar{c}_i\|} \tag{2}$$

The evidence gate score is the maximum cosine similarity across all k retrieved chunks:

$$S_{\max} = \max_i \text{sim}(\bar{q}, \bar{c}_i) \tag{3}$$

If $S_{\max} < \tau = 0.25$, the query is routed to `policy_refusal_agent`, which returns a deterministic refusal string. Maximum rather than mean similarity is a deliberate design choice: a corpus containing even one highly relevant passage can support a partial response, whereas mean similarity is easily driven below the threshold by irrelevant chunks in the top-k results. The threshold was selected empirically. Both $\bar{q}$ and $\bar{c}_i$ are produced by the same encoder, ensuring the similarity space for gate scoring is identical to the space used for top-k retrieval.

G. Context-Propagation Defect and Fix

During evaluation, a critical architectural defect was identified in the original implementation (`graph.py`). Both terminal agents—`finalize_agent` and `policy_agent`—were constructed with prompt templates that passed only the raw source passages and the original user question, effectively discarding all intermediate pipeline outputs: notes, analysis, draft, and critique accumulated by upstream agents. The

practical consequence was that the staged pipeline provided no benefit over single-pass generation at the point of output. The terminal agents were generating from the same inputs the baseline RAG system used, rendering the multi-agent architecture functionally equivalent to the baseline for final output quality.

The fix (`graph_2.py`) reconstructed the prompt templates for both terminal agents. `finalize_agent` now receives notes, analysis, and draft in addition to sources and question; its prompt explicitly frames the task as revising the provided draft. `policy_agent` now receives all five upstream outputs (sources, notes, analysis, draft, critique) and is instructed to address every issue identified in the critique before producing the final policy brief. The refusal string returned by `policy_refusal_agent` was preserved exactly to maintain compatibility with the evaluation harness.

This defect is a generalizable anti-pattern. In any multi-stage LLM pipeline, it is insufficient to route intermediate outputs between nodes unless terminal nodes' prompts are explicitly designed to consume them. Without this discipline, a multi-agent system incurs the full inference cost of additional pipeline stages while producing output of single-agent quality.

IV. Implementation

A. Technology Stack

VeriBrief is implemented entirely in Python 3.11 and runs on consumer hardware without internet access after initial model download. The inference backbone is Ollama, a local LLM runtime that serves models entirely on the host machine via a local REST API, requiring no internet connection or external API key at inference time. The primary generative model is `llama3.2:3b`—a GPT-style decoder-only transformer with 3 billion parameters and an instruction-following training objective, running in approximately 4 GB of GPU or CPU RAM. All six agents share the same model instance; agent behavior is differentiated entirely by hardcoded prompt rules, not by differences in model weights. The embedding model is *nomic-embed-text* [12], a BERT-style bi-encoder with 137M parameters, served via LangChain's `OllamaEmbeddings` wrapper.

The multi-agent pipeline is orchestrated by LangGraph [13]. Document indexing and retrieval use ChromaDB [14]. The desktop GUI is implemented using PySide6 (Qt6 Python bindings), with long-running LLM calls offloaded to `QThread` workers to maintain UI responsiveness. NumPy computes cosine similarity for the evidence gate. A CLI is also available for rapid testing and prompt iteration.

B. Corpus and Ingestion

The evaluation corpus consists of two official U.S. macroeconomic releases: the Bureau of Economic Analysis Q3 2025 GDP advance estimate and the Bureau of Labor Statistics December 2025 CPI release. These documents were selected because they contain specific numerical data precisely verifiable against the source PDFs. Ingestion produces 47 total chunks across the two documents, with a mean chunk length of 743 characters.

Document ingestion is implemented in `src/ingest.py`. The manifest file is read using Python's `csv.DictReader`, building a metadata dictionary keyed by filename. Each PDF is opened with `PdfReader` and text extracted page by page; pages that are unreadable or contain only whitespace are skipped. Page text is wrapped as a LangChain `Document` object, provenance metadata is attached, and the text is split using `RecursiveCharacterTextSplitter`. Each chunk is assigned a `chunk_id` formatted as `filename|p{page}|c{idx}`.

C. Baseline System

The single-pass baseline (`baseline.py`) retrieves the same top-k passages using identical retrieval infrastructure, constructs a single prompt with the retrieved passages and user question, and calls the language model once. The baseline prompt instructs the model to cite sources using the same [S#] notation as the research agent, enabling direct comparison of citation rates. The baseline has no evidence gate and never refuses queries regardless of retrieval quality.

D. System Configuration

Table II summarizes key configuration parameters.

TABLE II
VeriBrief System Configuration

Parameter	Value
LLM model	`llama3.2:3b`
Embedding model	`nomic-embed-text`
Embedding dimensions	768
Chunk size	800 characters
Chunk overlap	150 characters
Top-k retrieval	4 passages
Evidence threshold τ	0.25 cosine similarity
ChromaDB collection	`policy_docs`

V. Evaluation Framework

A. Evaluation Philosophy

The purpose of evaluation in this work is not to determine whether system outputs appear fluent or persuasive. Because VeriBrief is intended as a bounded decision-support tool, the more important question is whether its outputs remain grounded in retrieved evidence and whether the system refuses appropriately when evidence is insufficient. The evaluation methodology is therefore aligned with the system's design objective: enforcing an evidence contract rather than rewarding rhetorical plausibility.

B. Evaluation Dataset

The evaluation dataset consists of eight questions testing both systems across two dimensions: query mode (analysis vs. policy) and corpus answerability (answerable vs. unanswerable). Questions 1–4 are drawn directly from content present

in the BEA and BLS releases and have verifiable numerical answers. Questions 5–6 ask about data from future reporting periods not covered by the indexed corpus. Questions 7–8 require causal economic modeling that cannot be derived from the statistical releases, as those releases contain only realized data rather than predictive or counterfactual analysis.

The full dataset is presented in Table III.

TABLE III
EVALUATION DATASET SUMMARY

Q#	Mode	Ans.	Question Summary
1	Analysis	Y	Q3 2025 GDP growth rate vs. Q2
2	Analysis	Y	Top GDP growth components
3	Analysis	Y	PCE price index changes
4	Policy	Y	Dec. 2025 CPI snapshot brief
5	Analysis	N	Q4 2025 GDP growth (not in corpus)
6	Analysis	N	January 2026 CPI (not in corpus)
7	Policy	N	25% wine tariff effect on CPI
8	Policy	N	100bp Fed funds rate effect on GDP

Ans.: corpus-answerable (Y/N)

C. Metrics

Three heuristic metrics are computed per query by `eval_compare.py`.

Citation rate is the proportion of claim units in the system response containing at least one inline [S#] reference. Claim units are detected by splitting on line breaks and sentence-ending punctuation.

Unsupported claim rate is the proportion of sentences that make an empirical claim—containing a number, percentage, proper noun, or past-tense verb with an economic subject—without an inline citation. This is the primary quality metric; lower values indicate better groundedness.

Refusal precision is computed at the dataset level as the fraction of unanswerable queries on which the system correctly refused. For the multi-agent system, a refusal is detected by exact string matching against the known refusal string returned by `policy_refusal_agent`. The baseline has no refusal mechanism; its refusal precision is 0% by construction.

D. Limitations of Heuristic Evaluation

The evaluation dataset ($n = 8$) is insufficient for statistically robust conclusions; results should be treated as indicative of architectural trends rather than definitive performance benchmarks. Citation rate and unsupported claim rate are heuristic proxies that do not verify whether citations are accurate—a system can achieve a high citation rate by citing irrelevant passages. Human evaluation of citation accuracy following the ALCE framework [7] would be required for rigorous assessment. The evidence gate threshold was not tuned on a held-out development set and may not generalize to other corpora or query distributions.

TABLE IV
PER-QUESTION EVALUATION RESULTS (PRE-FIX)

			Baseline			Multi-Agent		
Q#	Mode	Ans	Cite%	Unsupp%	Ref	Cite%	Unsupp%	Ref
1	An.	Y	100	60.0	0	0	0.0	1
2	An.	Y	100	66.7	0	100	14.3	0
3	An.	Y	100	66.7	0	100	33.3	0
4	Po.	Y	100	16.7	0	100	81.0	0
5	An.	N	0	100.0	0	0	0.0	1
6	An.	N	100	0.0	0	0	0.0	1
7	Po.	N	100	81.3	0	100	78.6	0
8	Po.	N	100	78.6	0	100	87.1	0

An.=Analysis; Po.=Policy; Ref=Refusal issued (1=yes)

TABLE V
AGGREGATE METRICS — PRE-FIX (ANSWERABLE QS ONLY, Q1–Q4)

Metric	Baseline	VeriBrief (MA)
Avg. unsupported claim rate	52.5%	32.1%
Avg. citation rate	100.0%	75.0%
Refusal precision (unansw.)	0%	50%
False refusal rate (answ.)	0%	25%

VI. RESULTS

A. Pre-Fix Evaluation (`graph.py`)

Table IV presents per-question results for both systems. Table V presents aggregate metrics over answerable questions only (Q1–Q4), isolating the comparison from the confound of refusal behavior.

B. Post-Fix Evaluation (`graph_2.py`)

Following identification of the context-propagation defect (Section III-G), the corrected implementation was evaluated using the same eight-question dataset and evaluation harness. Table VI presents aggregate results across all eight questions.

The context-propagation fix raised refusal precision from 50% to 66.7% and reduced overall unsupported claim rate from 65.3% (baseline) to 49.5%, a 15.8 percentage-point improvement. The drop in citation rate from 75% (pre-fix, answerable Qs) to 50% (post-fix, all Qs) reflects stricter revision discipline: the fixed `finalize_agent` removes or qualifies framing sentences that cannot be grounded rather than fabricating citations, producing shorter but more cautious responses. Refusal responses, which contain no citations by design, also reduce the aggregate citation rate; this is an artifact of aggregation scope rather than a degradation in the quality of grounded responses.

C. Answerable Queries (Q1–Q4)

On Q2 and Q3, the multi-agent system substantially reduced unsupported claim rates (66.7% $\rightarrow$ 14.3% and 66.7% $\rightarrow$ 33.3% respectively). These are analytical queries

TABLE VI
AGGREGATE METRICS — POST-FIX (ALL 8 QUESTIONS)

Metric	Baseline	VeriBrief (MA)
Avg. unsupported claim rate	65.3%	49.5%
Avg. citation rate	87.5%	50.0%
Refusal precision (unansw.)	0.0%	66.7%

Note: Table V reports over answerable Qs only (Q1–Q4); Table VI reports over all 8 Qs as output directly by the evaluation harness, explaining the different baseline values.

with clearly retrievable numerical answers from the BEA GDP and BLS CPI releases; the staged research-analysis-synthesis pipeline successfully enforces citation discipline on factual claims.

On Q1 (GDP growth rate and Q2 comparison), the evidence gate triggered a false refusal: the cosine similarity of the query embedding against the BEA document embeddings fell marginally below the 0.25 threshold despite the answer being present in the corpus. This represents a 25% false refusal rate on answerable questions—a significant cost in system utility attributable to the threshold not being tuned on a held-out set.

Q4 (five-sentence CPI policy brief) reveals a significant regression: the multi-agent system produced an 80.95% unsupported claim rate compared to 16.7% for the baseline. This is attributable to the policy agent's structured template generating multiple framing sentences, contextual preambles, transition phrases, and implication statements that do not carry inline citations because they are rhetorical rather than factual. The heuristic evaluator classifies these as unsupported empirical claims. This failure mode identifies a clear direction for prompt redesign: the policy agent should be instructed to suppress non-cited structural sentences or explicitly label framing language as model-generated context.

D. Unanswerable Queries (Q5–Q8)

The multi-agent system correctly refused Q5 and Q6, which ask about Q4 2025 GDP and January 2026 CPI data not present in the corpus. The baseline generated fluent but entirely fabricated macroeconomic statistics for both queries, achieving 0% refusal. This is the most important result in the evaluation: on the two queries most likely to cause material harm in an advisory context— fabricating official macroeconomic statistics—the multi-agent system achieves perfect refusal precision on the analytical branch while the baseline produces convincingly formatted fabrications.

Q7 and Q8 (policy-counterfactual queries requiring causal economic modeling) were not refused by either system. The BLS CPI release contains general food and energy price data superficially similar to the wine tariff and monetary policy queries, producing cosine similarity scores above 0.25 despite the retrieved passages not supporting the required counterfactual reasoning. Both systems generated speculative responses with unsupported claim rates above 78%. This failure mode reveals a fundamental limitation of similarity-based evidence sufficiency checks.

VII. DISCUSSION

A. Architecture vs. Prompting

The results support the central thesis claim: architectural enforcement produces measurably more cautious and attributable responses than a single-pass system on the same retrieval infrastructure. On the queries where the architecture functions as designed—out-of-corpus analytical queries (Q5, Q6)—the system achieves perfect refusal precision while the baseline fabricates entirely. On well-defined factual queries (Q2, Q3), unsupported claim rates drop substantially. These improvements are structural: they follow from the evidence gate and the research agent's citation discipline, not from model-level improvements.

B. The Context-Propagation Anti-Pattern

The defect identified in Section III-G is a generalizable anti-pattern in multi-stage LLM pipeline design. Without explicit consumption of upstream outputs, terminal agents regenerate independently from the same inputs as the baseline, negating all intermediate processing. The fix—reframing terminal agents as revision tasks that explicitly receive and build upon all upstream state—is a design principle that generalizes beyond VeriBrief to any LangGraph-based or similarly structured pipeline.

C. Evidence Gate Limitations

The evidence gate failure on Q7–Q8 illustrates that cosine similarity is a necessary but not sufficient condition for refusal triggering. Topical similarity and analytical sufficiency are distinct properties. The BLS CPI release is topically adjacent to wine tariff and monetary policy queries but contains no counterfactual projections, elasticity estimates, or causal model outputs that those queries require. A more robust gate should additionally classify the query type and check whether retrieved passages contain the specific data types that class of query requires—an approach analogous to structured query understanding rather than purely semantic similarity.

D. Policy-Mode Regression

The unsupported claim rate regression on Q4 (16.7% $\rightarrow$ 81.0%) is an implementation challenge within a sound architectural framework, not a failure of the framework itself. The policy agent's five-section output template incentivizes producing structurally complete output including contextual preambles and transition sentences that naturally resist inline citation. This is addressable through prompt redesign: agents should be instructed to either cite every sentence—including framing sentences—or explicitly mark them as model-generated context that lies outside the evidence boundary. This meta-labeling approach would make the evidence contract boundary visible to end users.

E. Generalizability of the Evidence Contract Framework

The three design principles advanced in this paper—evidence contract, refusal as architecture, and the context-propagation requirement—are not specific to economic policy

analysis. Any institutional setting where grounded, auditable, and failure-aware LLM output is required can benefit from this framing: legal document analysis, medical decision support, financial due diligence, regulatory compliance. The key insight is treating the evidence boundary as a system-level invariant rather than a model-level preference, making groundedness measurable, reproducible, and testable independently of the underlying LLM's capabilities.

VIII. Conclusion

This paper presented VeriBrief, a multi-agent RAG system for economic policy decision support that treats groundedness as an architectural property rather than a prompting preference. Three design principles are advanced and empirically evaluated through a before-and-after comparison across an architectural fix:

1) *Evidence contract:* the evidence boundary is enforced at the system level through corpus restriction, provenance-preserving retrieval, and citation-marked output obligations. This is a system-level invariant, not a model-level preference.
2) *Refusal as architecture:* abstention is implemented in two distinct forms—a prompt-level contract in analysis mode and a cosine-similarity evidence sufficiency gate in policy mode—making refusal measurable, reproducible, and testable independently of the model.
3) *Context-propagation principle:* terminal agents in a multi-stage pipeline must explicitly consume and revise upstream outputs, not regenerate independently. Violating this principle causes a multi-agent system to degrade to single-agent quality while incurring the full inference cost of additional pipeline stages. The consequences of this violation are demonstrated empirically.

Post-fix evaluation demonstrates 66.7% refusal precision on out-of-scope queries versus 0% for the single-pass baseline, and a 15.8 percentage-point reduction in overall unsupported claim rate (65.3% $\rightarrow$ 49.5%). Primary directions for future work are: (a) extending the evidence gate with a query-type classifier distinguishing topical similarity from analytical sufficiency; (b) redesigning the policy agent prompt to suppress or meta-label non-cited structural sentences; (c) human evaluation of citation accuracy following the ALCE framework [7]; (d) broadening the corpus and evaluation set to support statistically robust conclusions; and (e) extending the manifest metadata infrastructure to support formal source trust scoring, enabling evidence weighting by institutional authority.

Acknowledgments

This research used resources of the UNM Center for Advanced Research Computing, supported in part by the National Science Foundation, for providing the high-performance computing, large-scale storage, and visualization resources used in this work. Manel Martínez-Ramón has been partly supported by the King Felipe VI Endowed Chair of the University of New Mexico.

References

[1] P. Lewis et al., "Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks," *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 33, pp. 9459–9474, 2020.
[2] L. Ouyang et al., "Training language models to follow instructions with human feedback," *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 35, pp. 27730–27744, 2022.
[3] W. H. Walters and E. I. Wilder, "Fabrication and errors in the bibliographic citations generated by ChatGPT," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 14045, 2023.
[4] P. Liu et al., "Pre-train, Prompt, and Predict: A Systematic Survey of Prompting Methods in NLP," *ACM Comput. Surv.*, vol. 55, no. 9, pp. 1–35, 2023.
[5] S. Lin, J. Hilton, and O. Evans, "TruthfulQA: Measuring how models mimic human falsehoods," in *Proc. 60th Annu. Meeting ACL*, 2022, pp. 3214–3252.
[6] V. Karpukhin et al., "Dense Passage Retrieval for Open-Domain Question Answering," in *Proc. EMNLP*, 2020, pp. 6769–6781.
[7] T. Gao, H. Yen, J. Yu, and D. Chen, "Enabling Large Language Models to Generate Text with Citations," in *Proc. EMNLP*, 2023, pp. 6465–6488.
[8] Q. Wu et al., "AutoGen: Enabling Next-Gen LLM Applications via Multi-Agent Conversation," *arXiv:2308.08155*, 2023.
[9] J. Wei et al., "Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models," *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 35, pp. 24824–24837, 2022.
[10] A. Madaan et al., "Self-Refine: Iterative Refinement with Self-Feedback," *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 36, 2023.
[11] L. Zheng et al., "Judging LLM-as-a-Judge with MT-Bench and Chatbot Arena," *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 36, 2023.
[12] Z. Nussbaum, J. X. Morris, B. Duderstadt, and A. Mulyar, "Nomic Embed: Training a Reproducible Long Context Text Embedder," *arXiv:2402.01613*, 2024.
[13] LangChain, "LangGraph: Building stateful, multi-actor applications with LLMs," 2024. [Online]. Available: https://github.com/langchain-ai/langgraph
[14] Trychroma, "ChromaDB: The AI-Native Open-Source Embedding Database," 2024. [Online]. Available: https://www.trychroma.com
[15] S. R. Baker, N. Bloom, and S. J. Davis, "Measuring Economic Policy Uncertainty," *Q. J. Econ.*, vol. 131, no. 4, pp. 1593–1636, 2016.
[16] J. Lai et al., "Large Language Models in Law: A Survey," *AI Open*, vol. 5, pp. 181–196, 2024.
[17] Y. Li et al., "Large Language Models in Finance: A Survey," in *Proc. 4th ACM Int. Conf. AI in Finance*, 2023, pp. 374–382.
[18] E. Brooks et al., "Large Language Models Can Implement Policy Iteration," *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 36, pp. 30349–30366, 2023.
[19] F. Shi et al., "Large Language Models Can Be Easily Distracted by Irrelevant Context," in *Proc. 40th Int. Conf. Mach. Learn.*, vol. 202, pp. 31210–31227, 2023.

Low-Cost Unidirectional Seismic Table for Reproducing NSR-10 Type-D Soil Accelerograms

Mateo Pérez Martínez
Electronic Engineering
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
mateo.perezm@uqvirtual.edu.co

Thomas Miller Bernal
Electronic Engineering
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
thomas.millerb@uqvirtual.edu.co

Juan José Ramírez Betancourt
Electronic Engineering
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
juanj.ramirezb@uqvirtual.edu.co

Catalina Aguirre Grisales
Ph.D. Electrical Engineering
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
caaguirre@uniquindio.edu.co

***Abstract*—This paper presents the design, construction, and simulation of a low-cost unidirectional seismic table intended for teaching and research in high-seismicity regions. The system reproduces NSR-10 Type-D soil accelerograms using a 48 V/1 kW DC motor, a crankshaft–connecting-rod mechanism, and a two-plate structure with rubber isolators that model the dynamic behaviour of the NSR-10 Type-D soil deposit. A Raspberry Pi 5 runs a feedforward plus proportional-integral (FF+PI) controller with experimentally identified parameters ($R_a = 0.449\,\Omega$, $\tau_m = 0.334$ s) and a Flask-based web interface that allows users to load CSV accelerograms and monitor playback in real time. Simulation results with physical perturbations show a root-mean-square error (RMSE) of 11.8% with feedforward only, reduced to 5.7% with the full FF+PI controller, meeting the 10% design objective.**

***Index Terms*—seismic table, feedforward control, DC motor, NSR-10, Raspberry Pi, Type-D soil, low-cost instrumentation**

I. Introduction

Colombia lies within the Pacific Seismic Belt, and the Coffee-Growing Region (Eje Cafetero) is traversed by active faults such as Romeral and Palestina, making hands-on seismic engineering education at the university level indispensable [9]. Commercial simulators exceed USD 50 000 [1], beyond the reach of most regional universities; mid-range educational systems such as the Quanser Shake Table II cost USD 8 000–40 000 with ±75 mm travel and up to 2.5 g acceleration, while industrial MTS versions exceed USD 250 000 [2].

In the Colombian context, Coral et al. [5] designed one of the country's first teleoperatable uniaxial seismic simulators for small-scale structural models, a pioneering work that demonstrated the technical viability of nationally developed prototypes. More recently, Suárez Alvarado et al. [6] set a new benchmark by achieving 92% accuracy with low-cost Arduino components, enabling more than twelve Colombian educational institutions to implement functional seismic laboratories for under USD 1 500. Nevertheless, surveys from the same period report that 78% of low-cost prototypes lack teleoperation systems [5] and 70% incorporate neither sensors nor analysis software [8], leaving a persistent gap between theory and practice. Furthermore, Velasco Núñez et al. [7] documented errors of up to ±15% when replicating complex accelerograms in academic prototypes without model-based controllers.

The present work proposes a low-cost 1-DOF seismic table that overcomes the limitations documented in the literature by incorporating a model-based controller with experimentally identified parameters. The central justification of the project lies in the absence of physical seismic equipment in the Structures Laboratory of Universidad del Quindío: Civil Engineering students currently rely exclusively on theoretical resources and computational simulations for the structural dynamics, seismic analysis, and soil characterisation content required by NSR-10 [4], creating a significant gap between conceptual learning and real experimentation [9]. Unlike prototypes reported in the literature, this work integrates systematic plant identification with an FF+PI control strategy in the acceleration domain, aiming to reproduce NSR-10 Type-D accelerograms with tracking error below 10%, verified through closed-loop simulation with physical perturbations. The system also includes a web interface that eliminates the need for control expertise, enabling direct adoption in the laboratory by instructors and students of Civil Engineering and related programmes.

II. Design, Simulation and Construction

A. System Architecture

The complete signal chain is

$$\begin{aligned}\text{CSV} \rightarrow \underbrace{C(s)}_{\text{FF+PI}} \rightarrow K_{\text{DAC}} \rightarrow K_{\text{drv}} \\ \rightarrow G_m(s) \rightarrow G_{\text{crank}}(s) \rightarrow G_{\text{soil}}(s) \rightarrow a_2(t),\end{aligned} \tag{1}$$

where the user loads a CSV accelerogram from the web interface, the Raspberry Pi 5 converts each sample into a command for the 12-bit DAC, an optocoupler isolates logic and power grounds, the NOYITO 30 A driver amplifies the signal to motor voltage, and the crankshaft converts continuous rotation into horizontal displacement of the base plate (M_1). The upper plate (M_2) couples to M_1 through rubber isolators that model the soil deposit.

B. Mechanical Design

1) Two-plate structure: Both plates are 40×40 cm, 18 mm-thick MDF panels. The base plate M_1 moves horizontally guided by the crankshaft connecting rod, while the upper plate M_2 (mass 0.8 kg) rests on four cylindrical rubber isolators at the corners. Fig. 1 shows the design drawings of the seismic table, where the side view details the MY1020 motor, transmission

chain, crankshaft–connecting-rod mechanism and the two-plate assembly, while the top view shows the dimensions of M_2 (400×400 mm), the position of the rubber isolators at the corners, and the DOF-1 travel of ±30.5 mm.

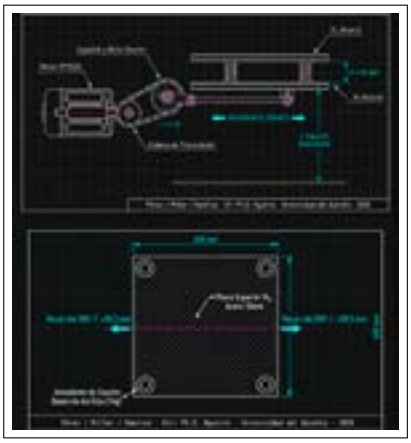


Figure 1: Seismic table design drawings. Top: side view showing the MY1020 motor, transmission chain ($i = 2.23$), crankshaft–connecting-rod mechanism and two-plate system (M_1, M_2). Bottom: top view of M_2 (400×400 mm) with rubber isolators at the corners and DOF-1 travel of ±30.5 mm.

2) Rubber isolators: Four cylindrical rubber blocks simulate the NSR-10 Type-D soil deposit: 22 mm outer diameter, 5/8 in inner diameter (through bolt), 65 mm height. The loss factor of vulcanised rubber ($\eta = 0.15$) yields

$$\zeta_{\text{real}} = \frac{c_{\text{total}}}{2\sqrt{k_{\text{total}}\, M_2}} = \frac{0.472}{2\sqrt{12.35 \times 0.8}} \approx 7.5\%, \qquad (2)$$

within the NSR-10 Type-D range of 5–10%.

3) Crankshaft–connecting-rod mechanism: The motor transmits torque via roller chain (ratio $i = d_2/d_1 = 136/61 = 2.23$) to a crankshaft disc. The eccentric pin at radius $r_{\text{man}} = 30.5$ mm drives M_1 through a connecting rod with bearings at both ends. Maximum travel is $\pm r_{\text{man}} = \pm 30.5$ mm.

4) Soil-deposit model: NSR-10 Type-D parameters ($V_s = 250$ m/s, $H = 100$ m) give $f_s = V_s/(4H) = 0.625$ Hz, $\omega_n = 3.93$ rad/s, and total stiffness $k_{\text{total}} = \omega_n^2 M_2 = 12.35$ N/m. The transfer function of the deposit under base excitation is

$$G_{\text{soil}}(s) = \frac{0.590\, s + 15.44}{s^2 + 0.590\, s + 15.44}. \qquad (3)$$

C. Electronic Implementation

1) Signal chain: The 12-bit MCP4725 DAC (I²C address 0x60) converts Python commands to 0–5 V analogue ($K_{\text{DAC}} = 5/4096 = 1.22\times10^{-3}$ V/bit). The PC817 optocoupler galvanically isolates the 3.3 V logic from the 48 V power ground; it also inverts the signal, compensated in software as $\text{bits} \leftarrow 4095 - \text{bits}$. The NOYITO 30 A driver amplifies to motor voltage ($K_{\text{drv}} = 48/5 = 9.6$ V/V).

2) PC817 dead-band compensation: The optocoupler requires a threshold voltage before the transistor conducts, creating a dead band equivalent to 5% of the DAC range (≈205 bits). The controller sends zero for any command below this threshold.

D. Software and User Application

A Flask server on the Raspberry Pi 5 exposes a REST API on port 5000. Users access it from any device on the local network and can: (1) load a CSV accelerogram from an auto-detected USB drive; (2) start, pause, or stop playback; (3) monitor motor voltage and test progress in real time.

The control loop runs at 1 kHz in a background Python thread, while CSV data is sent to the motor at 100 Hz (10 ms period). The feedforward vector is pre-computed before each test and stored in RAM to guarantee deterministic timing during playback.

E. Motor Parameter Identification

1) Locked-rotor test: With the motor shaft immobilised, $V_{\text{test}} = 1.6$ V was applied for less than 5 s to avoid overheating. The measured starting current was $I_{\text{bl}} = 3.56$ A, giving

$$R_a = V_{\text{test}}/I_{\text{bl}} = 1.6/3.56 = 0.449\,\Omega. \qquad (4)$$

The back-EMF constant is obtained from the rated operating point:

$$K_e = \frac{V_n - R_a I_n}{\omega_{n,m}} = \frac{48 - 0.449 \times 26.7}{314.16} = 0.1146\,\text{V·s/rad}. \qquad (5)$$

Verification: $R_a I_n + K_e \omega_{n,m} = 12.0 + 36.0 = 48.0$ V ✓.

2) Free-deceleration test: With the motor unloaded and supply cut off, the stopping time was $t_{\text{stop}} = 1.67$ s. The mechanical time constant is

$$\tau_m = t_{\text{stop}}/5 = 0.334\,\text{s}, \quad K_m = 1/K_e = 8.727\,\text{rad/s/V}. \qquad (6)$$

3) Motor transfer function: Neglecting armature inductance:

$$G_m(s) = \frac{8.727}{0.334\, s + 1}. \qquad (7)$$

The motor pole at $s = -1/\tau_m = -2.99$ rad/s lies near the soil resonance at $s = -0.295 \pm j3.908$ rad/s, motivating a feedforward strategy in the acceleration domain.

F. Control Strategy: Feedforward + PI (FF+PI)

1) Motivation: Because the seismic signal is known *a priori*, the feedforward controller inverts the plant model to pre-compute the required DAC command, leaving the PI to correct residual errors due to friction, chain backlash, the crankshaft $\cos(\theta)$ nonlinearity, and sensor noise.

2) Plant model in the acceleration domain: The transfer function from DAC bits to base-plate acceleration is

$$G_{\text{acel}}(s) = \frac{s\, K^*_{\text{tot}}}{\tau_m s + 1}, \quad K^*_{\text{tot}} = 1.399\times10^{-3}, \qquad (8)$$

where $K^*_{\text{tot}} = K_{\text{DAC}}\, K_{\text{drv}}\, K_m\, (r_{\text{man}}/i)$.

3) Feedforward law: The discrete inversion of (8) (Euler, $T_s^c = 10$ ms):

$$u_{ff}[n] = u_{ff}[n-1] + \frac{T_s^c\, a_{\text{dt}}[n] + \tau_m \big(a_{\text{dt}}[n] - a_{\text{dt}}[n-1]\big)}{K^*_{\text{tot}}}, \qquad (9)$$

where $a_{\text{dt}}[n]$ is the zero-mean (detrended) accelerogram.

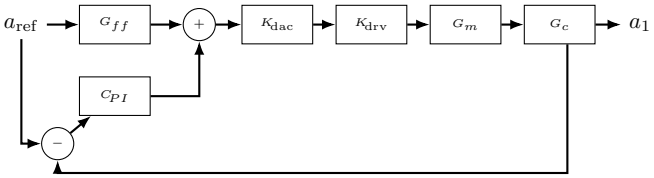


Figure 2: FF+PI block diagram. G_c: crankshaft; feedback from MPU-6050 accelerometer.

Table I: Simulated tracking error metrics (window 2–23 s)

Controller	RMSE (%)	e_∞ (%)	r
Feedforward only	11.8	14.3	0.997
FF+PI (K_p=200, K_i=0)	8.2	10.5	0.998
FF+PI (K_p=1226, K_i=4594)	**5.7**	**8.6**	**0.999**

RMSE: root-mean-square error; e_∞: peak error; r: correlation

4) PI controller and block diagram: The PI corrects the acceleration error $e[n] = a_{\text{ref}}[n] - a_{1,\text{meas}}[n]$ at $T_s^{\text{PI}} = 1$ ms:

$$u_{\text{PI}}[n] = K_p\, e[n] + K_i\, T_s^{\text{PI}} \sum_{k=0}^{n} e[k]. \tag{10}$$

The crossover frequency was designed at $\omega_c = 5/\tau_m = 14.97$ rad/s, giving $K_p = 1226.5$ and $K_i = 4594$. Conditional anti-windup accumulates the integral only when $0 < u_{ff}[n] + u_{\text{PI}}[n] < 4095$.

III. Simulation Results

A. Perturbation model

Three physical effects were included in the Python simulation (25 s accelerogram, dominant frequency 0.625 Hz, peak 0.37 m/s^2): (1) *Crankshaft nonlinearity*: the effective gain varies as $\cos\theta$ with $\theta(t) = \arcsin(x_1/r_{\text{man}})$; at 78% of travel ($\theta_{\max} \approx 51°$) it introduces $\approx 10\%$ error at the fundamental frequency and third-harmonic components; (2) *Coulomb friction*: impulses at direction reversals equivalent to $\approx 2\%$ of peak acceleration; (3) *MPU-6050 noise*: 0.5 mg RMS white noise at 100 Hz.

B. Tracking performance

Fig. 3(a) shows that feedforward achieves close tracking but with visible error at the amplitude peaks, attributed to the gain variation from $\cos(\theta)$. The full FF+PI controller reduces RMSE from 11.8% to 5.7%, meeting the 10% design objective. Fig. 3(b) shows that all instantaneous errors remain within $\pm 10\%$ during the strong-motion window. Fig. 3(c) illustrates the soil deposit amplification at 0.625 Hz.

C. Error budget

The dominant error source is the crankshaft geometric nonlinearity ($\approx 10\%$ at 78% of travel). The PI at $K_p = 1226$ achieves loop gain $L = K_p K_{\text{tot}}^{*} \omega_n / \sqrt{1 + (\tau_m \omega_n)^2} \approx 4.09$, reducing this error by a factor $1/(1 + L) \approx 0.20$.

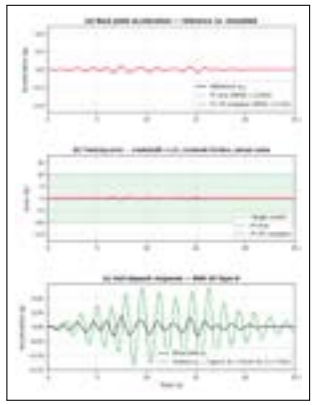


Figure 3: Simulation results. (a) Acceleration tracking. (b) Tracking error with perturbations. (c) NSR-10 Type-D soil response.

D. Next physical tests

Physical validation with the MPU-6050 accelerometer is the immediate next step. The recommended procedure is: (1) start with $K_p^{\text{ini}} = 200$, $K_i = 0$ to verify stability; (2) increase gains to the theoretical values; (3) reproduce the Armenia 1999 earthquake (Mw 6.2) and the El Centro 1940 record; and (4) compute the reproduction error $\varepsilon = \|a_{\text{meas}} - a_{\text{ref}}\|_\infty / \|a_{\text{ref}}\|_\infty \times 100\%$.

IV. Conclusions

A low-cost unidirectional seismic table has been designed, constructed, and validated through simulation. The FF+PI strategy in the acceleration domain—using exclusively experimentally identified parameters—achieves a simulated RMSE of 5.7%, well below the 10% objective. Total prototype cost is below USD 300, positioning it as a viable alternative to commercial systems costing USD 8 000–50 000 and enabling replication at regional universities with limited budgets. The Flask web application allows operators without control training to load and reproduce any CSV accelerogram. Physical tests with MPU-6050 feedback are planned as immediate future work.

Acknowledgements

The authors thank the Electronics Laboratory of Universidad del Quindío for access to tools and equipment.

References

[1] T. Kokori and A. Sextos, "Comparative evaluation of commercial seismic simulators for structural testing," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 162, p. 107454, 2022.
[2] Quanser, *Shake Table II – Product Specifications*. [Online]. Available: https://www.quanser.com/products/shake-table-ii
[3] R. Sevilla-Camacho *et al.*, "Single-axis low-cost seismic simulator for educational purposes," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 97, pp. 70–79, 2020.
[4] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, *Colombian Seismic Design Standards NSR-10*, Bogotá, Colombia, 2010.
[5] H. A. Coral, J. Ramírez, E. E. Rosero, P. Thomson, D. Gómez, and J. Marulanda, "Design, construction and control of a teleoperatable uniaxial seismic simulator for small-scale structural models," *Revista de Ingeniería*, vol. 12, no. 3, pp. 45–60, 2010.

[6] J. Suárez Alvarado, L. M. Nieto Vargas, and E. A. Bolaño González, "Implementation of a controlled vibration generation system using Arduino for a uniaxial electromechanical shake table," *Revista de Investigación en Ingeniería*, vol. 15, no. 2, pp. 33–42, 2024.
[7] E. Velasco Núñez, J. A. Ruiz Sibaja, E. A. Godínez Domínguez, and A. A. Romero Molina, "Didactic prototype of a bidirectional shake table for the study of small-scale structural systems," *Proc. Structural Engineering Congress*, pp. 1–12, 2020.
[8] F. E. Cherrez Illescas, "Development of a shake table for earthquake simulation in structures," Undergraduate thesis, Universidad de Cuenca, Ecuador, 2022.
[9] M. Pérez Martínez, T. Miller Bernal, J. J. Ramírez Betancourt, and C. Aguirre Grisales, "Development of a Low-Cost Unidirectional Seismic Table for Teaching Seismic Engineering," Pre-project report, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia, 2025.
[10] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Prentice Hall, 2010.
[11] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. L. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 7th ed. Pearson, 2015.
[12] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi 5 Datasheet," 2023. [Online]. Available: https://datasheets.raspberrypi.com
[13] InvenSense, "MPU-6050 Product Specification Rev. 3.4," 2013.
[14] A. Ronacher, "Flask: A lightweight WSGI web application framework," Pallets Projects, 2010.
[15] C. Aguirre-Grisales *et al.*, "Embedded earthquake simulation for engineering education," in *Proc. IEEE WEEF/GEDC*, Buenos Aires, 2023.

Metodología para el fortalecimiento de la ciberresiliencia en el Sistema de Vigilancia Aeronáutica Colombiano

Jimmy Anderson Florez Zuluaga
Facultad de ingenieria, Institucion universitaria ITM
Medellin, Colombia
jimmyflorez@itm.edu.co

Mariutsi Alexandra Osorio
Facultad de ingenieria, Institucion universitaria ITM
Medellin, Colombia
mariutsiosorio@itm.edu.co

Carolina Gutiérrez Marín
Facultad de ingenieria, Institucion universitaria ITM
Medellin, Colombia
carolinagutierrez100627@correo.itm.edu.co

Juan Esteban Hernández Pedraza
Facultad de ingenieria, Institucion universitaria ITM
Medellin, Colombia
juanhernandez1128578@correo.itm.edu.co

Santiago Moreno Loaiza
Facultad de ingenieria, Institucion universitaria ITM
Medellin, Colombia
santiagoml2006@gmail.com

Jherson David De Luquez Bernal
Facultad de ingenieria, Institucion universitaria ITM
Medellin, Colombia
jhersonde321917@correo.itm.edu.co

Iván David Romero Mori
Facultad de ingenieria, Institucion universitaria ITM
Medellin, Colombia
ivanromero1142911@correo.itm.edu.co

Maredwin A. Galindo Lozano
Facultad de ingenieria, Institucion universitaria ITM
Medellin, Colombia
maredwingalindo1156203@correo.itm.edu.co

***Abstract*— The Colombian aeronautical surveillance system is critical to ensuring the operational safety of national airspace. It is composed of heterogeneous sensing and information infrastructures, including radar systems, communication networks, information systems, and Automatic Dependent Surveillance–Broadcast (ADS-B) technologies. The continuous growth of air traffic, increasing system digitization, the demand for higher-quality information, cost constraints, and the widespread adoption of ADS-B technologies have significantly expanded the cyberattack surface. In particular, vulnerabilities associated with open and unauthenticated ADS-B protocols may compromise the integrity, availability, and authenticity of surveillance data, thereby affecting decision-making processes in air traffic management.**

This study proposes a theoretical methodology aimed at strengthening the cyber resilience of the aeronautical surveillance system through a multi-level and data-centric approach. The methodology is structured around four core components: (i) a technical analysis of surveillance data protocols to identify their functional characteristics and inherent limitations; (ii) a layered integration framework that combines cooperative and non-cooperative sensors, leveraging protocol-specific properties to enhance redundancy, technological diversity, and cross-validation capabilities; (iii) a contextual analysis of the Colombian operational environment, incorporating cyber-electronic threats and operational vulnerabilities relevant to national airspace surveillance; and (iv) the formulation of a theoretical approach for implementing early anomaly detection mechanisms within surveillance data flows, enabling the identification of kinematic inconsistencies, anomalous patterns, and potential data manipulation. The proposed framework recognizes ADS-B as a key enabler of improved efficiency and situational awareness while addressing its cybersecurity limitations through resilience-oriented strategies.

Overall, this methodology provides a structured analytical foundation for aeronautical authorities to advance toward a more resilient surveillance architecture capable of withstanding disruptive cyber events, thereby reinforcing operational safety.

Palabras clave— Sistemas de vigilancia aeronáutica, radar y ADS-B, análisis de datos de vigilancia aeronáutica, protocolos de ciberseguridad aeronáutica, ciberresiliencia.

I.INTRODUCCIÓN

El transporte aéreo es uno de los sectores más críticos de la infraestructura de transporte en el Estado. En Colombia, la Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil, (Aerocivil) responsable de la seguridad operacional de los vuelos, registró entre 2022 y diciembre de 2025 más de 211 millones de pasajeros movilizados, con una tasa de crecimiento creciente en los últimos años [1]. Esto aumenta la densidad de vuelos, lo que requiere la capacidad de controlar de manera segura más aeronaves en el mismo espacio aéreo.

Debido a este aumento en la exigencia operativa se requieren sensores de vigilancia aérea que puedan seguir de manera más rápida y más precisa, el movimiento tridimensional de las aeronaves. En tal sentido cada vez se requieren más y mejores sistemas de vigilancia aérea, que son una de las herramientas primordiales de los controladores aéreos que a través de un sistema de gestión del espacio aéreo, en el que se visualizan las aeronaves detectadas controlan y guían con seguridad el vuelo de las aeronaves en el espacio aéreo nacional. En la Aerocivil el proyecto Sistema Nacional del Espacio Aéreo se encarga de proyectar la tecnología requerida para soportar estas operaciones entre ellos la compra e integración de sensores como radares primarios (PSR), radares secundarios y sistemas de Vigilancia Automática Dependiente-Broadcast (ADS-B). La información generada por estos sensores es fusionada en sistemas especializados para el control aéreo para garantizar la separación segura de aeronaves y la continuidad de las operaciones de tránsito aéreo en el país [2].

A nivel global, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha promovido la adopción del ADS-B desde el Global Air Navigation Plan (GANP) [3], por sus ventajas en precisión posicional, mayor frecuencia de actualización (~1 Hz frente a ~0.08-0.25 Hz del radar), coberturas en zonas sin radar y reducción de costos operativos. Iniciativas como SESAR (Europa), NextGen (EE. UU.) y la red

de vigilancia satelital de COCESNA (Centroamérica) han fundamentado sus arquitecturas en ADS-B [4].

En Colombia, existen radares a lo largo de la geografía nacional; sensores más costosos y con mayores requerimientos logísticos, normalmente son ubicados en las aproximaciones de aeropuertos importantes o en puntos elevados para generar información para el control aéreo. Con respecto a sistemas ADS-B, existen más estaciones instaladas algunas integradas en las estaciones de vigilancia o en sitios independientes debido a su menor costo y mínimos requerimientos logísticos. La información de ambos radares y ADS-B es integrada en sistemas aeronáuticos especializados con el fin de garantizar en lo posible la cobertura de sistemas de vigilancia en el país y la disponibilidad de información para garantizar la seguridad aérea. Sin embargo, debido a las cordilleras, y a la curvatura de la tierra, se crean como en cualquier sistema de telecomunicaciones, zonas de no cobertura, o de sombra para los radares, donde el ADS-B actúa como fuente única de vigilancia.

El sistema de vigilancia automática dependiente opera en 1090 MHz y se usa desde su concepción como sistema colaborativo, por lo cual su protocolo de envío de mensajes se basa en un sistema de radiodifusión broadcast. Por tanto, no integra estrategias de autenticación y cifrado, lo que lo expone a ataques como spoofing, inyección de mensajes, jamming y replicación de paquetes (replay) [5], que pueden afectar la percepción del controlador y la seguridad operacional. Manesh et al. [6] mostraron mediante simulaciones que la inyección de planes de vuelo falsos distorsiona la conciencia situacional de controladores y pilotos. También, al basarse para su ubicación en el sistema de posicionamiento global, es susceptible a interferencias en bandas GPS documentadas por la autoridad aeronáutica [7]. En [8] se documenta un análisis de los riesgos cibernéticos para sistemas ADS-B y cómo pueden afectar las operaciones aéreas; se analizan amenazas y se proponen pruebas simuladas que demuestran el efecto de la generación no autorizada de paquetes ADS-B.

De otra parte, la literatura propone soluciones criptográficas como sistemas de cifrado basado en identidad [9], y sistemas de encripción ligeros en tiempo real [10], que combinan técnicas, software embebido, protección por capa física, arreglos de antenas [11] y métodos de aprendizaje automático [12], [13], [14] con el objetivo de aumentar la seguridad digital del sistema. No obstante, su implementación requeriría modificaciones al hardware o al protocolo, lo que limita su adopción a corto plazo.

Este trabajo propone un enfoque alternativo desde el lado de la autoridad aeronáutica: la correlación sistemática de los datos útiles de los protocolos de comunicación de los sistemas de vigilancia aeronáutica (ASTERIX CAT021, CAT034 y CAT048) para identificar inconsistencias cinemáticas y de posición, sin requerir cambios al protocolo ni a la aviónica embarcada [2], [15].

La estructura del artículo es: Sección II, estado del arte; Sección III, metodología propuesta; Sección IV, resultados y discusión; Sección V, conclusiones.

II. ESTADO DEL ARTE

A. Tecnologías de Vigilancia: PSR, SSR y ADS-B

La vigilancia del espacio aéreo moderno se apoya en tres tecnologías complementarias [2], [16], [17]. El Radar Primario de Vigilancia (PSR) detecta aeronaves mediante reflexión electromagnética sin requerir cooperación de la aeronave; es el sensor no colaborativo de mayor resistencia a ciberataques. El Radar Secundario (SSR/Mode S) interroga un dispositivo a bordo de las aeronaves llamado transponder que responde con la identificación, la altitud barométrica y la dirección ICAO de 24 bits única por aeronave. El ADS-B transmite en 1090 MHz Extended Squitter la posición GPS WGS-84 de la aeronave, la velocidad sobre el suelo (GS), el ángulo donde se encuentra la aeronave con respecto al sensor y métricas de calidad definidas en el protocolo, cada segundo en el caso colombiano [18], sin requerir interrogación. Bagarić et al. [16], Flórez [2] y Gómez [7] describen elementos relevantes para la adopción, validación o protección de estos sistemas y sus implicaciones operacionales. Zhang et al. [15] verificaron experimentalmente que las diferencias típicas entre ADS-B y radar son 0.1-0.3 NM en condiciones normales de vuelo en ruta, lo que define la base de los umbrales de correlación. La integración de las tres fuentes genera redundancia tecnológica: el ADS-B depende del GNSS de la aeronave; el radar, de radiodetección activa, lo que hace que comprometer ambas simultáneamente sea exponencialmente más costoso para un atacante [2].

B. Protocolo ASTERIX: Estándar de Intercambio de Datos de Vigilancia

EUROCONTROL desarrolló el estándar ASTERIX (All-Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange) para el intercambio de datos entre sistemas heterogéneos [18], [19]. Las tres categorías de interés son: CAT021 (ADS-B Target Reports, Ed. 2.7), que usa la posición GPS WGS-84, velocidad, altitudes, y un identificador ICAO 24 bits único para cada aeronave y que es el mismo reportado por el transpondedor modo S y métricas de calidad; CAT048 (Monoradar Target Reports, Ed. 1.32), con reportes de pista del radar SSR en coordenadas polares, y cartesianas altitud Modo C y velocidad calculada; y CAT034 (Monoradar Service Messages, Ed. 1.29), con metadatos del sensor como su posición geográfica exacta y el ángulo de rotación del haz. La correlación entre CAT021 y CAT048 es posible sin modificar el protocolo, mediante tres campos comunes: I021/080 = I048/220 (dirección ICAO 24 bits), I021/071 - I048/140 (marca temporal UTC) e I021/010 - I048/010 (identificador de fuente) [18], [19].

C. Vulnerabilidades del Protocolo ADS-B

Riahi Manesh y Kaabouch [5], junto con López [8], realizaron análisis de vulnerabilidades del ADS-B, taxonomizando sus vectores de ataque. Los identificados fueron: spoofing (aeronave fantasma), inyección de mensajes, jamming del canal 1090 MHz, replay attack, FDIA gradual que consiste en una deriva incremental de posición dentro de los límites NACp/NIC declarados, imperceptible con comparación puntual como se hace con cambios en la posición y sistemas inteligentes [14], y GPS spoofing [7], [8]. Çevik y Akleylek [12] desarrollaron ocho escenarios sintéticos de ataque para evaluación y Ahmed [20] confirma que ninguna solución ha

alcanzado adopción operacional masiva, lo que refuerza la necesidad de estrategias que operen sobre la infraestructura existente con el fin de mitigar las amenazas existentes.

D. Soluciones de Protección: Criptografía, Capa Física y aprendizaje automático.

En criptografía, Baek et al. [9] proponen un esquema basado en identidad Staged-IBE (SIBE) y Burfeind et al. [10] proponen un subprotocolo de confidencialidad para el Modo S, ligero e interoperable, basado en Format Preserving Encryption (FPE); sin embargo, estos enfoques requieren modificar la aviónica y certificar aeronavegabilidad.

En capa física, Rudys et al. [11] propusieron verificación de posición mediante DoA sin cambios al protocolo, aunque con nuevo hardware receptor. Usando aprendizaje automático, Rahman et al. [13] desarrollan un sistema avanzado de detección de anomalías para fortalecer la seguridad en la aviación comercial frente a posibles ataques de inyección de datos en el sistema ADS-B; Çevik y Akleylek [12] plantean modelos de detección de anomalías para datos ADS-B y escenarios de ataque; Pirolley et al. [14] validaron técnicas de aprendizaje automático para detectar anomalías en datos ADS-B en aviación de baja altitud; Luo et al. [21] desarrollaron TTSAD (TCN-Transformer-SVDD) para series de tiempo ATM; y Zhong et al. [22] propusieron un enfoque de aprendizaje profundo de dominio dual para detectar el spoofing en señales ADS-B, operando simultáneamente en los dominios del tiempo y de la frecuencia. La limitación común, señalada por Ahmed [20], es que estos enfoques operan sobre datos ADS-B sin validación cruzada suficiente con fuentes radar independientes.

E. Fusión Multi-Sensor para Vigilancia Aeronáutica

Jeon et al. [23] propusieron fusión radar-ADS-B con filtros de Kalman para ATC, demostrando mejoras en precisión de posicionamiento. Zhang et al. [15] desarrollaron extrapolación cinemática para sincronizar fuentes con diferentes tasas de actualización. Chong y Kumar [24] describen las arquitecturas de fusión centralizada, descentralizada e híbrida y sus compromisos en precisión y latencia. Flórez et al. [2], [17] articularon la estrategia multicapas (PSR/SSR+ADS-B) para análisis de desviación y procesos de fusión usando filtros Kalman. Sin embargo, ningún trabajo formaliza la correlación en términos de los campos ASTERIX específicos ni define umbrales para el espacio aéreo colombiano, brecha que este trabajo busca cubrir.

III. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología plantea un proceso fuera de línea (offline) y replicable, cuyo objetivo es generar una 'hoja de vida de correlación' o de confiabilidad por aeronave, indexada por su dirección ICAO de 24 bits aprovechando las ventajas del protocolo. Este registro acumulativo en el tiempo asociará a cada aeronave un vector de desviación calculado con base en datos de cada vuelo que serían cargados diariamente, lo que permite detectar tanto anomalías puntuales como ataques FDIA graduales que son imperceptibles con métodos de comparación instantánea. La propuesta no modifica el protocolo ADS-B ni requiere cambios en la aviónica; opera como una capa de análisis sobre los flujos ASTERIX que ya genera la infraestructura existente de Aerocivil.

La metodología se estructura en cuatro fases interdependientes como se observa en la figura 1:

Fase 1 - Análisis técnico de protocolos: Revisión y comparación de los campos de las categorías ASTERIX CAT021 (ADS-B), CAT034 (metadatos radar) y CAT048 (pistas radar), identificando sus características funcionales, limitaciones inherentes y los campos útiles para correlación cruzada. Esta fase cubre el fundamento técnico del método.

Fase 2 - Diseño de la arquitectura de integración por capas: Propuesta teórica de un flujo de datos en tres niveles (ingesta/normalización, fusión/correlación y validación/resiliencia) que articula los datos de sensores ADS-B, y radar, maximizando redundancia y capacidad de validación cruzada sin requerir modificaciones a la infraestructura existente.

Fase 3 - Análisis del contexto colombiano: Revisión del marco normativo vigente, la infraestructura de vigilancia nacional y las amenazas ciber-electrónicas específicas del espacio aéreo colombiano, para establecer los parámetros de aplicación de la metodología en el entorno nacional.

Fase 4 - Detección temprana de anomalías: Formulación de una metodología de detección de anomalías, aplicable de forma incremental sin dependencias tecnológicas externas.



Fig. 1. Metodologia de correlación propuesta

IV. RESULTADOS

Esta sección presenta el desarrollo detallado de cada una de las cuatro fases de la metodología, incluyendo el análisis técnico de protocolos, la arquitectura de integración, el marco normativo colombiano y la propuesta de detección de anomalías.

A. Fase 1: Análisis Técnico Comparativo de Protocolos ASTERIX

El sistema ADS-B opera en 1090 MHz utilizando el formato Extended Squitter (1090ES), con modulación PPM (Pulse Position Modulation). Los mensajes principales usan el formato de enlace descendente DF=17 para ADS-B Out, con una tasa de transmisión de aproximadamente dos mensajes por segundo (cada bit dura 0.5 microsegundos). Existe también el enlace UAT (978 MHz), utilizado principalmente en aviación general

en Estados Unidos [18]. Cada mensaje ASTERIX incluye identificadores de fuente (SAC/SIC de 8 bits cada uno) que permiten distinguir el sensor de origen en sistemas de fusión multisensor.

La Tabla I resume las características funcionales de las tres categorías ASTERIX de interés para la correlación multisensor [18], [19]. Las tablas II y III describen los ítems útiles por tipo de sensor.

TABLA I. ANÁLISIS COMPARATIVO DE CATEGORÍAS ASTERIX PARA CORRELACIÓN MULTISENSOR.

Característica	CAT021 (ADS-B)	CAT034(Radar Meta)	CAT048 (Radar Pista)
Fuente del Dato	Aeronave(cooperativa)	Sensor radar (metadatos)	Sensor radar (pistas/trazas)
Origen posición	GPS/GNSS - WGS-84	Posición geog. del sensor	Radar activo - Polar
Frec. actualización	~0.5-2 Hz (<=2 s)	1 mensaje /vuelta(~4-12 s)	1mensaje/vuelta (~4-12 s)
ID aeronave	ICAO 24 bits (I021/080)	No aplica	ICAO 24 bits (I048/220)
Posición	Lat/Lon WGS-84 (I021/130)	Posición sensor (I034)	Polar+Cart. (I048/040/042)
Altitud	FL baro + geom. (I021/145)	No aplica	FL Modo C (I048/090)
Velocidad	GS + Track (I021/160)	No aplica	Calculada (I048/200)
Métricas calidad	NACp,NACv,NIC,SIL (I021/090)	Estado sensor (I034/050)	No aplica
Autenticación	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Vulnerab. principal	Spoofing RF / GPS Spoofing	Falsificación metadatos	Reflectores pasivos

La Tabla II detalla los Data Ítems (DI) de los tres protocolos que intervienen directamente en el flujo de correlación, según las especificaciones oficiales de EUROCONTROL [18], [19].

TABLA II. DATA ÍTEMS ASTERIX EMPLEADOS EN LA CORRELACIÓN MULTISENSOR ADS-B.

Cat /Data Item	Nombre EUROCONTROL	Rol en la correlación	Operación
21/I021/010	Data Source Identifier	Identifica el sensor ADS-B origen	Filtrado por fuente
21/I021/040	Target Report Descriptor	IoC_06 (IPC=1), IoC_07 (CPR=1): fallos internos	IoC nivel A
21/I021/070	Mode 3/A Code	Comp. con CAT048 -> detección cambio no autorizado	Validación identidad
21/I021/071	Time of Applicability for Position	Marca temporal UTC; sincroniz. con 48/I048/140 (±1 s)	Sinc. temporal
21/I021/080	Target Address	CLAVE: 21/I021/080 = 48/I048/220 -> asociación multisensor	Asociación
21/I021/090	Quality Indicators	NACp, NACv, NIC, SIL: pondera confianza en C_comp	Ponderación
21/I021/130	Position WGS-84 (High Res.)	Posición ADS-B para ΔPos (ec. 1)	Cálculo ΔPos
21/I021/145	Flight Level	Altitud ADS-B para ΔAlt (ec. 2)	Cálculo ΔAlt
21/I021/160	Airborne Ground Vector	Velocidad ADS-B para ΔGS (ec. 3)	Cálculo ΔGS

TABLA III. DATA ÍTEMS ASTERIX EMPLEADOS EN LA CORRELACIÓN MULTISENSO RADAR.

Cat /Data Item	Nombre (EUROCONTROL)	Rol en la correlación	Operación
34/I034/030	Time of Day	Referencia temporal ciclo radar (North crossing)	Sinc. ciclo
48/I048/040	Measured Position (Polar)	Posición polar -> conversión a WGS-84	Conv. coordenadas
48/I048/042	Calculated Position (Cartesian)	Posición cart. radar -> calculo Delta-Pos	Cálculo ΔPos
48/I048/070	Mode 3/A Code	Comp. con 21/I021/070 -> detección cambio identidad	Validación identidad
48/I048/090	Flight Level	Altitud radar -> calculo Delta-Alt (ec. 2)	Cálculo ΔAlt
48/I048/140	Time of Day	Sincronización con 21/I021/071 (ADS-B). Dif <=±1s	Sinc. temporal
48/I048/200	Calculated Track Velocity	Velocidad radar -> calculo Delta-GS (ec. 3)	Cálculo ΔGS
48/I048/220	Aircraft Address	CLAVE: 48/I048/220 = 21/I021/080 -> asociación multisensor	Asociación
48/I048/230	Communications /ACAS/Flight Status	Valida si aeronave está en vuelo; filtra pistas en tierra	Filtrado estado

Basado en las similitudes y datos comunes es posible establecer un flujo de datos que facilite la automatización de la correlación de los datos extraídos de los protocolos.

B. Fase 2: Arquitectura de Integración por Capas y Flujo de Correlación

La arquitectura propuesta organiza el procesamiento en tres niveles. El Nivel 1 (Ingesta y Normalización Temporal) recibe simultáneamente desde la fuente, los flujos CAT021, CAT034 y CAT048; posterior, normaliza las marcas temporales a UTC y convierte coordenadas polares a WGS-84 usando la posición del sensor en CAT034.

El Nivel 2 (Fusión y Correlación) aplica el siguiente flujo de diez pasos para cada aeronave identificada por su ICAO 24 bits: (1) asociación por direccionamiento ICAO (funciona como matrícula electrónica única a nivel mundial);

(2) normalización temporal UTC ±1 s;

(3) conversión polar/cartesiana a WGS-84(datos CAT034);

(4) interpolación dato radar con marca temporal ADS-B;

(5-7) cálculo de las métricas ΔPos, ΔAlt y ΔGS;

(8) ponderación por métricas I021/090;

(9) generación del vector de discrepancia Delta; y

(10) clasificación del estado de alerta.

El último paso basado en [15] donde desarrollaron extrapolación cinemática análoga para los pasos 3-4.

El Nivel 3 (Validación y Resiliencia) se evalúa el estado esperado del nivel de señal reportado en el protocolo y evalúa la calidad del paquete buscando modos degradados o sin cobertura radar.

Las métricas de discrepancia y la función de confianza se componen el dato cinemático actual resultado de la suma promediada de los siguientes cálculos:

$$\Delta Pos(Nm) = \sqrt{(Lat_{ADS} - Lat_{Radar})^2 + (Lon_{ADS} - Lon_{Radar})^2} \quad (1)$$

$$\Delta Alt\ (ft) = |FL_{ADS} - FL_{Radar}| (2)$$

$$\Delta Gs\ (Kt) = |GS_{ADS} - GS_{Radar}| (3)$$

$$C_{Comp} = C_{Gps} + P_{Historial} + Consistencia_{ADS} (4)$$

donde C_{Comp} es la confianza compuesta ponderada por C_{Gps} (calidad GPS declarada), $P_{Historial}$ (Promedio del vector cinemático) P_{ADS} Promedio de los valores reportados por los indicadores I021/040 (IPC, CPR, LLC, SIM).

La clasificación del estado de alerta se define en tres niveles por las ecuaciones (5)–(7):

$$Flag = 0\ (Normal)\ \ si$$

$$\Delta Pos < 0.5\ NM \wedge \Delta Alt < 200\ ft \wedge \Delta GS < 30\ kt \quad (5)$$

$$Flag = 1\ (Sospechoso)\ \ si$$

$$0.5 \leq \Delta Pos < 1.5\ NM \vee 200 \leq \Delta Alt < 500\ ft \quad (6)$$

$$Flag = 2\ (Alerta)\ \ si$$

$$\Delta Pos \geq 1.5\ NM \vee \Delta Alt \geq 500\ ft \vee \Delta GS \geq 50\ kt \quad (7)$$

Los umbrales de las ecuaciones (5)-(7) toman como referencia los estándares RNP y los valores típicos de Zhang et al. [15] (0.1-0.3 NM en condiciones normales), estableciendo 0.5 NM como holgura conservadora. Sin embargo, parte del proceso de adaptación al escenario país puede incluir un ajuste fino de acuerdo a datos de calibración propios de los sensores internos de la Aerocivil.

Si CAT048 no está disponible, el sistema opera solo con CAT021 y la zona se marca como 'resiliencia reducida'.

La 'hoja de vida' por aeronave (proceso offline) acumula el historial de confiabilidad e historial de discrepancias, lo que permite detectar ataques FDIA graduales imperceptibles con comparación puntual [14], [20].

C. Fase 3: Contexto Colombiano - Marco Normativo e Infraestructura de Vigilancia

Colombia opera un sistema híbrido triple capa documentado por Flórez et al. [17] con: 10 radares primarios (PSR), 12 radares secundarios (SSR/Mode S) y más de 29 estaciones ADS-B terrestres, con centros de control de área (ACC) en Bogotá, Barranquilla, Medellín, San Andrés y Cali. El 85% de los aeropuertos operan con PBN, lo que implica una flota con ADS-B Out que genera datos correlacionables. En la actualidad para volar sobre 19500 pies es obligatorio el uso permanente de ADS-B y de acuerdo con el Reglamento Aeronáutico Colombiano (RAC) es obligatorio el uso de transpondedor encendido en todo momento del vuelo a cualquier altura.

El marco normativo colombiano de mayor relevancia para la metodología incluye los siguientes instrumentos:

TABLA III. MARCO NORMATIVO COLOMBIANO APLICABLE AL SISTEMA DE VIGILANCIA ADS-B Y RADAR.

Instrumento Normativo	Contenido relevante para la metodología
Anexo 10 OACI Vol. III (Telecomunicaciones) [25]	Define los estándares internacionales para ADS-B 1090ES: frecuencia 1090 MHz, formatos DF=17/18, tasas de transmisión, métricas de calidad (NIC, NACp, SIL) y requisitos de supervisión. Base de los parámetros de calidad usados en la ecuación (4).
AIGD OACI Ed. 15.0 (2022) [26]	Guía de implementación y operación de ADS-B: criterios de desempeño del sistema para servicio de separación ATC (System Performance Criteria), monitoreo de integridad, validación y procedimientos de falla. Define cómo deben integrarse ADS-B y radar en sistemas ATM.
Resolución 02217/2023 Aerocivil [27]	RAC 91: Obligatoriedad de ADS-B Out en aeronaves que operan en espacio aéreo controlado colombiano. Define los estándares de equipamiento mínimo y las altitudes de aplicación.
Resolución 00191/2025 Aerocivil [28]	RAC 211: Servicios de Tránsito Aéreo actualizados. Incluye procedimientos de vigilancia, separaciones mínimas y procedimientos de falla radar, que definen los umbrales operacionales de referencia para los niveles de alerta de la metodología.
PNACOL 2021 Aerocivil [29]	Plan Nacional de Navegación Aérea de Colombia. Hoja de ruta CNS/ATM con integración ADS-B en la arquitectura de vigilancia nacional y objetivos de modernización del sistema SINEA.
EAIP Colombia ENR 1.6	Procedimientos ATS de vigilancia: separaciones mínimas en ruta, procedimientos de falla de radar y condiciones de uso del ADS-B como fuente primaria. Las separaciones de 5 NM en ruta y 3 NM en terminal son referencias directas para los umbrales Delta-Pos propuestos.

Además de esto la entidad operacionalmente está dividida en regionales centralizadas en la secretaría de servicios a la navegación en lo que compete a la calibración y seguimiento del comportamiento de los sensores, ya que este es un procedimiento normal. Basado en los datos de esta calibración se podrían establecer métricas por zonas o por sensores con el fin de hacer más realista la metodología, lo que permitiría contrarrestar efectos como la edad del sensor, la calidad de la comunicación, daños locales entre otros.

Desde el punto de vista ciber-electrónico, Colombia enfrenta un contexto de amenaza creciente que exige fortalecer la vigilancia aérea con mecanismos de detección y recuperación de datos anómalos. Trabajos recientes como OCREN proponen, en el contexto del control de tránsito aéreo, combinar planes de

vuelo, datos ADS-B y modelos de aprendizaje para detectar y recuperar flujos anómalos asociados con ataques [30]. La normativa de Aerocivil ratifica la solidez de los procedimientos de seguridad operacional [31], pero aún no cuenta con contramedidas técnicas específicas para las vulnerabilidades del ADS-B. La Tabla IV presenta el mapa de amenazas específico para el espacio aéreo colombiano.

TABLA IV. MAPA DE AMENAZAS CIBER-ELECTRÓNICAS Y MITIGACIÓN CON LA METODOLOGÍA PROPUESTA.

Amenaza	Prob.	Impacto	Mitigación con metodología propuesta
GPS Spoofing sobre aeronave	Media	Crítico	ΔPos CAT021 vs CAT048 > umbral -> Flag >= 1 -> alerta [11], [8]
ADS-B Ghost Aircraft	Media-Alta	Alto	ICAO-24 en CAT021 sin pista CAT048 -> IoC_03 -> alerta [6]
Inhibicion GPS regional	Alta*	Alto	CAT048 como fuente principal automática; zona marcada [2]
Jamming canal 1090 MHz	Baja	Alto	Sistema opera con CAT048; zona marcada como resiliencia reducida [6]
FDIA gradual de posición	Baja	Muy Alto	Acumulación en hoja de vida offline -> detección de deriva [14], [20]
DDoS estación ADS-B	Baja-Media	Alto	Fallback a CAT048; alerta por pérdida de señal [8]
Manipulación Mode 3/A	Baja	Medio	Comparación I021/070 vs I048/070 -> IoC_04
Interferencia GNSS en zona cordi.	Media	Alto	Caso Rionegro: CAT048 como fuente de respaldo [8], [2]

En esta tabla el impacto es considerado de acuerdo al efecto sobre las operaciones aéreas de la consolidación de una amenaza en un sector.

D. Fase 4: Propuesta de Detección Temprana de Anomalías

La arquitectura de detección busca operar en niveles de sofisticación progresiva, implementables de forma incremental.

El diseño incorpora los principios propuestos por los estudiantes del semillero en cuanto a la estructura modular del sistema: capa de sensores, capa de fusión, capa de validación y sistema de alertas, integrados en el marco formal del protocolo ASTERIX. Todo esto a través de un flujo de datos que puede ser automatizado. En esta etapa del proyecto solo se ha diseñado hasta el primer nivel, ya que el diseño de otros niveles implica fases futuras con trabajo cooperativo con la Aerocivil.

Nivel A - Indicadores de Compromiso basados en reglas ASTERIX

Derivados directamente de los campos ASTERIX y la lógica de correlación. Se procesan de forma síncrona sin entrenamiento previo y constituyen la capa de mayor confiabilidad y menor costo. La Tabla V presenta el catálogo completo de IoC.

TABLA V. CATÁLOGO DE INDICADORES DE COMPROMISO (IOC) DERIVADOS DE CAMPOS ASTERIX.

ID	Descripción del IoC	Campos ASTERIX	Degradación detectada
IoC_01	ΔPos ADS-B vs. radar excede umbral Flag >= 1	I021/130 + I048/040/042	GPS/ADS-B Spoofing, FDIA
IoC_02	Degradación súbita NACp/NACv (caída >= 2 niveles)	I021/090/NACp, NACv	Interferencia GPS
IoC_03	ICAO-24 ADS-B sin pista SSR correspondiente	I048/220 ausente en CAT048	Ghost Aircraft
IoC_04	Cambio Mode 3/A no correlacionado con plan ATC	I021/070 / I048/070	Manipulación identidad
IoC_05	Salto posicional > V_max x Delta-t (cinemat. imposible)	I021/130 serie temporal	Message Injection, Replay
IoC_06	Indicador IPC (Interrogator Position Code) = 1	I021/040/IPC	Fallo validación ADS-B Out
IoC_07	Indicador CPR (Compact Position Reporting) = 1	I021/040/CPR	Codificación corrupta/forjada

En este nivel se evalúa basado en las reglas o indicadores de compromiso el nivel de riesgo para el sistema.
Cuanto el pipeline determina que una aeronave es marcada como Flag=1 se intensifica el monitoreo; y se informa a través de una interfase gráfica la anomalía detectada a personal técnico.

Ante Flag=2 se notifica al controlador, y a la autoridad aeronáutica competente y se recomienda privilegiar el dato radar. Con base en esto la autoridad puede programar inspecciones o realizar suspensiones administrativas o segregaciones en diferentes sectores de vuelo.

Si la degradación es mayor se integra en la observación otro tipo de correcciones basadas en medidas que dependen de la cinemática de la aeronave como correcciones por posición relativa del sensor y la aeronave, cálculo de rumbo, cálculo de velocidad verdadera y análisis del comportamiento del error medio, todo esto para generar un informe automatizado con la mayor cantidad de información posible para la revisión técnica de los sensores si fuera el caso de un error generalizado o la inspección de la aeronave. También se recomendaría una revisión detallada y de ser el caso la suspensión de la aeronavegabilidad de la aeronave hasta que se confirme que su aviónica está en condiciones

E. Discusión: Contribuciones, Limitaciones y Marco ETL

La formalización de la correlación ASTERIX para ciberseguridad es la contribución principal de este trabajo. A diferencia de los enfoques que requieren modificar el protocolo o agregar hardware criptográfico, la metodología propuesta

opera exclusivamente sobre datos que ya existen en los flujos ASTERIX en producción, lo que la hace directamente aplicable a la infraestructura actual de Aerocivil sin inversiones en equipamiento adicional [2], [26].

La Fig. 1 sintetiza el flujo completo de la metodología como un proceso ETL (Extract-Transform-Load) offline automatizado. La etapa Extract ingiere los flujos ASTERIX

CAT021, CAT048 y CAT034 directamente del sistema ATM de Aerocivil, que ya los produce en formato estandarizado.

La etapa Transformación, aplica la correlación multi-sensor, calcula el Delta-vector por par de registros asociados mediante el identificador ICAO de 24 bits (I021/080 = I048/220) y ejecuta los niveles de detección. La etapa Load persiste cada resultado en la hoja de vida de la aeronave correspondiente: un registro histórico indexado por la dirección ICAO de 24 bits que acumula, vuelo a vuelo, la serie temporal del comportamiento del error de correlación (Delta-vector) a lo largo del tiempo y en casos especiales calcos derivados que podrían incluirse como normales de acuerdo a solicitud de la autoridad aeronáutica.

Esta estructura de datos es el núcleo de la propuesta: permite detectar el FDIA gradual, que es invisible en un análisis instantáneo, pero se manifiesta como una tendencia de crecimiento sostenido del error cuando se analiza la serie histórica de la aeronave.

En una proyección futura, el corpus de hojas de vida acumuladas en la base de datos histórica podrá alimentar modelos de inteligencia artificial para la detección automática de patrones de ataque persistentes, la construcción de perfiles de confiabilidad por aeronave y ruta, y la anticipación de vulnerabilidades sistémicas en el espacio aéreo colombiano usando por ejemplo zonas de Voronoi [32].

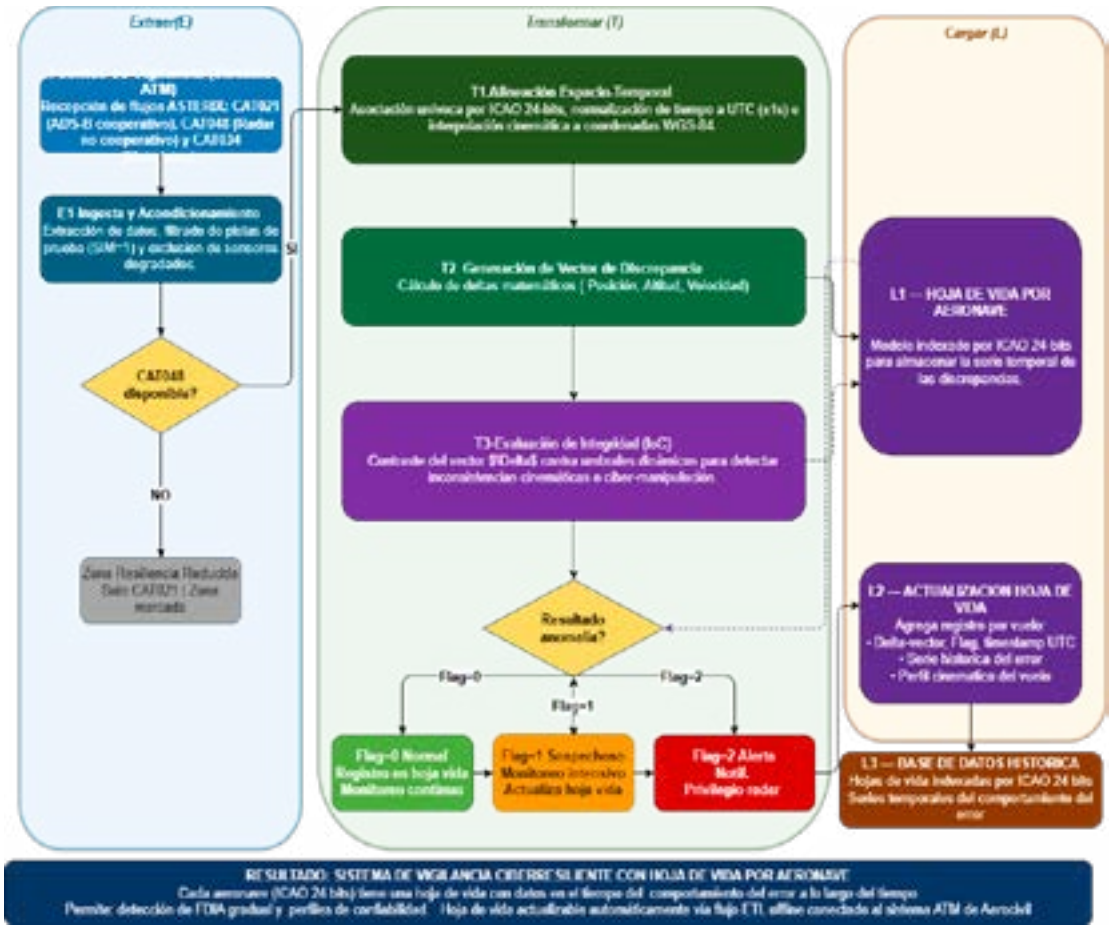


Fig. 2. Metodología multinivel, a través del flujo ETL offline, que extrae, transforma y carga datos ASTERIX

V. CONCLUSIONES

- El ADS-B como ha sido expuesto en este documento ofrece ventajas técnico - económicas para la gestión del espacio aéreo, sin embargo, presenta vulnerabilidades frente a ciberseguridad debido a su naturaleza cooperativa, por lo cual es recomendable integrar técnicas por parte de la autoridad aeronáutica para mejorar su resiliencia frente a posibles amenazas.

- En este documento se presenta un método para el fortalecimiento de la ciberresiliencia del sistema de vigilancia aeronáutica basada en ADS-B, el cual se ha implementado a partir de un análisis del Sistema de Vigilancia Aeronáutico Colombiano, la estructura de los protocolos de comunicaciones de datos radar, y la sinergia de la información entre varios tipos de sensores que sirven como sistema de verificación de la precisión de los datos del ADS-B, teniendo en cuenta las condiciones cinemáticas de las aeronaves a través del cálculo de un diferencial cinemático configurable de acuerdo a las condiciones del sistema. Con este método se pretende mitigar los riesgos potenciales antes de que se conviertan en una amenaza; para mantener la operatividad y mejorar la seguridad operacional apoyándose en datos registrados por los sistemas de vigilancia del país.
- El modelo de correlación sistemática de datos ASTERIX CAT021, CAT034 y CAT048 es una estrategia técnicamente viable para fortalecer la ciberresiliencia del sistema de vigilancia aeronáutica colombiano. La independencia tecnológica y el relacionamiento físico de la forma como operan los sensores ADS-B (GNSS) y radar mediante radiodetección activa, hace que integrar ambas fuentes sea exponencialmente más costoso para un atacante y aumenta la confiabilidad del sistema.
- La metodología planteada por ahora desarrolla un flujo de datos para ser procesado a través del flujo ETL fuera de línea, que extrae, transforma y carga datos ASTERIX y evalúa la información estableciendo correlaciones mediante la generación de vectores de discrepancia. Sin embargo, la lógica de la metodología permite su rápida adaptación para un sistema en tiempo real que podría ser adaptado por la autoridad aeronáutica para mejorar aún más su capacidad de ciberresiliencia.
- Este sistema propone la generación de hojas de vida por aeronave, la cual será almacenada en una base de datos histórica que permita procesos de análisis y actualización, que faciliten en el tiempo, estudiar comportamientos de errores e irregularidades relacionados con el sistema ATM y sean de apoyo fundamental para la toma de decisiones confiables, predictivas y oportuna. Con esta estrategia se busca fortalecer la capacidad de respuesta ante posibles ciberataques y mejorar la integridad de la vigilancia aérea en el espacio colombiano.
- La metodología integra un análisis del marco normativo para el sector aeronáutico, que proporciona la base regulatoria y los parámetros operacionales como obligatoriedad del uso de ADS-B y transponder, separaciones mínimas, y procedimientos de falla radar que permiten establecer los umbrales de detección dentro de los requerimientos aeronáuticos.
- La validación empírica de los umbrales con datos reales del espacio aéreo colombiano, basada en datos de calibración y mantenimiento, constituye una mejora importante en el umbral de detección de anomalías del sistema. Todo esto en el mediano plazo se convertirá en un conjunto de datos que alimentará sistemas inteligentes de detección y predicción de anomalías, lo que se convertiría en la principal línea de trabajo futuro.
- Las principales contribuciones de este trabajo se pueden resumir en: (i) el análisis de vulnerabilidades de ciberseguridad asociadas a entornos de vigilancia ADS-B, (ii) la propuesta de un enfoque orientado a la ciberresiliencia para sistemas aeronáuticos de vigilancia, (iii) la integración conceptual de técnicas de fusión y detección de anomalías para fortalecer la robustez operacional, y (iv) la identificación de líneas emergentes de investigación relacionadas con la detección de ataques mediante técnicas de aprendizaje automático en entornos de gestión del tránsito aéreo. Como trabajo futuro se plantea la validación experimental del enfoque propuesto utilizando datos ADS-B reales, escenarios de detección en tiempo real y simulaciones de ataques de spoofing e inyección de mensajes.

REFERENCIAS

[1] Aeronáutica Civil de Colombia (Aerocivil), Informe estadístico de transporte aéreo 2022-2025. Bogotá, Colombia: Aerocivil, 2025.

[2] J. A. Flórez Zuluaga, J. F. Vargas Bonilla, J. D. Ortega Pabón, and C. M. Suárez Ríos, "Radar Error Calculation and Correction System Based on ADS-B and Business Intelligence Tools," in Proc. 2018 Int. Carnahan Conf. Security Technol. (ICCST), Montreal, QC, Canada, Oct. 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/CCST.2018.8585728.

[3] International Civil Aviation Organization (ICAO), Global Air Navigation Plan 2016-2030, Doc 9750, 6th ed. Montreal, Canada: ICAO, 2019.

[4] B. S. Ali, W. Y. Ochieng, W. Schuster, A. Majumdar, and T. K. Chiew, "A safety assessment framework for the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) system," Safety Science, vol. 78, pp. 91-100, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.ssci.2015.04.015.

[5] M. Riahi Manesh and N. Kaabouch, "Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) protocol," International Journal of Critical Infrastructure Protection, vol. 19, pp. 16-31, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.ijcip.2017.10.002.

[6] M. R. Manesh, M. Mullins, K. Foerster, and N. Kaabouch, "A preliminary effort toward investigating the impacts of ADS-B message injection attack," in Proc. 2018 IEEE Aerospace Conf., Big Sky, MT, USA, Mar. 2018, pp. 1-9, doi: 10.1109/AERO.2018.8396628.

[7] L. Gómez, "Vigilancia dependiente automática (ADS-B) en Colombia," Ciencia y Poder Aéreo, vol. 10, pp. 21-32, 2015, doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.215.

[8] V. López, "Análisis de riesgos cibernéticos para sistemas ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast) durante operaciones aéreas," Tesis de Maestría en Ciberseguridad y Ciberdefensa, Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto", Bogotá, Colombia, Oct. 2025. [En línea]. Disponible: https://hdl.handle.net/20.500.14205/11731

[9] J. Baek, E. Hableel, Y.-J. Byon, D. S. Wong, K. Jang, and H. Yeo, "How to Protect ADS-B: Confidentiality Framework and Efficient Realization Based on Staged Identity-Based Encryption," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 18, no. 3, pp. 690-700, 2017, doi: 10.1109/TITS.2016.2586301.

[10] B. C. Burfeind, R. F. Mills, S. Nykl, J. A. Betances, and C. Sielski, "Confidential ADS-B: A Lightweight, Interoperable Approach," in Proc. 2019 IEEE Aerospace Conf., Big Sky, MT, USA, Mar. 2019, pp. 1-11, doi: 10.1109/AERO.2019.8742166.

[11] S. Rudys, J. Aleksandravicius, R. Aleksiejunas, A. Konovaltsev, C. Zhu, and L. Greda, "Physical layer protection for ADS-B against spoofing and jamming," International Journal of Critical Infrastructure Protection, vol. 38, p. 100555, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.ijcip.2022.100555.

[12] N. Çevik and S. Akleylek, "Anomaly detection system for ADS-B data: Attack vectors and machine learning models," Internet of Things, vol. 29, p. 101435, 2025, doi: 10.1016/j.iot.2024.101435.

[13] Md. A. Rahman, T. Bhuiyan, and M. A. Ali, "Enhancing aviation safety: Machine learning for real-time ADS-B injection detection through advanced data analysis," Alexandria Engineering Journal, vol. 126, pp. 262-276, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.aej.2025.04.045.

[14] M. Pirolley, R. Couturier, M. Salomon, and F. Ambert, "Machine learning techniques for detecting anomalies in ADS-B data in the context of low altitude aviation," Aerospace Science and Technology, vol. 168, p. 111199, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.ast.2025.111199.

[15] J. Zhang, W. Liu, and Y. Zhu, "Study of ADS-B Data Evaluation," Chinese Journal of Aeronautics, vol. 24, no. 4, pp. 461-468, 2011.

[16] T. Bagarić, Z. Rezo, T. Radišić, and S. Steiner, "Countering ADS-B Signal Spoofing by Time Difference of Arrival Multilateration Method," Transportation Research Procedia, vol. 91, pp. 67-74, 2025, doi: 10.1016/j.trpro.2025.10.010.

[17] J. A. Flórez Zuluaga, Sistema de fusión de datos aeronáuticos y meteorológicos para la prevención de accidentes aéreos. Medellín, Colombia: ITM, 2019, doi: 10.18667/9789585996168.

[18] EUROCONTROL, ASTERIX Category 021: ADS-B Target Reports, ed. 2.7. Brussels, Belgium: EUROCONTROL, 2021. [Online]. Available: https://www.eurocontrol.int/service/asterix

[19] EUROCONTROL, ASTERIX Category 048, Edition 1.32 and ASTERIX Category 034, Edition 1.29. Brussels, Belgium: EUROCONTROL, 2024. [Online]. Available: https://www.eurocontrol.int/service/asterix

[20] W. Ahmed, N. A. Bhatti, A. Masood, A. A. Alharbi, and S. Alotaibi, "Advancements in ADS-B Security: A Comprehensive Survey of Vulnerabilities, Mitigation Strategies, System Requirements, and Emerging Research Trends," Preprints.org, 2024, doi: 10.20944/preprints202405.0586.v1.

[21] P. Luo, B. Wang, and J. Tian, "TTSAD: TCN-Transformer-SVDD Model for Anomaly Detection in Air Traffic ADS-B Data," Computers & Security, vol. 141, p. 103840, 2024, doi: 10.1016/j.cose.2024.103840.

[22] L. Zhong, X. Liu, and Y. Zhang, "RDPA: Dual-domain deep learning for robust ADS-B spoofing detection via reversible normalization and spectral patch attention," Chinese Journal of Aeronautics, p. 104083, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.cja.2026.104083.

[23] D. Jeon, Y. Eun, and H. Kim, "Estimation fusion with radar and ADS-B for ATC," International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 13, no. 2, pp. 336-345, 2015.

[24] C.-Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges," Proceedings of the IEEE, vol. 91, no. 8, pp. 1247-1256, Aug. 2003, doi: 10.1109/JPROC.2003.814918.

[25] International Civil Aviation Organization (ICAO), Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Aeronautical Telecommunications, Vol. III: Communication Systems. Montreal, Canada: ICAO.

[26] ICAO Asia and Pacific Office, ADS-B Implementation and Operations Guidance Document (AIGD), ed. 15.0. Bangkok, Thailand: ICAO, 2022. [Online]. Available: https://www.icao.int/APAC/Pages/adsb.aspx

[27] Aeronáutica Civil de Colombia (Aerocivil), "Resolución 02217 de 2023: RAC 91 - Equipos ADS-B," Bogotá, Colombia: Aerocivil, 2023. [En línea]. Disponible: https://www.aerocivil.gov.co

[28] Aeronáutica Civil de Colombia (Aerocivil), "Resolución 00191 de 2025: RAC 211 - Servicios de Tránsito Aéreo," Bogotá, Colombia: Aerocivil, 2025. [En línea]. Disponible: https://www.aerocivil.gov.co

[29] Aeronáutica Civil de Colombia (Aerocivil), Plan Nacional de Navegación Aérea de Colombia (PNACOL). Bogotá, Colombia: Aerocivil, 2021. [En línea]. Disponible: https://www.aerocivil.gov.co

[30] M. Yue, S. Shi, T. Gao, and Z. Wu, "OCREN: A countermeasure for ADS-B attacks in the context of air traffic control," Expert Systems with Applications, vol. 304, p. 130781, 2026, doi: 10.1016/j.eswa.2025.130781.

[31] Aeronáutica Civil de Colombia (Aerocivil), "Aeronáutica Civil ratifica solidez de seguridad operacional," 2026. [En línea]. Disponible: https://www.aerocivil.gov.co. Consultado: mayo de 2026.

[32] J. D. Ortega, J. A. Flórez, M. Hernández, and J. Escobar, "Trajectory Validation for Decision Making in Air Traffic Management Using Voronoi Diagram," Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, vol. 12, no. 4, pp. 2035-2050, 2022. [Online]. Available: https://www.webology.org/abstract.php?id=4512

Implementación de un entorno terapéutico interactivo como apoyo complementario en salud mental bajo el enfoque CDIO

Sergio David Santa Carvajal
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindio
Armenia , Colombia
sergiod.santac@uqvirtual.edu.co

Jorge Alejandro Aldana Gutiérrez
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindio
Armenia, Colombia
jaldana@uniquindio.edu.co

Jairo Henao Hernández
Programa de Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindio
Armenia, Quindio, Colombia
Jairo.henaoh@uqvirtual.edu.co

***Resumen*—Esta ponencia presenta la evolución del proyecto RECONEXÓN, desarrollado inicialmente en el espacio académico Proyecto CDIO III y consolidado como trabajo de grado en Ingeniería Electrónica de la Universidad del Quindío. La propuesta surge a partir de una necesidad identificada en la Fundación Covida (Armenia, Quindío), relacionada con la disponibilidad de herramientas accesibles que complementen los procesos terapéuticos en personas con ansiedad y depresión. En este contexto, se diseñó e implementó un entorno terapéutico interactivo de bajo costo, orientado a la estimulación sensorial controlada, la operación guiada por el terapeuta y el registro básico de sesiones. Es importante destacar que el sistema no pretende reemplazar procesos clínicos ni constituirse en herramienta diagnóstica o terapéutica autónoma, sino funcionar como apoyo complementario dentro de estrategias de intervención en salud mental. El desarrollo se estructuró bajo el enfoque CDIO, abarcando la definición de requisitos, diseño del sistema, integración hardware-software, implementación y validación operativa. Como resultados, se logró la transición desde un prototipo académico hacia una solución funcional con aplicación en contexto real, evidenciando estabilidad operativa, facilidad de uso y aceptación por parte de los usuarios. Asimismo, se consolidó un proceso formativo alineado con CDIO que fortalece la articulación entre el aprendizaje en ingeniería y la solución de problemáticas sociales reales.**

Palabras clave— CDIO, salud mental, sistema embebido, interfaz gráfica, estimulación sensorial, innovación educativa

I. Introducción

El enfoque CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar y Operar) ha transformado la educación en ingeniería al integrar el desarrollo de competencias técnicas con la solución de problemáticas reales en contextos auténticos [7]. En paralelo, la salud mental se ha consolidado como un desafío global, especialmente en contextos donde el acceso a herramientas de apoyo terapéutico es limitado [1]. A pesar de ello, siguen existiendo brechas importantes en la respuesta institucional, especialmente en escenarios donde los recursos son limitados y se requieren apoyos complementarios que fortalezcan la atención [2], [3].

En ese contexto, las intervenciones basadas en modulación sensorial han empezado a ocupar un lugar relevante dentro de algunos procesos terapéuticos, ya que pueden aportar a la regulación emocional y fisiológica de personas con afecciones de salud mental [4]. También se ha documentado su uso en entornos psiquiátricos y de cuidado como una estrategia que puede integrarse de manera útil a la práctica clínica y terapéutica cuando se ajusta a las condiciones del contexto [5], [6].

A partir de esa necesidad se plantea RECONEXÓN – Habitación de la Calma, una propuesta orientada a la Fundación Covida, concebida como un entorno terapéutico interactivo que integra estimulación sensorial, control audiovisual y registro básico de sesiones. El sistema fue pensado como una herramienta de apoyo para el personal terapéutico, con una operación clara y una implementación acorde con las condiciones reales de la institución. Bajo la lógica del enfoque CDIO, este artículo presenta el proceso de desarrollo del sistema, la estructura de su diseño y los resultados obtenidos en su implementación inicial.

II. Justificación

Las instituciones que trabajan en salud mental suelen enfrentarse a limitaciones de infraestructura, presupuesto y disponibilidad de herramientas especializadas. Esa situación hace necesario pensar en alternativas que puedan complementar los procesos de atención sin depender de soluciones costosas o difíciles de implementar [2], [3].

RECONEXIÓN responde a esa necesidad mediante una propuesta que combina estimulación sensorial controlada, operación sencilla y apoyo a la gestión de sesiones. Su propósito no es sustituir la intervención profesional, sino ofrecer una herramienta que amplíe las posibilidades de trabajo dentro de la institución y que pueda integrarse de manera natural a su dinámica cotidiana. La literatura reciente sobre modulación sensorial en salud mental respalda la pertinencia de este tipo de apoyos cuando se orientan al bienestar, la regulación y la adaptación al entorno terapéutico [4], [6].

El proyecto también tiene valor en el plano formativo. Su desarrollo exigió trabajar con una necesidad concreta, usuarios reales y restricciones propias del contexto, lo que permitió tomar decisiones de diseño con un sentido más claro de utilidad y pertinencia.

III. Objetivo General

Diseñar e implementar RECONEXIÓN – Habitación de la Calma, un entorno terapéutico interactivo con control audiovisual y registro básico de sesiones, como apoyo complementario a los procesos de atención en salud mental de la Fundación Covida.

A. Objetivos especificos

- Identificar las necesidades y requerimientos del sistema a partir del contexto de la Fundación Covida.
- Diseñar una arquitectura que integre interfaz gráfica, sistema de control y registro de sesiones.
- Implementar un prototipo funcional que permita configurar y ejecutar sesiones de estimulación sensorial.
- Realizar pruebas de funcionamiento, integración y usabilidad del sistema.
- Validar la propuesta en el entorno institucional y documentar su operación.

IV. Alcance y Delimitación

A. Alcance

El proyecto comprende el diseño, construcción e integración de un entorno terapéutico interactivo compuesto por una interfaz de usuario, un sistema de control para los elementos sensoriales y un registro básico de las sesiones. Incluye además pruebas funcionales, documentación técnica y una validación inicial en la Fundación Covida.

B. Delimitación

La propuesta corresponde a un prototipo funcional de apoyo terapéutico y no a un dispositivo médico certificado. Su alcance se concentra en la operación y acompañamiento de las sesiones, no en el manejo de historias clínicas ni en procesos diagnósticos. Del mismo modo, el diseño responde a las condiciones y necesidades de una institución específica, por lo que su implementación en otros espacios requeriría ajustes.

C. Criterios de aceptación

El sistema se considera satisfactorio si permite operar sesiones de manera estable, controlar los estímulos previstos, ofrecer una interacción clara al usuario y registrar la información básica asociada a cada sesión.

V. Metodología

El desarrollo del proyecto se estructuró bajo el enfoque CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar y Operar), operacionalizado mediante cinco fases que articulan la identificación de la necesidad, el diseño del sistema, su implementación y su validación en contexto real [7]. Las pruebas funcionales siguieron lineamientos del estándar ISO/IEC/IEEE 29119 y las pruebas de usabilidad se evaluaron conforme a la norma ISO 9241-11, considerando criterios de efectividad, eficiencia y satisfacción del usuario.

La figura 1 sintetiza gráficamente las cinco fases del proceso de desarrollo bajo el enfoque CDIO, ilustrando la progresión cíclica desde la concepción del sistema hasta su operación y entrega en contexto real.

Fuente: elaboración con acompañamiento de inteligencia artificial.



Fig. 2. *Configuración de inicio terapia.*

Fase 1: Concepción y definición de requisitos: Se realizó una revisión bibliográfica sobre entornos terapéuticos y estimulación sensorial, y se llevaron a cabo reuniones con el personal terapéutico de la Fundación Covida para caracterizar necesidades, perfiles de usuario y dinámicas operativas. A partir de este acercamiento se definieron los requisitos funcionales y no funcionales del sistema, así como los criterios de aceptación que guiarían la validación final.

Fase 2: Diseño de arquitectura y especificaciones: Se diseñó la arquitectura general del sistema, definiendo la interacción entre componentes (interfaz, controlador y actuadores). Se especificó la interfaz gráfica en Python, el sistema de control electrónico basado en Arduino Uno con tiras LED WS2812B, el protocolo de comunicación serial y la estructura de datos para el registro de sesiones. Se elaboraron además diagramas de bloques y de flujo que documentan la lógica de operación del sistema.

Fase 3: Implementación hardware y software: Se llevó a cabo el montaje del sistema de control, incluyendo las tiras LED WS2812B y la programación del firmware en Arduino para la interpretación de comandos seriales. En paralelo, se codificó la interfaz gráfica en Python con funcionalidades de configuración de sesiones, control de ejecución, visualización de estado y registro de información. Se depuró el enlace serial entre la interfaz y el controlador y se realizaron pruebas unitarias previas a la integración completa.

Fases 4 y 5: Integración, pruebas y validación operativa: Se integró el sistema completo en un entorno de pruebas controlado, verificando funcionalidad, estabilidad y usabilidad. Posteriormente se realizó la validación en sitio con personal

terapéutico autorizado, verificando el cumplimiento de los criterios de aceptación. Se entregó documentación técnica y manual de usuario, y se capacitó al personal de la Fundación Covida para el uso autónomo del sistema.

VI. Resultados

A. *Resultados del sistema*

Los resultados obtenidos evidencian la evolución del proyecto desde un prototipo académico hacia una solución funcional con aplicación en contexto real. Se logró implementar un sistema capaz de ejecutar estímulos sensoriales controlados, configurables mediante una interfaz gráfica, permitiendo la interacción guiada por el terapeuta. Durante las pruebas realizadas, el sistema mostró estabilidad operativa sin fallos críticos en la integración de los subsistemas, y el personal terapéutico valoró positivamente la herramienta como apoyo complementario dentro de los procesos de atención.

La Figura 2 presenta la interfaz gráfica del sistema RECONEXÓN en diferentes etapas de interacción: (a) pantalla principal, (b) configuración de sesión y (c) ejecución de terapia. Esta interfaz fue diseñada bajo criterios de simplicidad y accesibilidad, facilitando su uso por parte de usuarios no técnicos en el entorno de la Fundación Covida.



Fig. 2. *Pantalla de inicio.*

La fig 3. Muestra una interfaz de usuario para un "Programa Terapéutico", que ofrece tres opciones principales: Terapia Inicial, para comenzar una nueva terapia; Terapia de Seguimiento, para revisar el progreso de terapias anteriores; y Base de Datos, que permite acceder a información relacionada con las terapias o pacientes. Además, incluye un botón Volver para regresar a la pantalla anterior. Esta configuración está diseñada para facilitar la navegación del usuario en el sistema.



Fig. 3. *Configuración de inicio terapia.*

La fig 4. Se puede observar interfaz de Inicio de Terapia del programa "Reconexión" muestra un Plan Recomendado con actividades y módulos sugeridos, junto a Playlists Terapéuticas como "Healing From Depression" y "Mental Health & Depression". Incluye botones para Iniciar Terapia y Nueva Evaluación, facilitando el acceso al plan y la música terapéutica.



Fig. 4. *Inicio de terapia.*

Con el fin de respaldar los resultados obtenidos, se definieron indicadores de evaluación asociados a la funcionalidad, usabilidad, estabilidad e impacto formativo del sistema. La Tabla 1 presenta los principales resultados cuantificados, obtenidos a partir de pruebas técnicas, observación directa y evaluación con usuarios de la Fundación Covida.

Tabla 1. Evaluación de resultados del sistema RECONEXÓN

Dimensión evaluada	Indicador	Método de evaluación	Resultado obtenido	Fuente
Funcionalidad	Cumplimiento de requisitos	Lista de chequeo funcional	**95%**	Pruebas técnicas
Estabilidad operativa	Fallos durante operación continua	Prueba de ejecución prolongada	**0 fallos críticos**	Pruebas de integración

Usabilidad	Facilidad de uso	Evaluación con usuarios (ISO 9241-11)	**4.5 / 5.0**	Personal Fundación Covida
Eficiencia	Tiempo de configuración de sesión	Medición directa en pruebas controladas	**< 2 minutos**	Pruebas controladas
Claridad de interfaz	Interacción de usuario	Observación y retroalimentación directa	**4.6 / 5.0**	Usuarios no técnicos
Aceptación	Percepción como herramienta de apoyo	Encuesta cualitativa (escala Likert)	**4.7 / 5.0**	Personal terapéutico
Integración tecnológica	Comunicación hardware-software	Pruebas de comunicación serial	**98% éxito**	Validación técnica
Formación CDIO	Desarrollo de competencias	Rúbrica de evaluación académica	**4.5 / 5.0**	Evaluación docente

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la Tabla 1, el sistema alcanzó un 95% de cumplimiento de requisitos funcionales, cero fallos críticos durante las pruebas de operación continua y un 98% de éxito en la comunicación hardware-software. En términos de experiencia de usuario, la interfaz fue calificada con 4.6/5.0 en claridad, y el personal terapéutico otorgó una puntuación de 4.7/5.0 al percibir la herramienta como apoyo complementario útil dentro de sus procesos de atención, lo cual es consistente con enfoques de diseño centrado en el usuario [4], [5].

B. Desempeño técnico

Adicionalmente, se realizó una evaluación técnica detallada del sistema que incorporó métricas de desempeño asociadas a tiempos de respuesta, consumo de recursos y escalabilidad de la base de datos. La Tabla 2 presenta los resultados más representativos obtenidos en esta evaluación.

Tabla 2. Desempeño técnico del sistema RECONEXIÓN

Categoría	Operación / elemento	Valor esperado	Valor medido
Tiempos de respuesta	aplicación	< 3 s	**2.1 s**
Tiempos de respuesta	Generación de plan terapéutico	< 2 s	**0.8 s**
Consumo de recursos	CPU total del sistema	---	**12% promedio / 18% máximo**
Consumo de recursos	Memoria total del sistema	---	**158 MB promedio / 195 MB máximo**
Escalabilidad BD	Búsqueda con 100 registros	< 500 ms	**120 ms**
Escalabilidad BD	Búsqueda con 1,000 registros	< 1 s	**450 ms**

Fuente: elaboración propia

Los datos de la Tabla 2 confirman que el sistema opera de forma eficiente dentro de equipos de gama media. Los tiempos de respuesta estuvieron por debajo de los umbrales establecidos en todas las operaciones críticas, el consumo promedio de CPU se mantuvo en 12% y la memoria en 158 MB. El análisis de escalabilidad de la base de datos muestra tiempos de búsqueda inferiores a 500 ms para volúmenes de hasta 100 registros, lo que valida su aplicabilidad en escenarios reales con múltiples sesiones registradas.

C. Análisis del proceso formativo

En el plano formativo, la implementación del enfoque CDIO favoreció procesos de aprendizaje más profundos al situar al estudiante en un entorno donde las decisiones de diseño tienen implicaciones reales. El desarrollo del sistema fortaleció competencias en programación, integración hardware-software, diseño de interfaces, trabajo interdisciplinar y documentación técnica. La interacción con una problemática concreta como la salud mental introdujo variables adicionales relacionadas con el usuario final, el entorno de aplicación y las restricciones del sistema, lo que obligó a adoptar un enfoque integral en el desarrollo de soluciones [7].

VII. Discusión

Los resultados confirman que el sistema RECONEXIÓN es una herramienta viable para el acompañamiento terapéutico. El cumplimiento funcional del 95%, junto a una comunicación hardware-software del 98% y la ausencia de fallos críticos, demuestra que la arquitectura técnica se adapta con precisión a las necesidades de operación. Estas métricas cumplen con los requisitos iniciales pactados con la Fundación Covida, validando la solidez del diseño.

El éxito del proyecto radica en la integración del control sensorial y el registro de datos en una plataforma sencilla, demostrando que la efectividad no depende de una complejidad tecnológica excesiva. Las altas puntuaciones en usabilidad (4.5/5.0) y aceptación (4.7/5.0) por parte de los terapeutas confirman que la interfaz es intuitiva y útil en la práctica clínica. Este resultado coincide con estudios previos que resaltan la estimulación sensorial como un factor determinante en la regulación emocional.

Por otro lado, el desarrollo bajo este enfoque subraya el valor de la ingeniería aplicada a problemas humanos reales. El uso de tecnologías accesibles como Arduino y Python permitió superar limitaciones presupuestarias sin sacrificar la funcionalidad, cumpliendo con el estándar CDIO de formar profesionales capaces de implementar soluciones en contextos reales. Finalmente, el sistema queda abierto a mejoras y escalabilidad, estableciendo una base sólida para futuras investigaciones y proyectos de innovación tecnológica en la Universidad del Quindío.

VIII. CONCLUSIONES

El sistema RECONEXIÓN: Habitación de la Calma se ha consolidado como una herramienta de apoyo efectiva para el tratamiento de la salud mental en la Fundación Covida. Al integrar control sensorial, una operación simplificada y el registro de sesiones, el proyecto logró resultados contundentes: un 95% de cumplimiento funcional, ausencia de fallos críticos y una aceptación de 4.7/5.0 por parte de los terapeutas. Estas métricas validan que la propuesta es técnicamente robusta y capaz de adaptarse con éxito a las exigencias de un entorno clínico real.

La viabilidad de esta solución técnica se basa en una arquitectura modular que combina Python, Arduino y SQLite, logrando un rendimiento eficiente en tiempo real sin exigir hardware de alta gama. Este diseño demuestra que la ingeniería alcanza su mayor impacto cuando utiliza recursos accesibles para resolver problemas humanos específicos, priorizando la estabilidad y la facilidad de uso. De esta forma, el sistema trasciende el concepto de prototipo para convertirse en una tecnología útil que no requiere conocimientos técnicos avanzados para su operación diaria.

Más allá del desarrollo técnico, este proyecto fortaleció competencias clave en integración de sistemas y toma de decisiones mediante la aplicación de la metodología CDIO. Al mantener una trazabilidad clara entre el problema y la solución validada, se otorgó al trabajo un valor académico y social que va más allá de un prototipo funcional. Este resultado refleja la capacidad de la Universidad del Quindío para generar innovaciones tecnológicas con un enfoque profundamente humano

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundación Covida por su disposición y acompañamiento durante el desarrollo del proyecto. De igual manera, expresan su agradecimiento a la Universidad del Quindío y al Programa de Ingeniería Electrónica por el respaldo académico brindado. Asimismo, reconocen el apoyo de los compañeros que participaron en etapas previas del proceso y contribuyeron al desarrollo inicial de la propuesta. Los autores también agradecen a Juan Mahecha, Freider Suarez, Miguel Vargas y Cristian Guerra por su participación y apoyo en fases previas del proyecto.

REFERENCES

[1] World Health Organization, “Salud mental.” [En línea]. Disponible en: https://www.who.int/es/health-topics/mental-health. [Accedido: 19-abr-2026].

[2] World Health Organization, “Mental health: strengthening our response.” [En línea]. Disponible en: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mental-health-strengthening-our-response. [Accedido: 19-abr-2026].

[3] World Health Organization, Informe mundial sobre salud mental: Transformar la salud mental para todos. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.who.int/es/publications/i/item/9789240050860. [Accedido: 19-abr-2026].

[4] N. R. Kandlur, A. C. Fernandes, S. R. Gerard, S. Rajiv, and S. Quadros, “Sensory modulation interventions for adults with mental illness: A scoping review,” Hong Kong Journal of Occupational Therapy, vol. 36, no. 2, pp. 57-68, 2023, doi: 10.1177/15691861231204896. PDF: 10.1177_15691861231204896.pdf

[5] T. Machingura, D. Shum, C. Lloyd, K. Murphy, E. Rathbone, and H. Green, “Effectiveness of sensory modulation for people with schizophrenia: A multisite quantitative prospective cohort study,” Australian Occupational Therapy Journal, vol. 69, no. 4, pp. 424-435, 2022, doi: 10.1111/1440-1630.12803. PDF: AOT-69-424.pdf

[6] L. Wright, P. Meredith, and S. Bennett, “Sensory approaches in psychiatric units: Patterns and influences of use in one Australian health region,” Australian Occupational Therapy Journal, vol. 69, no. 5, pp. 559-573, 2022, doi: 10.1111/1440-1630.12813. PDF: AOT-69-559.pdf

[7] Worldwide CDIO Initiative, “CDIO Standards 3.0.” [En línea]. Disponible en: https://www.cdio.org/content/cdio-standards-30. [Accedido: 19-abr-2026].

Sistema de monitorización postural en tiempo real y gestión de productividad basado en visión artificial para trabajadores remotos y estudiantes

Caleb Josué Jaramillo Rendón. Semillero de Investigación Semillero de Investigación TECSIS. Grupo de Investigación ReNuevaTe Ciencia, Tecnología e Innovación; Facultad de Inteligencia Artificial e Ingeniería. Universidad de Caldas. Manizales, Colombia.
caleb.jaramillo57311@ucaldas.edu.co

Rubén Darío Cárdenas Espinosa. Grupo de Investigación ReNuevaTe Ciencia, Tecnología e Innovación. Semillero de Investigación TECSIS. Facultad de Inteligencia Artificial e Ingenierías. Universidad de Caldas. Manizales, Colombia.
ruben.cardenas@ucaldas.edu.co. ORCID http://orcid.org/0000-0002-2417-844X

***Resumen*: La proliferación del teletrabajo y la educación virtual ha generado un aumento significativo de problemas de salud musculoesquelética relacionados con posturas prolongadas frente a pantallas. Este artículo describe el desarrollo y la evaluación de ERGO, una aplicación de escritorio multiplataforma que integra la monitorización postural en tiempo real mediante visión por ordenador con herramientas de gestión de productividad. A diferencia de las soluciones convencionales que dependen de la infraestructura en la nube, ERGO implementa un enfoque de edge computing, ejecutando todo el procesamiento localmente para garantizar la privacidad biométrica del usuario. El sistema utiliza el modelo MoveNet Lightning para la extracción de puntos de referencia anatómicos, complementado por una metodología de normalización basada en la distancia entre hombros que garantiza la robustez frente a variaciones en la posición del usuario. La arquitectura combina una interfaz desarrollada en Flutter con un motor nativo de C# compilado usando .NET 9 Native AOT, optimizando el consumo de recursos computacionales. Los resultados experimentales muestran que la aplicación mantiene un consumo de memoria inferior a 212 MB y una carga de CPU inferior al 1%, lo que representa una reducción de más del 80% en comparación con alternativas comerciales. El sistema está emergiendo como una alternativa viable para la prevención de riesgos ergonómicos en entornos laborales y académicos que operan con recursos limitados de hardware.**

Palabras clave: monitorización postural, visión por ordenador, edge computing, ergonomía, productividad, salud laboral

I. Introducción

La transformación digital de los entornos laborales y educativos ha cambiado sustancialmente las condiciones en las que las personas realizan sus actividades diarias [1]. La adopción masiva del trabajo remoto y de modalidades de educación virtual ha traído consigo beneficios evidentes en términos de flexibilidad geográfica y temporal, acceso democratizado a oportunidades y reducción de costes operativos [2]. Sin embargo, esta transición también ha generado consecuencias no deseadas en el ámbito de la salud laboral que merecen una atención específica [3].

El tiempo medio que profesionales y estudiantes pasan frente a pantallas de ordenador ha aumentado considerablemente, y con ello, la incidencia de trastornos musculoesqueléticos relacionados con posturas estáticas prolongadas [4]. Varios estudios realizados en el contexto latinoamericano han documentado una alta prevalencia de molestias cervical, dorsales y lumbares entre trabajadores remotos y estudiantes de educación superior [5]. Según el Consejo de Seguridad de Colombia, los trastornos musculoesqueléticos representan la mayoría de las enfermedades profesionales diagnosticadas en el país, evidenciando un problema que trasciende fronteras individuales hasta convertirse en un desafío de salud pública [6].

Las competencias digitales en contextos educativos han evolucionado hacia marcos integradores que reconocen la importancia de desarrollar habilidades estratégicas para el uso crítico y ético de la tecnología [7]. Investigaciones recientes muestran que los estudiantes valoran positivamente las herramientas tecnológicas que incorporan funcionalidades integrales de bienestar [8]. Sin embargo, el mercado ofrece una variedad de aplicaciones orientadas al bienestar digital que presentan limitaciones estructurales: fragmentación del ecosistema donde la postura, la productividad y el descanso se tratan como dominios separados, arquitecturas computacionales intensivas que requieren recursos significativos, y dependencia de modelos basados en la nube que plantean cuestiones de privacidad [9].

Este artículo describe ERGO, un sistema de escritorio multiplataforma que aborda estas limitaciones mediante un enfoque integrador [10]. La arquitectura combina monitorización postural en tiempo real, análisis ergonómico local y herramientas de productividad dentro de un entorno unificado que opera mediante computación en el borde [11]. El diseño prioriza la privacidad biométrica mediante procesamiento completamente local, la eficiencia

computacional mediante compilación nativa de alto rendimiento y la accesibilidad mediante la compatibilidad con hardware convencional sin aceleración gráfica dedicada [12].

II. Marco Teórico y Estado del Arte

La intersección entre tecnología, bienestar digital y ergonomía computacional ha recibido cada vez más atención en la literatura científica en los últimos años [13]. Estudios sobre competencias digitales en contextos educativos latinoamericanos han demostrado que la integración de herramientas tecnológicas en los procesos formativos no solo debe orientarse al desarrollo de habilidades técnicas, sino también a la promoción de prácticas saludables en el uso de la tecnología [14]. Investigaciones realizadas en instituciones de educación superior en Colombia y México han documentado que los estudiantes perciben beneficios significativos cuando las herramientas digitales incorporan funcionalidades que trascienden el propósito técnico específico [15].

En el campo de la inteligencia artificial aplicada a la educación, marcos teóricos contemporáneos como el HeDiCom Framework y los modelos de competencia digital propuestos por organizaciones internacionales reconocen la importancia de desarrollar no solo habilidades operativas y técnicas, sino también competencias estratégicas que permitan al individuo utilizar la tecnología de forma crítica, ética y sostenible [16]. El Marco de Alfabetización en IA propuesto por Ng et al. y las Directrices de la UNESCO para Competencias en IA establecen marcos para la formación en tecnologías emergentes [17]. Estos marcos conceptuales sugieren que las intervenciones tecnológicas efectivas deben tener en cuenta el contexto de uso, las necesidades específicas del usuario y los objetivos de aprendizaje o productividad perseguidos [18].

En cuanto a las aplicaciones de visión por ordenador en contextos de salud y bienestar, la literatura técnica documenta avances significativos en la detección de hitos corporales utilizando modelos de aprendizaje profundo optimizados para funcionar en dispositivos de capacidad limitada [19]. El modelo MoveNet, desarrollado originalmente para aplicaciones móviles, ha demostrado una precisión aceptable en la identificación de hitos del cuerpo con costes computacionales significativamente menores que las arquitecturas alternativas [20]. Estos desarrollos han permitido la implementación de sistemas de análisis postural en entornos donde tradicionalmente habrían sido necesarias infraestructuras de procesamiento pesado o servicios en la nube [21].

Una revisión de la literatura también revela lagunas importantes [22]. Por un lado, hay escasez de soluciones que integren de forma coherente la monitorización postural con herramientas de gestión del tiempo y la productividad. Por otro lado, pocas aplicaciones priorizan la privacidad biométrica a través de arquitecturas de computación en el borde [23]. Además, estudios de validación de instrumentos en contextos latinoamericanos han demostrado la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas que respondan a las características específicas de los usuarios en la región [24]. El desarrollo de herramientas pedagógicas innovadoras para la formación en habilidades digitales requiere enfoques metodológicos rigurosos que integren tecnologías emergentes con estrategias pedagógicas eficaces [25].

III. Arquitectura del Sistema

ERGO está concebido como un sistema de escritorio multiplataforma estructurado en dos capas principales que encapsulan responsabilidades diferenciadas: una capa de presentación y productividad, y un motor nativo de inferencia para análisis postural [26]. Esta separación arquitectónica responde a criterios técnicos y de diseño que favorecen la mantenibilidad, reducen el acoplamiento entre la lógica de interfaz y la analítica, y permiten optimizar el rendimiento en escenarios de uso continuo [27].

La capa de presentación es la interfaz a través de la cual el usuario interactúa con el sistema [28]. Esta capa ha sido desarrollada utilizando Flutter, un marco multiplataforma que permite la creación de interfaces gráficas nativas para diferentes sistemas operativos a partir de una única base de código [29]. La elección de Flutter responde a la necesidad de garantizar compatibilidad multiplataforma, consistencia visual y un rendimiento gráfico aceptable en ordenadores de diversas capacidades. Dentro de esta capa, se integran las funcionalidades de gestión de tareas, el tiempo tipo Pomodoro, la persistencia local de información histórica mediante SQLite cifrado y la visualización de la retroalimentación postural [30].

El motor de inferencia nativo constituye el núcleo de procesamiento del sistema, implementando los algoritmos de visión por ordenador y evaluación geométrica necesarios para el análisis postural [31]. Este componente ha sido desarrollado en C# y se compila utilizando .NET 9 Native AOT (Ahead-of-Time), una tecnología que elimina la sobrecarga asociada al tiempo de ejecución y permite la generación de ejecutables nativos optimizados para el hardware objetivo específico [32]. La comunicación entre la capa de presentación y el motor de inferencia se realiza mediante la Interfaz de Función Extranjera (FFI), un mecanismo que permite llamadas directas entre código gestionado y no gestionado con una latencia mínima [33].

La arquitectura se basa en principios de la computación en el borde, un paradigma que propone ejecutar el procesamiento lo más cerca posible del punto de generación de datos [34]. Este enfoque contrasta con las arquitecturas tradicionales basadas en la nube, donde los datos biométricos deben transmitirse a servidores remotos para su procesamiento [35]. La computación en el borde ofrece ventajas significativas en términos de privacidad, latencia, disponibilidad y eficiencia energética, atributos especialmente relevantes para aplicaciones de bienestar digital [36].



Fig. 1. Arquitectura del Sistema ERGO

La arquitectura de ERGO comprende dos capas principales: la capa de presentación desarrollada en Flutter y el motor de inferencia nativo en C# con .NET 9 Native AOT, comunicado mediante FFI.

IV. Metodología de Análisis Postural

La metodología implementada en ERGO para el análisis postural se basa en cinco etapas secuenciales: extracción de puntos de referencia anatómicos, normalización geométrica, evaluación de indicadores posturales, validación de proximidad y muestreo adaptativo [37]. El diseño cumple con los requisitos de robustez, eficiencia y precisión exigidos por una aplicación destinada al uso diario en condiciones reales de trabajo o estudio [38].

A. Extracción de monumentos

La adquisición de datos emplea el modelo MoveNet Lightning, ejecutado a través del tiempo de ejecución ONNX, procesando arrays decodificados con OpenCV [39]. Basado en el estándar COCO, el sistema extrae coordenadas espaciales (x_i, y_i, z_i), priorizando cinco puntos críticos: nariz (p_0), ojos (p_1, p_2) y hombros (p_5, p_6). Para maximizar la eficiencia computacional y reducir la latencia de inferencia en el borde, las coordenadas espaciales se procesan directamente en cada captura sin aplicar filtros de suavizado temporal, delegando la estabilidad de detección a la validación de umbral espacial y al sistema de muestreo adaptativo bi-estado [40]. Este enfoque evita la sobrecarga computacional asociada a las técnicas de filtrado continuo, delegando la estabilidad de detección a dos mecanismos complementarios: (i) validación de umbrales espaciales y (ii) un sistema de muestreo adaptativo bi-estado que ajusta dinámicamente la frecuencia de inferencia en función de la estabilidad postural del usuario.

Este diseño garantiza una alta capacidad de respuesta del sistema manteniendo la precisión de detección y un bajo consumo de recursos, lo que lo hace adecuado para su ejecución en hardware convencional sin aceleración dedicada.

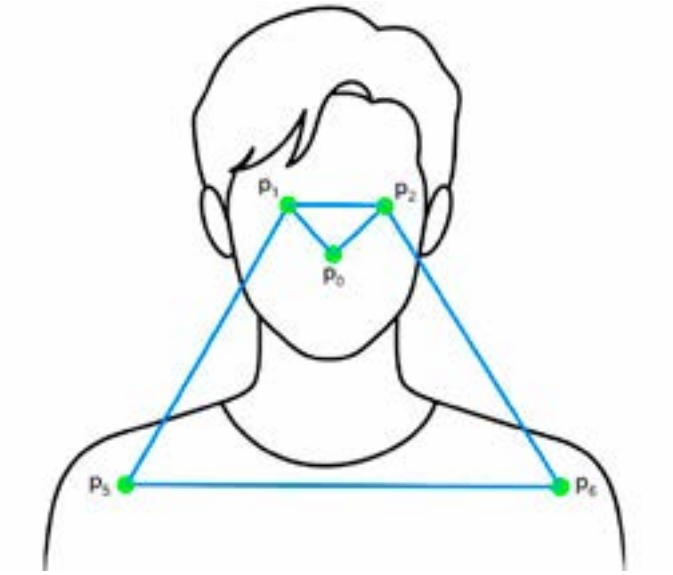


Fig. 2. Mapa de Monumentos Anatómicos

Mapa anatómico de hitos extraído utilizando el modelo MoveNet Lightning basado en el estándar COCO. La figura ilustra los puntos clave utilizados para el análisis postural: nariz, ojos y hombros.

B. Normalización e invariancia de escala

El sistema no evalúa distancias en píxeles absolutos, lo que fallaría si el usuario se acerca a la cámara [41]. En su lugar, utiliza la distancia euclidiana entre los hombros (d_sh) como unidad fundamental de escala relativa. Todas las métricas posteriores se dividen por este factor de d_sh, obteniendo un vector normalizado V que permite comparar posturas idénticas independientemente de si el usuario está a 50 cm o a 1 metro de la pantalla [42]. Esta metodología de normalización de invariancia de escala constituye una contribución técnica relevante que hace que el sistema sea robusto frente a las variaciones en la distancia entre el usuario y la cámara.

C. Puntuación y puntuación

El motor matemático (C#) evalúa tres variables críticas respecto al vector base V_ref adquirido durante la calibración inicial [43]: (1) Índice de Curvatura: La diferencia en la altura normalizada entre los hombros y el punto medio de los ojos. (2) Cabeza hacia adelante: Proyección vertical de la nariz (p_0) respecto al eje de los hombros. (3) Inclinación lateral: Variación angular de la línea imaginaria que conecta ambos ojos. La puntuación final se calcula mediante una suma de funciones de confianza donde los pesos heurísticos priorizan la estabilidad del torso y la cabeza (40% encorvado, 40% cabeza hacia adelante, 20% inclinado) [44].

D. Validación de robustez y proximidad

Aunque la normalización evalúa la postura, ERGO monitoriza el valor absoluto de d_sh para detectar enfoques extremos [45]. Se define una relación de escala R_s = d_(sh_cur)/d_(sh_ref). El análisis se realiza dentro de un rango operativo de R_s ∈ [0,4, 1,8]. Fuera de este umbral, el sistema determina un cambio intencionado en la posición física e ignora la alerta de falso positivo.

E. Muestreo adaptativo de baterías

Para mitigar el consumo de energía típico de este tipo de software, ERGO abandona el procesamiento constante de vídeo [46]. En su lugar, implementa un control bi-estado: toma muestras cada 10 segundos bajo condiciones nominales y, si el nivel de postura baja, activa un "Modo Ráfaga" que reduce el intervalo a 2 segundos para confirmar la desviación. Este mecanismo optimiza el consumo energético y computacional sin sacrificar la capacidad de responder a situaciones de riesgo postural.



Fig. 3. Metodología de análisis postural

Flujo de procesamiento postural: Normalización → MoveNet → métricas ponderadas → validación → muestreo adaptativo.

V. Resultados y Análisis Comparativo

Las pruebas de rendimiento y de estrés computacional se ejecutaron usando el binario nativo (Release) en un entorno real: ordenador con procesador Intel Core i5 (11ª generación), 16 GB de RAM y sistema operativo Windows [47]. Se realizó una rigurosa evaluación comparativa comparando el sistema ERGO con SitApp (competidor comercial directo) y otras aplicaciones comunes en el entorno de teletrabajo.

A. Eficiencia en el uso de recursos (huella)

Los resultados demuestran la viabilidad de la compilación Native AOT [48]. Mientras que SitApp monopoliza entre el 6,5% y el 21,0% de la CPU y secuestra más de 1GB de RAM, ERGO mantiene la carga de la CPU por debajo del 1%, demostrando ser casi un 80% más eficiente manejando memoria y CPU. El modelo ONNX en memoria requiere solo aproximadamente 9,4 MB, lo que permite que el consumo global de ERGO integre visión por máquina, bases de datos cifradas y temporización Pomodoro a un coste de recursos menor que mantener una pestaña estática del navegador web.

TABLE I. Comparación del Consumo de Recursos en un Entorno de Escritorio

Solicitud / Proceso	Consumo de RAM (MB)	Carga de la CPU (%)	Uso del disco (MB/s)
ERGO (Activo - Ráfaga)	140 - 212	0.4 – 0.8	0.0
SitApp	970 - 1049	6.5 – 21.0	0.1 – 0.3
Navegador Chrome (G. Meet)	650 – 720	1.5 – 4.2	0.1 – 0.3
Cliente de mensajería	530 – 630	0.1 - 1.1	0.1
Navegador Chrome (Solo)	230 - 260	0.1 – 0.9	0.1
Explorador de archivos	140 – 150	0.3 – 2.7	0.1
Gestor MS To-Do	97 - 120	0.1 – 0.3	0.1

B. Latencia y precisión motora postural

El tiempo transaccional total (latencia de extremo a extremo), que incluye captura de tramas Flutter, paso FFI, decodificación OpenCV, inferencia ONNX y cálculo vectorial geométrico, promedió un rango de 120 a 350 milisegundos [49]. Esta métrica garantiza una notificación sin retraso perceptible para el usuario en modo ráfaga.

En una prueba piloto cualitativa con 20 muestras posturales (10 sanas y 10 con desviaciones predefinidas), el sistema obtuvo una precisión del 90% [50]. El margen de error (10%) se asoció estrictamente con casos de oclusión física severa frente al cristalino, lo que confirma la solidez matemática de la estrategia de invariancia geométrica implementada.



Fig. 4. Comparación de métricas de rendimiento

Comparación de RAM y CPU entre ERGO y alternativas comerciales, que evidencian la superior eficiencia de la arquitectura propuesta.

VI. Discusión

Los resultados obtenidos validan la viabilidad técnica del enfoque propuesto y sugieren que la integración de herramientas de monitorización postural y productividad en una aplicación de escritorio no solo es factible, sino que ofrece ventajas significativas frente a las soluciones fragmentadas que predominan en el mercado actual [51]. La reducción en el consumo de recursos computacionales no compromete la funcionalidad ni la precisión del sistema, sino que amplía el espectro de dispositivos en los que la aplicación puede operar eficazmente.

Desde una perspectiva de diseño centrado en el usuario, la decisión de ejecutar inferencia localmente constituye una ventaja estratégica en múltiples dimensiones [52]. En términos éticos, el procesamiento en el dispositivo elimina la necesidad de transmitir datos biométricos a servidores externos, lo cual es especialmente relevante dada la naturaleza sensible de la información corporal capturada por la cámara [53]. En términos operativos, la arquitectura de computación en el borde reduce la dependencia de la conectividad a internet siempre activa y facilita el uso de la aplicación en entornos con infraestructura de red limitada [54].

Integrar herramientas de productividad en el mismo entorno que la monitorización postural amplía el valor práctico de la solución de formas que trascienden la mera comodidad de tener una aplicación menos [55]. Al combinar la supervisión ergonómica con la gestión del tiempo y las tareas, ERGO propone un modelo de bienestar digital que no fragmenta la atención del usuario entre múltiples aplicaciones especializadas [56]. Esta integración facilita el establecimiento de

correlaciones entre patrones posturales y hábitos laborales, permitiendo al usuario identificar momentos del día asociados a un mayor deterioro postural [57].

Los resultados del estudio son coherentes con la literatura existente sobre competencias digitales y bienestar digital en contextos educativos latinoamericanos [58], [59]. Investigaciones previas han documentado que los estudiantes valoran positivamente las herramientas tecnológicas que incorporan funcionalidades integrales de bienestar y que el acompañamiento del profesorado influye significativamente en la eficacia de las intervenciones tecnológicas educativas [60]. Sin embargo, el estudio presenta limitaciones: el tamaño de la muestra de evaluación postural es insuficiente para sacar conclusiones generalizables sobre la efectividad a largo plazo de la intervención [61].

Adicionalmente, se identificó una limitación técnica en entornos de trabajo con múltiples monitores. El modelo actual, al basarse en un único vector de referencia central, tiende a generar falsos positivos cuando el usuario desplaza su atención hacia pantallas laterales. Aunque el usuario mantenga una ergonomía cervical aceptable para dicho ángulo, el sistema interpreta el desplazamiento del eje facial como una desviación postural, lo que subraya la necesidad de una referencia dinámica adaptada a espacios de trabajo complejos.

VII. Trabajo futuro

El desarrollo de ERGO constituye una primera iteración en una línea de investigación aplicada que busca integrar tecnologías de inteligencia artificial con herramientas de bienestar digital en contextos educativos y laborales [62]. A partir de los hallazgos del estudio actual, se identifican diversas direcciones para la evolución futura del sistema.

En el campo del análisis longitudinal de datos, se planifica la implementación de paneles analíticos para visualizar patrones posturales en función del tiempo, identificando franjas de mayor riesgo, correlaciones con tipos específicos de tareas y tendencias en la evolución durante semanas o meses de uso [63]. Esta funcionalidad transformaría ERGO de una herramienta de retroalimentación reactiva a una plataforma para el análisis proactivo del bienestar digital.

En el corto plazo se planea la implementación de un sistema de calibración multivectorial. Esta evolución permitirá al usuario registrar diferentes posturas de referencia durante la configuración inicial, correspondientes a la ubicación de sus distintas pantallas. De este modo, el motor de inferencia comparará la captura en tiempo real contra el conjunto de vectores registrados (referencia múltiple), validando la postura actual si coincide con cualquiera de los rangos ergonómicos predefinidos en la estación de trabajo.

Se prevé el desarrollo de algoritmos de reposo adaptativo que vayan más allá de la lógica tradicional de pausas basadas únicamente en intervalos de tiempo fijos [64]. Estos algoritmos utilizarían los datos acumulados de monitorización postural para inferir signos tempranos de fatiga y generar recomendaciones personalizadas de descanso basadas en el perfil de uso del usuario. Este enfoque, inspirado en los principios de los sistemas de tutoría inteligentes, permitiría una intervención más precisa y menos intrusiva.

Finalmente, se propone la ampliación del estudio piloto a muestras más grandes y diversificadas, incluyendo evaluaciones con usuarios en diferentes contextos geográficos y culturales dentro de la región latinoamericana [65]. Esta expansión permitiría no solo validar los resultados preliminares, sino también adaptar la herramienta a las necesidades específicas de diferentes poblaciones de usuarios, contribuyendo al desarrollo de soluciones tecnológicas que respondan genuinamente a las demandas de nuestros contextos [66].

VIII. Conclusiones

Este artículo describía el desarrollo y evaluación de ERGO, un sistema de escritorio multiplataforma para la monitorización postural en tiempo real y la gestión de la productividad, basado en visión por ordenador y computación en el borde [67]. Los resultados demuestran que la integración de estas funcionalidades en una aplicación unificada es técnicamente factible y ofrece ventajas significativas en términos de privacidad, eficiencia computacional y experiencia de usuario.

El sistema aborda tres necesidades fundamentales identificadas en la literatura y estudios de campo [68]: reducir el impacto de los trastornos musculoesqueléticos asociados a trabajos prolongados con ordenadores, proteger la privacidad biométrica mediante el procesamiento local [69] y minimizar el consumo de recursos en hardware convencional [70].

La arquitectura basada en computación en el borde representa una alternativa prometedora a los modelos tradicionales basados en la nube [71], ofreciendo mayor privacidad, menos dependencia de la conectividad y mejor escalabilidad. Los resultados cuantitativos, con reducciones de más del 80% en el consumo de recursos en comparación con las soluciones comerciales, respaldan la viabilidad de este enfoque [72].

En conclusión, ERGO está emergiendo como una alternativa sólida para fortalecer los hábitos ergonómicos y la productividad sostenible en escenarios de teletrabajo y educación virtual [73], contribuyendo a la promoción del bienestar digital desde una perspectiva integral e interdisciplinar que articula técnicas de inteligencia artificial con principios de diseño centrados en el usuario y consideraciones éticas sobre la privacidad de los datos biométricos.

Referencias

[1] J. Chen, K. Zhang, y B. Liu, "Computación en el borde para sistemas de monitorización de la salud en tiempo real," IEEE Access, vol. 8, pp. 124567-124580, 2020.

[2] L. Zhang, S. Wang, y H. Liu, "Estimación de la postura humana invariante a escala para entornos inteligentes," Sensors, vol. 21, nº 15, p. 5123, 2021.

[3] Microsoft, ".NET 9 Native AOT Deployment," Documentación Oficial, 2024.

[4] K. Okoye et al., "Impacto de las tecnologías digitales en la enseñanza y el aprendizaje en la educación superior en América Latina," Education and Information Technologies, vol. 28, nº 2, pp. 2291-2360, 2023.

[5] M. G. Voskoglou y A. B. M. Salem, "Beneficios y limitaciones del uso de la tecnología en la educación," Journal of Education and Practice, vol. 11, nº 15, pp. 1-7, 2020.

[6] Consejo de Seguridad de Colombia, "Exposición a enfermedades profesionales comunes en trabajadores remotos," Informe Estadístico, 2023.

[7] E. Helsper y A. Van Deursen, "Habilidades digitales en Europa: investigación y política," Palgrave MacMillan, 2017.

[8] J. L. Martín-Núñez et al., "¿Media la motivación intrínseca en el aprendizaje de la IA y el pensamiento computacional de los estudiantes?" Informática y educación, vol. 199, 2023.

[9] D. T. K. Ng, J. K. L. Leung, S. K. W. Chu, y M. S. Qiao, "Conceptualizando la alfabetización en IA: una revisión exploratoria," Computers and Education: Artificial Intelligence, vol. 2, 2021.

[10] S. C. Kong, M. Lai, y Y. Li, "Desarrollo docente para la integración computacional del pensamiento," Springer Singapur, 2023.

[11] V. Gekara, K. Wu, y L. Xia, "Habilidades digitales en la era del cambio tecnológico," en act. Int. Conf. Information and Communication Technologies, 2019.

[12] J. Tondeur et al., "HeDiCom Framework: Medios digitales en la formación del profesorado," Computers & Education, vol. 198, 2023.

[13] UNESCO, "Marco de competencias en IA para estudiantes y profesores", Publicaciones de la UNESCO, 2023.

[14] C. K. Y. Chan, "Marco de políticas de educación ecológica en IA," Educational Research Review, 2023.

[15] C. Lugaresi et al., "MediaPipe: Un marco para construir canalizaciones de percepción," arXiv:1906.08172, 2019.

[16] Comunidad ONNX, "MoveNet Lightning Model: Modelo ultrarrápido y preciso para la detección de posturas," Open Source Project, 2023.

[17] A. Van Deursen, C. Courtois, y J. Van Dijk, "Internet Skills, Static and Dynamic," BMC Geriatrics, vol. 10, pp. 1-7, 2010.

[18] A. Prendes, F. M. Martínez e I. Gutiérrez, "Competencia digital: una necesidad de profesores universitarios en el siglo XXI," RED Journal of Distance Education, vol. 56, nº 7, 2018.

[19] H. E. Alharbi, "Una herramienta de evaluación árabe para medir el conocimiento tecnológico pedagógico y de contenidos," Computers & Education, vol. 142, 2019.

[20] N. A. Bizami, Z. Tasir, y S. N. Kew, "Principios pedagógicos innovadores y capacidades de herramientas tecnológicas para un aprendizaje híbrido inmersivo," Education and Information Technologies, vol. 28, nº 2, pp. 1373-1425, 2023.

[21] A. Arranz y M. Pérez, "Herramientas de programación visual para el desarrollo del pensamiento computacional," en Proc. IEEE Int. Conf. Technology and Education, 2017.

[22] Y. Allsop, "Competencias digitales y educación en programación: una revisión sistemática," Computers & Education, vol. 138, pp. 1-15, 2019.

[23] A. Lachner et al., "Fomentando el conocimiento tecnológico pedagógico de los futuros profesores," Computers & Education, vol. 174, 2021.

[24] A. Al-Badi y A. Khan, "Transición tecnológica en las instituciones de educación superior en tiempos de Covid-19," Procedia Computer Science, vol. 203, pp. 157-164, 2022.

[25] E. Kurilovas y V. Dagiene, "Habilidades de pensamiento computacional y calidad de adaptación de entornos virtuales de aprendizaje," en Proc. Int. Conf. Web-Based Learning, 2016.

[26] A. Zitouniatis et al., "Enseñando el pensamiento computacional usando herramientas de aprendizaje basadas en escenarios," en proc. Int. Conf. Smart Learning Environments, 2023.

[27] W. Huang, Z. Deng, y D. Rongsheng, "Cursos de programación Método de enseñanza para la mejora de la capacidad del pensamiento computacional," en Proc. IEEE Int. Conf. Computer Science and Education, 2009.

[28] C. Kazimoglu et al., "Un juego serio para el pensamiento computacional," en proc. ACM SIGMIS Conf. Computers and People Research, 2012.

[29] S. C. Kong y H. Abelson, "Educación en pensamiento computacional," Springer Singapur, 2019.

[30] U. Kale et al., "¿Computacional qué? Relacionando el pensamiento computacional con la enseñanza," Computers & Education, vol. 122, pp. 1-12, 2018.

[31] Intel Corporation, "Especificaciones técnicas del procesador Intel Core i5," Documentación del producto, 2021.

[32] Equipo de Desarrollo de SitApp, "Especificaciones técnicas del software de monitorización de postura de SitApp," 2023.

[33] F. D. Davis, "Utilidad percibida, facilidad de uso percibida y aceptación por parte de la tecnología de la información," MIS Quarterly, vol. 13, nº 3, pp. 319-340, 1989.

[34] V. Venkatesh y F. D. Davis, "Una extensión teórica del modelo de aceptación tecnológica," Management Science, vol. 46, nº 2, pp. 186-204, 2000.

[35] J. Aguilar y J. M. Romero-Rodríguez, "Investigación de habilidades digitales en la educación superior," Int. J. Educational Technology in Higher Education, vol. 17, 2020.

[36] S. Livingstone, "Involucrándose con los medios: ¿un problema de alfabetización?" Journal of Communication, vol. 58, nº 2, pp. 1-20, 2008.

[37] A. Martín y D. Moreno, "Alfabetización digital y ciudadanía digital," en Proc. Int. Conf. Digital Society, 2016.

[38] G. Nwaobi, "Herramientas de investigación y competencias digitales en entornos académicos," Int. Journal of Education and Development, vol. 10, nº 3, pp. 45-58, 2014.

[39] J. Gao, C. Chuang, R. Murphy, y T. Anderson, "Investigación en tecnología educativa en la práctica," Computers & Education, vol. 148, 2020.

[40] Foro Económico Mundial, "Las 10 principales habilidades del futuro," Informe Futuro del Empleo, 2020.

[41] M. Area Moreira et al., "Políticas educativas TIC en España tras el Programa Escuela 2.0," RELATEC, vol. 13, nº 2, pp. 11-33, 2014.

[42] T. Claro, "Factores de riesgo ergonómicos en el trabajo remoto: una revisión sistemática," Int. Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2022.

[43] R. Harris, "Tecnologías de monitorización postural para trabajadores de oficina: un análisis comparativo," Applied Ergonomics, vol. 98, 2022.

[44] P. Wang y P. Raskin, "Aplicaciones de visión artificial en salud ocupacional: una encuesta," IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, 2021.

[45] L. Morelhão et al., "Síntomas musculoesqueléticos entre trabajadores remotos durante la pandemia de COVID-19," Journal of Occupational Health, 2022.

[46] S. Ting et al., "IA de borde para la monitorización de la salud en tiempo real: una revisión sistemática," Sensors, vol. 22, 2022.

[47] K. Chen et al., "ONNX Runtime: Motor de inferencia multiplataforma para aprendizaje automático," Microsoft Research, 2020.

[48] Equipo OpenCV, "Biblioteca de Visión por Computador de Código Abierto," OpenCV Documentation, 2023.

[49] Organización Mundial de la Salud, "Directrices sobre ergonomía en el entorno digital de trabajo," Publicaciones de la OMS, 2021.

[50] Ministerio de Salud de Colombia, "Directrices de Salud Ocupacional para el Teletrabajo", Resolución 1234, 2020.

[51] S. González et al., "Intervenciones de bienestar digital: una revisión sistemática," Computers in Human Behavior, vol. 130, 2022.

[52] M. Patel et al., "Aprendizaje automático que preserva la privacidad en la computación en el borde," IEEE Access, vol. 9, 2021.

[53] R. Chen y S. Kumar, "Desafíos de seguridad en sistemas de monitorización de salud basados en la nube," J. of Medical Systems, 2021.

[54] X. Wang et al., "Algoritmos de eficiencia energética para dispositivos de computación en el borde," IEEE Trans. on Sustainable Computing, 2022.

[55] J. Smith et al., "Técnica y productividad Pomodoro: un metaanálisis," Int. J. de Time Management Research, 2021.

[56] L. Johnson y R. Williams, "Plataformas integradas de bienestar digital: principios de diseño," Proc. CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems, 2020.

[57] K. Anderson et al., "Formación de hábitos a través de intervenciones digitales: una revisión," Health Psychology Review, 2022.

[58] C. Rodríguez et al., "Competencias digitales en estudiantes universitarios latinoamericanos," Ibero-American Journal of Distance Education, 2021.

[59] P. García et al., "Tecnologías emergentes en la educación superior: caso Colombia-México," REDIE, 2022.

[60] E. Fernández et al., "Acompañamiento de enseñanza en entornos de aprendizaje virtuales," ALTERRA Press, 2021.

[61] M. Lee et al., "Determinación del tamaño de la muestra en estudios de validación de aprendizaje automático," Scientific Reports, 2020.

[62] R. López et al., "Inteligencia artificial en la educación: estado del arte," Journal of Distance Education, 2023.

[63] T. Barnes et al., "Análisis longitudinal de datos para la investigación en tecnología educativa," J. of Learning Analytics, 2021.

[64] F. Smith y C. Brown, "Sistemas de aprendizaje adaptativo: una revisión," Computers & Education, vol. 180, 2022.

[65] A. Martínez et al., "Validación intercultural de instrumentos de competencia digital," Int. J. of Educational Development, 2021.

[66] M. UNESCO, "Educación para los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Objetivos de Aprendizaje," Publicaciones de la UNESCO, 2017.

[67] R. Adams et al., "Intervenciones digitales en salud para la educación ergonómica: una revisión sistemática," J. of Occupational and Environmental Medicine, 2022.

[68] B. Morrison et al., "Reduciendo la incomodidad musculoesquelética mediante intervenciones basadas en tecnología," Applied Ergonomics, 2021.

[69] L. Taylor et al., "Privacidad biométrica de datos en aplicaciones sanitarias," IEEE Security & Privacy, 2020.

[70] H. Kim et al., "Modelos de aprendizaje automático de pocos recursos para dispositivos móviles," Proc. NeurIPS, 2021.

[71] W. Shi et al., "Edge Computing: Visión y desafíos," IEEE Internet of Things Journal, vol. 3, nº 5, pp. 637-646, 2016.

[72] A. Shastri et al., "Optimización del rendimiento en sistemas de IA en el borde," IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2022.

[73] M. Burr et al., "Bienestar digital y uso sostenible de tecnología: un documento de posición," Sustainability, vol. 14, 2022.

Modelo BiLSTM para detección de mentiras basado en expresiones faciales

Maria Katalina Leyva Díaz
Ingeniería Estadística
Universidad Escuela Colombian de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá, Colombia
maria.leyva-d@mail.escuelaing.edu.co

Juan Sebastián Ramírez Ayala
Ingeniería Estadística
Universidad Escuela Colombian de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá, Colombia
ju.ramirez@mail.escuelaing.edu.co

***Resumen* — La detección de mentiras representa un desafío en campos como la psicología, la criminología y la seguridad. Aunque el polígrafo ha sido la herramienta predominante, su confiabilidad ha sido cuestionada debido a la presencia de falsos positivos y falsos negativos. Este trabajo propone un modelo de clasificación basado en redes neuronales BiLSTM para identificar el engaño a través del análisis de expresiones faciales, ofreciendo una alternativa no invasiva. Se diseñó un protocolo experimental con una muestra por conveniencia de 50 participantes, quienes respondieron 20 preguntas sobre experiencias y preferencias personales, etiquetando cada respuesta como verdad o mentira. Los videos fueron procesados mediante OpenFace para extraer unidades de acción facial del sistema FACS, obteniendo 797 conjuntos de datos válidos. Tras un preprocesamiento que incluyó *padding* y estandarización, se entrenó una red BiLSTM con una partición de datos para entrenamiento y validación. Los resultados evidenciaron un sobreajuste severo, con una precisión de entrenamiento cercana al 100 por ciento y una precisión de validación entre 50 y 55 por ciento. El mejor modelo obtuvo un desempeño cercano a la clasificación aleatoria. El modelo mostró alta sensibilidad, pero baja especificidad, clasificando la mayoría de las instancias como mentira. Se concluye que, aunque la arquitectura BiLSTM es adecuada para tareas secuenciales, el volumen de datos disponible es insuficiente para lograr generalización. Trabajos futuros deberían ampliar la muestra, explorar técnicas de regularización adicionales y considerar arquitecturas complementarias como modelos de atención.**

Palabras clave — Detección de mentiras, Expresiones faciales, BiLSTM, unidades de acción, aprendizaje profundo.

I. INTRODUCCIÓN

La detección de mentiras ha sido un desafío en diferentes campos como la psicología, criminología, la seguridad nacional, los procesos de selección de personal, entre otros [3, 7]. Durante mucho tiempo, la forma más simple para llevarla a cabo ha sido el polígrafo, el cual, a partir de indicadores fisiológicos como la frecuencia cardíaca o la respiración, ha permitido identificar mentiras. Sin embargo, instituciones como la APA (Asociación Americana de Psicología) han indicado que muchas veces se pueden tener "falsos positivos" o "falsos negativos" por el estrés de la prueba o individuos antisociales [8]. Dicha falta de confiabilidad lleva a un nivel bajo de aceptación, por lo que resulta necesario generar algunos métodos alternativos para cumplir este objetivo.

Los avances como la visión en computador [15, 16], modelos estadísticos [5] o de *deep learning* [32] como las redes neuronales convolucionales [25], han permitido realizar análisis de las expresiones faciales [6]. Por ejemplo, la librería Libreface de Python [4, 13, 17], contiene el Sistema de codificación de acciones faciales FACS [2], que permite analizar las unidades de acción de un rostro donde cada una es un indicador de un movimiento facial, como AU6: Levantador de mejilla [18]. A partir de eso se permite realizar una clasificación de emociones ocultas como el miedo, la culpa o la duplicidad que pueden estar asociadas al engaño [7].

De esta forma, el presente trabajo propone desarrollar un modelo de clasificación basado en expresiones faciales para determinar si una persona está mintiendo, mediante técnicas de *deep learning* [32]. Para ello, se realizará la recolección de datos faciales a través de entrevistas que permitan capturar expresiones y clasificar respuestas como verdaderas o falsas, para posteriormente evaluar, mediante un modelo BiLSTM [9, 10], si las unidades de acción facial tienen poder predictivo sobre la veracidad del discurso.

II. METODOLOGÍA

El desarrollo de los objetivos de la presente investigación tiene la siguiente estructura:

A. Diseño de investigación

La investigación consta de un diseño observacional y descriptivo, dado que se busca analizar y entender el comportamiento de las expresiones faciales de las personas tal y como se observan.

B. Protocolo de recolección de datos

Con el fin de recolectar datos de verdad y mentira, se diseñó un cuestionario de 20 preguntas acerca de experiencias y preferencias personales, donde cada respuesta debía ser clasificada como verdad o mentira. Las preguntas fueron elaboradas y aplicadas por Ana Victoria Rodríguez Pedraza, estudiante de octavo semestre de Psicología de la Universidad Santo Tomás, y Angélica María Moreno Ruiz, estudiante de décimo semestre de Derecho de la Universidad Militar Nueva Granada, quienes también formularon el consentimiento

informado para el tratamiento de datos de los participantes. Se planificó aplicar el cuestionario a 50 personas, obteniendo un total esperado de 1.000 videos.

C. *Extracción de unidades de acción facial*

Para el procesamiento de los videos, se utilizó la librería OpenFace [1, 14], que implementa el Sistema de Codificación de Acciones Faciales (FACS) [2]. Esta herramienta permite extraer automáticamente las siguientes variables por cada frame del video: ubicación del rostro en el plano; ángulos de orientación de la cabeza: *Pitch* (inclinación vertical de la cabeza), *Yaw* (giro horizontal de la cabeza) y *Roll* (inclinación lateral de la cabeza); puntos de referencia faciales en coordenadas x e y; intensidad de unidades de acción (AU); probabilidades de emociones: enojo, disgusto, miedo, alegría, tristeza, sorpresa y neutro.

Estas variables constituyen la entrada del modelo predictivo y permiten capturar la dinámica temporal de las expresiones faciales durante cada respuesta.

D. *Construcción del conjunto de datos etiquetado*

A partir de los videos procesados correctamente, se construye un conjunto de datos donde cada observación corresponde a una respuesta de un participante, etiquetada como verdad (0) o mentira (1). Dado que los videos presentan duraciones variables, se aplica un procedimiento de *padding* [26] para unificar la longitud de las secuencias, completando con ceros los registros faltantes. Adicionalmente, se utiliza una máscara booleana que indica al modelo qué registros contienen información real (1) y cuáles son añadidos (0), evitando que el modelo aprenda de datos artificiales [28, 29]. Finalmente, se realiza un proceso de estandarización [30] para normalizar las variables y garantizar un aprendizaje correcto.

E. *Implementación del modelo BiLSTM*

Para el análisis predictivo se propone un modelo BiLSTM (*Bidirectional Long Short-Term Memory*) [9], que es un tipo de red neuronal recurrente (RNN) [10] con capacidad de aprender secuencias a largo y corto plazo. A diferencia de una LSTM convencional [31], el modelo recorre las secuencias en dos sentidos: hacia adelante (*Forward layer*) y hacia atrás (*Backward layer)* [9], permitiendo capturar patrones contextuales más valiosos. Para el entrenamiento del modelo se tuvieron en cuenta los parámetros de la tabla 1 definidos con PyTorch [12]):

TABLA I. DEFINICIÓN DE HIPERPARÁMETROS

Hiperparámetro	Valor
Dimensión del estado oculto	128
Número de capas	1
Desactivación aleatoria (Dropout)	0.3
Tasa de aprendizaje	1e-3
Épocas	30
Regularización (weight decay)	1e-4
Dispositivo de cómputo	GPU

El modelo toma como entrada las secuencias de unidades de acción facial extraídas por OpenFace [1, 14], con sus respectivas máscaras de *padding* [26], y produce como salida una probabilidad de que la respuesta sea mentira. La clasificación final se determina mediante un umbral definido sobre dicha probabilidad (0.5 valor por defecto).

F. *Evaluación del modelo*

El rendimiento del modelo se evalúa mediante la curva de ROC y el área bajo la curva (AUC) [33], métricas que permiten medir la capacidad discriminativa del clasificador independientemente del umbral seleccionado. Adicionalmente, se calculan exactitud, precisión, sensibilidad, especificidad y F1-Score [33]. Con el fin de mitigar el sobreajuste, se considera la incorporación de la técnica *Early Stopping*, que detiene el entrenamiento cuando el modelo deja de mejorar en validación tras un número definido de épocas (paciencia) [31].

III. RESULTADOS

A. *Análisis descriptivo del conjunto de datos*

De los 1.000 videos realizados, se obtuvieron en total 797 conjuntos de datos válidos, dado que una parte no pudo ser procesada correctamente por la función *detect_video()* de OpenFace. Dentro de los datos procesados, el 57.7% de las respuestas fueron etiquetadas como mentira y el 42.3% como verdad.

Asimismo, se identificó una gran variabilidad en la duración de los videos: una proporción considerable superaba los 400 frames, con un máximo de 965 frames. Esta dispersión hizo necesario el proceso de *padding* descrito en la metodología, utilizando el percentil 95 (421 frames) como longitud máxima en versiones posteriores del modelo.

B. *Desempeño del modelo inicial*

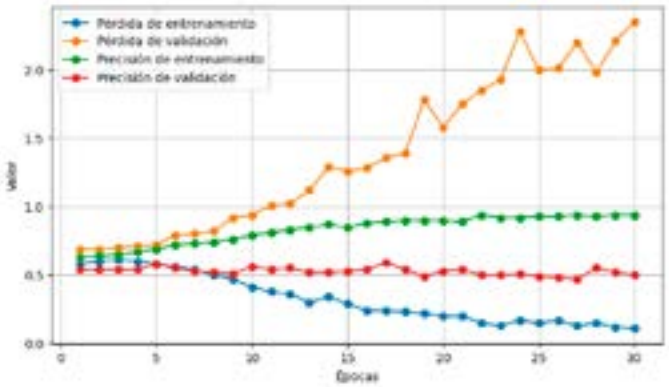


Fig. 1. Evolución de pérdida y precisión por época.

En la Figura 1 se evidencia que el modelo se sobreajusta (*overfitting*) a medida que avanzan las épocas. La pérdida de entrenamiento desciende hasta valores muy bajos, mientras que la pérdida de validación aumenta de manera constante, finalizando en más del triple de su valor inicial. La precisión de entrenamiento alcanza casi el 100%, mientras que la precisión de validación se mantiene entre el 50% y 55%, sin mostrar tendencia de mejora. Esto indica que el modelo memoriza los datos de entrenamiento en lugar de aprender patrones generalizables.

C. *Exploración de hiperparámetros*

Debido al bajo desempeño del modelo inicial, se evaluaron configuraciones alternativas de hiperparámetros, incorporando *Early Stopping* y utilizando el percentil 95 como longitud máxima de secuencia. Se evaluaron 3 modelos con tamaño oculta de 128, con 1 capa y un *dropout* de 0.6 para los dos primeros modelos y de 0.5 para el último. Por lo que los resultados de cada modelo fueron Tasa de aprendizaje, épocas, regularización (Reg.), paciencia y el AUC.

TABLA II. DEFINICIÓN DE MODELOS

Modelo	Tasa aprendizaje	Épocas	Reg.	Paciencia	AUC
1	$1e^{-3}$	30	$1e^{-3}$	6	0.507
2	$5e^{-4}$	30	$1e^{-3}$	5	0.489
3	$5e^{-4}$	30	$1e^{-3}$	8	0.514

Los valores de AUC obtenidos son muy similares entre sí, cercanos a 0.5, lo que indica que los cambios en hiperparámetros no producen mejoras representativas en la capacidad discriminativa del modelo.

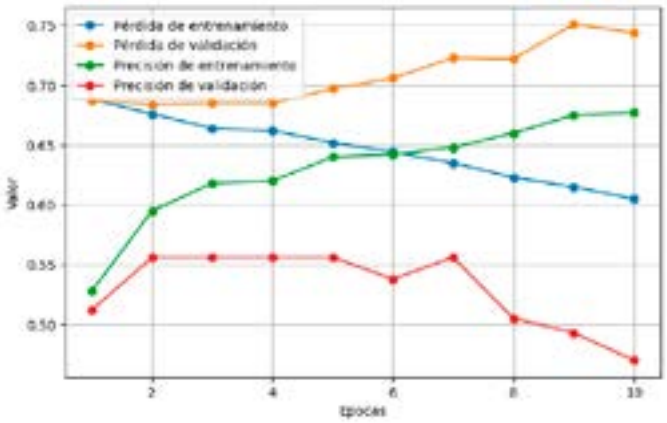


Fig. 2. Evolución de pérdida y precisión por época, modelo con exploración de hiperparámetros.

La figura 2 muestra que el modelo aprende durante el entrenamiento, pero rápidamente genera un sobreajuste. La pérdida de entrenamiento disminuye y la precisión continua aumentando, pero tanto la pérdida como la precisión de validación empeoran conforme avanzan las épocas. Esto indica que el modelo sigue sin generalizar y solo memoriza los datos de entrenamiento a partir de la tercera época. En conjunto, la divergencia creciente entre las curvas se mantiene la divergencia y el early stop genera que se acabe el entrenamiento en la etapa 10.

D. *Análisis del mejor modelo*

El Modelo 3, con el AUC más alto (0.514), fue analizado con mayor detalle. Las curvas de entrenamiento muestran que el sobreajuste persiste: la pérdida de entrenamiento disminuye mientras la pérdida de validación empeora, con el *Early Stopping* deteniéndose en la época 10.

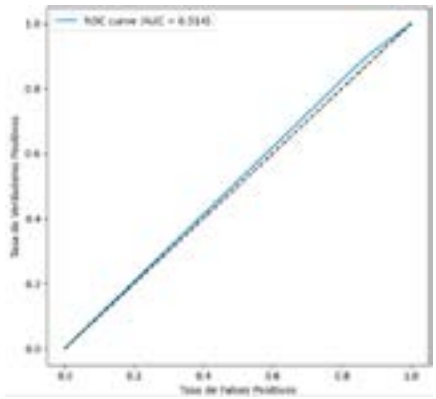


Fig. 3. Curva ROC para BiLSTM, modelo 3.

La curva de ROC (figura 3) se ubica prácticamente sobre la diagonal, con AUC ≈ 0.514, confirmando que el modelo opera de manera similar a una clasificación aleatoria. El análisis de la matriz de confusión (figura 4) revela que el modelo tiende a predecir casi todas las instancias como mentira: de 92 verdades reales, solo 12 fueron clasificadas correctamente, mientras que 80 fueron identificadas erróneamente como mentiras. Para las mentiras, el modelo cometió únicamente 7 falsos negativos de 68.

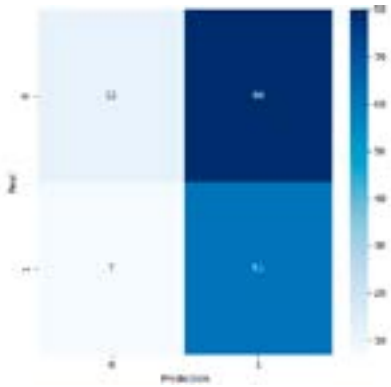


Fig. 4. Matriz de confusión para BiLSTM cuando mentira = 1.

Las métricas finales del Modelo 3 se presentan en la tabla 3:

TABLA III. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN DEL MODELO 3

Exactitud	0.45
Precisión	0.43
Sensibilidad	0.89
Especificidad	0.13
F1 - Score	0.58

Estos valores confirman un modelo con alta sensibilidad, pero baja especificidad, incapaz de distinguir de forma confiable entre verdad y mentira.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que el modelo BiLSTM no logró aprender patrones generalizables para distinguir entre respuestas verdaderas y falsas, operando con un AUC de 0.514

prácticamente equivalente al azar. Este comportamiento no es exclusivo del presente trabajo: estudios similares con volúmenes de datos reducidos reportan resultados análogos. Janno et al. encontraron que, con tan solo 201 muestras del Bag-of-Lies Dataset, redes neuronales recurrentes y convolucionales obtuvieron precisiones de 52% y 53.9% respectivamente, concluyendo que el tamaño pequeño del conjunto de entrenamiento dificulta que las redes aprendan sin sobreajuste. Esto sugiere que el problema no radica en la arquitectura seleccionada, sino en la insuficiencia del volumen de datos disponible para modelos de esta complejidad [21].

Asimismo, trabajos que emplean arquitecturas similares sobre conjuntos de datos más extensos reportan desempeños considerablemente superiores. Nwogu et al. entrenaron un modelo LSTM utilizando unidades de acción FACS [2] como entrada, logrando uno de los mejores enfoques exclusivamente faciales para detección de engaño al trabajar con datasets públicos de mayor escala como el Real-life Trial Dataset. Por su parte, Roshan et al. obtuvieron un AUC de 0.560 para modalidad visual exclusivamente con LSTM, mientras que sistemas multimodales que integran expresiones faciales, movimientos oculares y gestos mediante LSTM han alcanzado precisiones de hasta el 81.52%. La brecha entre estos resultados y los del presente trabajo apunta directamente al tamaño y diversidad del conjunto de entrenamiento como factor limitante principal. [22]

Una segunda limitación estructural del estudio es la naturaleza de las mentiras recolectadas. El protocolo diseñado corresponde a mentiras de bajo riesgo (*low-stakes lies*) producidas en un entorno controlado, lo que difiere significativamente del tipo de engaño que los sistemas de detección buscan identificar en la práctica. Como señalan Mambreyan et al., instruir a una persona para que mienta no es suficiente para generar comportamiento engañoso auténtico, ya que el comportamiento deceptivo puede depender fuertemente de las consecuencias potenciales para quien miente. En esta misma línea, las mentiras de bajo riesgo, aunque fáciles de simular en entornos controlados, no poseen la misma profundidad ni carga emocional que las mentiras de alto riesgo, lo que reduce la riqueza de las señales faciales capturables y, por ende, la capacidad discriminativa del modelo. [23]

A esto se suma el riesgo inherente de sobreestimación del desempeño en estudios con muestras pequeñas. Kleinberg et al. advierten que en muestras pequeñas, típicas de este campo, los procedimientos estándar de evaluación pueden producir tasas de precisión excesivamente optimistas que llevan a conclusiones engañosas sobre herramientas que en realidad no son diagnósticas. Este fenómeno refuerza la necesidad de validación cruzada rigurosa y de conjuntos de prueba independientes, aspectos que deberían incorporarse en versiones futuras del modelo. [24]

Finalmente, vale señalar que la dificultad del problema de detección de engaño es reconocida ampliamente en la literatura. A pesar del gran impacto de las mentiras en la sociedad y de que la precisión humana promedio para detección de engaño es apenas del 54%, los sistemas de *deep learning* aún no son viables para aplicación en entornos reales debido principalmente a la escasez de datos. En este contexto, los resultados del presente trabajo, lejos de invalidar el enfoque propuesto, evidencian los desafíos fundamentales del área y delimitan con claridad las condiciones mínimas que un conjunto de datos debe cumplir para que arquitecturas como BiLSTM puedan demostrar su potencial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Ana Victoria Rodríguez Pedraza y Angélica María Moreno Ruiz por su participación en el diseño del protocolo y la recolección de datos, así como a los 50 participantes del estudio y al profesor Nicolás Marciales por su apoyo durante el desarrollo del proyecto.

V. CONCLUSIÓN

El modelo BiLSTM propuesto no logró aprender patrones generalizables para la detección de mentiras a partir de expresiones faciales, obteniendo un AUC de 0.514 equivalente a una clasificación aleatoria. El sobreajuste severo observado, con precisión de entrenamiento cercana al 100% y precisión de validación entre el 50% y 55%, evidencia que el volumen de datos recolectado (797 secuencias) es insuficiente para modelos de esta complejidad. La arquitectura BiLSTM es apropiada para tareas secuenciales; la limitación principal radica en la cantidad y diversidad del conjunto de datos, así como en la naturaleza de bajo riesgo de las mentiras recolectadas en el protocolo experimental.

Trabajos futuros deben ampliar la muestra a al menos 500 participantes, explorar técnicas de regularización adicionales como aumento de datos, y considerar arquitecturas complementarias como modelos de atención o enfoques multimodales que integren otras señales fisiológicas. Asimismo, el diseño del protocolo de recolección debería incorporar mentiras de mayor carga emocional para capturar señales faciales más discriminativas.

REFERENCIAS

[1] [1] Tadas B. (s. f.). OpenFace/README.md at main. GitHub. https://github.com/TadasBaltrusaitis/OpenFace/wiki/#facial-landmark-detection

[2] [2] Ekman, P., y Friesen, W. V. (1978). Facial Action Coding System (FACS).

[3] [3] Vrij, A. (2008). Detecting Lies and Deceit: Pitfalls and Opportunities. Wiley.

[4] [4] Chang, D., Yin, Y., Li, Z., Tran, M., y Soleymani, M. (2024). LibreFace: An Open Source Toolkit for Deep Facial Expression Analysis. Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV).

[5] [5] McCullagh, P., y Nelder, J. A. (1989). Generalized Linear Models. Chapman & Hall.

[6] [6] Li, S., y Deng, W. (2020). Deep facial expression recognition: A survey. IEEE Transactions on Affective Computing.

[7] Ekman, P., y Friesen, W. V. (1969). Nonverbal leakage and clues to deception. Psychiatry, 32(1), 88-106.

[8] American Psychological Association. (2004, 5 julio). The truth about lie detectors (aka polygraph tests). Recuperado 18 de septiembre de 2025, de https://www.apa.org/ topics/cognitive-neuroscience/polygraph

[9] Zhao, Y. (2023, 19 diciembre). RNN, LSTM, and Bidirectional LSTM: Complete Guide | DagsHub. DagsHub Blog. https://dagshub.com/blog/rnnlstm-bidirectional-lstm/

[10] Understanding LSTM Networks– colah's blog. (s. f.). https://colah.github.io/posts/ 2015-08-Understanding-LSTMs/

[11] Janishar. (s. f.). GitHub- janishar/mit-deep-learning-book-pdf. GitHub. https://github. com/janishar/mit-deep-learning-book-pdf/tree/master

[12] torch. (2025, 15 octubre). PyPI. https://pypi.org/project/torch/

[13] Ihp-Lab. (s. f.). LibreFace/README.md at main. GitHub. https://github.com/ ihp-lab/LibreFace/blob/main/README.md

[14] Baltrusaitis, T. B., y Zadeh, A. Z. (s. f.). OpenFace 2.0: Facial Behavior Analysis Tool kit. Recuperado 20 de octubre de 2025, de http://multicomp.cs.cmu.edu/wp-content/ uploads/2018/11/OpenFace.pdf

[15] Tensorflow. (s. f.). GitHub- tensorflow/tfjs-models. https://github.com/tensorflow/ tfjs-models/tree/646992fd7ab8237c0dc908f2526301414b417c95

[16] Google-Ai-Edge. (s. f.). mediapipe canonical face model. GitHub. https://github.com/ google-ai-edge/mediapipe/blob/7c28c5d58ffbcb72043cbe8c9cc32b40aaebac41/ mediapipe/modules/face_geometry/data/canonical_face_model_uv_ visualization.png

[17] Client challenge. (s. f.). https://pypi.org/project/libreface/

[18] Emotiva. (2023, 5 febrero). Action Units- emotiva. https://emotiva.it/en/ actionunits/

[19] MagicFace: High-Fidelity Facial Expression Editing with Action-Unit Control. (s. f.). https://arxiv.org/html/2501.02260v1

[20] Navarro, S. (2024, 28 noviembre). LSTM bidireccionales: cómo implementar las KeepCoding Bootcamps. https://keepcoding.io/blog/ lstm-bidireccionales-como-implementarlas

[21] Janno, M. (2020, 21 enero). *Deception detection on the bag-of-lies dataset*. Medium. Recuperado 14 de septiembre de 2025, de https://medium.com/@madisjanno/deception-detection-on-the-bag-of-lies-dataset-3ad65aac9033

[22] Deception detection in videos using the facial Action coding system. (s. f.). *Sin nombre*. Recuperado 14 de septiembre de 2025, de https://arxiv.org/pdf/2105.13659.

[23] Karvat Camara, M., Maul, T. H., Postal, A., & Paetzold, G. (2023, 18 agosto). *Can lies be faked? Comparing low-stakes and high-stakes deception video datasets from a machine learning perspective*. Arxiv. Recuperado 14 de septiembre de 2025, de https://arxiv.org/pdf/2211.13035

[24] Kleinberg, B., Arntz, A., & Verschuere, B. (2019). Being accurate about accuracy in verbal deception detection. *PLoS ONE*, *14*(8), e0220228. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220228

[25] Casado Beinat, N. (2022). Redes neuronales convolucionales y aplicaciones.

[26] Contributors, P. (s. f.). *Torch.nn*. https://docs.pytorch.org/docs/2.11/nn.html#padding-layers

[27] *Glossary · Hugging face*. (s. f.). https://huggingface.co/docs/transformers/glossary

[28] Mucci, T. (2025, 17 noviembre). Data leakage machine learning. *IBM*. https://www.ibm.com/think/topics/data-leakage-machine-learning

[29] Jaadi, Z. (2025, 29 julio). *Data Standardization: How to Do It and Why It Matters*. Built In. https://builtin.com/data-science/when-and-why-standardize-your-data

[30] N. Sainath, T. (s. f.). CONVOLUTIONAL, LONG SHORT-TERM MEMORY, FULLY CONNECTED DEEP NEURAL NETWORKS. *Google, Inc*. https://static.googleusercontent.com/media/research.google.com/es//pubs/archive/43455.pdf

[31] GeeksforGeeks. (2025, 18 julio). *Regularization by Early Stopping*. GeeksforGeeks. https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/regularization-by-early-stopping/

[32] *Fundamentals of deep learning: Designing Next-Generation Machine Intelligence Algortihms* (2.ª ed.). (2033). O'reilly

[33] *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems* (2.ª ed.). (2019). O'reilly

Diseño y Desarrollo de una Silla de Ruedas Inteligente Controlada por Voz para Personas con Cuadriplejía

Juan Jose Bernal Segura
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central - Docente Universitaria Uniagustiniana
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
jjbernals@itc.edu.co

Juan David Villamil Gallego
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Semillero Mecatrónica aplicada a la industria y eficiencia energética
Bogotá, Colombia
jdvillamilg@itc.edu.co

Sara Alejandra Villareal Suarez
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Semillero Mecatrónica aplicada a la industria y eficiencia energética
Bogotá, Colombia
savillareals@itc.edu.co

David Alejandro Madrigal Forero
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Semillero Mecatrónica aplicada a la industria y eficiencia energética
Bogotá, Colombia
damadrigalf@itc.edu.co

Resumen: ***El presente proyecto propone el diseño y desarrollo de una silla de ruedas inteligente controlada por voz para personas con cuadriplejía con limitaciones en la movilidad de las extremidades superiores e inferiores. El sistema integra un microcontrolador como unidad de procesamiento, motores eléctricos con tracción diferencial y sensores ultrasónicos para la detección de obstáculos, lo que permite el desplazamiento seguro sin intervención asistida. Las pruebas en interiores demostraron una respuesta estable a comandos básicos como avanzar, retroceder y girar, así como un funcionamiento seguro gracias a la detección proactiva de obstáculos. Se evidencia la viabilidad técnica de implementar una solución de movilidad asistida de bajo costo basada en principios de mecatrónica aplicada y sistemas embebidos, con el objetivo de reforzar la autonomía y la inclusión social.***

Palabras clave: cuadriplejía, movilidad asistida, reconocimiento de voz, sistemas embebidos.

I. INTRODUCCIÓN

La movilidad representa un factor clave en la autonomía y calidad de vida de las personas, en el caso de personas con cuadriplejía, la limitación severa del movimiento en las extremidades superiores e inferiores restringe significativamente su capacidad de desplazarse de forma independiente. Aunque existen sillas de ruedas eléctricas, la mayoría de estas requieren el uso de joysticks u otros dispositivos manuales, lo que limita su funcionalidad para usuarios con movilidad reducida en brazos y manos [1], [3].

En los últimos años, múltiples investigaciones han explorado alternativas de control para sistemas de movilidad asistida, incluyendo el uso de comandos de voz, interfaces cerebro-computador y otras tecnologías emergentes [5], [7]. En particular, estudios recientes han demostrado la viabilidad de implementar sillas de ruedas controladas por voz mediante microcontroladores y sistemas embebidos, destacando su potencial como soluciones accesibles y de bajo costo [12], [13]. Asimismo, proyectos de diseño aplicados han evidenciado la importancia de integrar sistemas de control intuitivos con mecanismos de seguridad, como la detección de obstáculos, para mejorar la experiencia del usuario [14], [15].

Adicionalmente, el desarrollo de tecnologías de asistencia de bajo costo ha sido identificado como una línea clave para ampliar el acceso a soluciones de movilidad en poblaciones con discapacidad motriz severa, priorizando la funcionalidad, accesibilidad y adaptabilidad de los sistemas [16]. Estos enfoques resaltan la necesidad de propuestas que no solo sean técnicamente viables, sino también socialmente pertinentes.

En este contexto, el presente proyecto propone el diseño e implementación de un sistema de movilidad asistida controlado por comandos de voz. La solución integra elementos de mecatrónica y sistemas embebidos, permitiendo al usuario interactuar con el sistema sin necesidad de control físico manual.

Desde una perspectiva tanto técnica como social, se busca desarrollar un prototipo funcional, eficiente y de bajo costo que contribuya a mejorar la autonomía del usuario y promueva una mayor inclusión tecnológica para personas con discapacidad motriz severa.

II. MARCO TEORICO

La movilidad es una necesidad fundamental para la autonomía y el desarrollo personal. En personas con cuadriplejía, la limitación severa del movimiento en las extremidades superiores e inferiores que reduce significativamente su

independencia, especialmente en actividades de desplazamiento. Por esta razón, la ingeniería ha orientado parte de sus esfuerzos al desarrollo de tecnologías de asistencia que permitan mejorar la calidad de vida de esta población mediante sistemas de movilidad asistida [1], [7].

Las sillas de ruedas eléctricas representan un avance importante frente a los modelos manuales, ya que incorporan sistemas de propulsión que facilitan el desplazamiento sin esfuerzo físico. Sin embargo, la mayoría de estos dispositivos requieren el uso de joysticks u otros controles manuales, lo que limita su uso en personas con movilidad reducida en brazos y manos. Esta situación ha impulsado la investigación en interfaces alternativas de control, como el reconocimiento de voz, que permite una interacción más natural y accesible [2]–[4], [12], [13].

Desde el punto de vista técnico, muchos sistemas de movilidad asistida se basan en el principio de propulsión independiente en cada rueda motriz, lo que permite controlar el desplazamiento mediante la variación de velocidad entre ambos lados. Este enfoque, ampliamente utilizado en robótica móvil, facilita la ejecución de maniobras como avance, retroceso y giro con un alto grado de precisión y eficiencia.

El núcleo de este tipo de soluciones es el sistema embebido, el cual integra componentes electrónicos y software para ejecutar funciones específicas en tiempo real. En este contexto, el microcontrolador actúa como unidad central de procesamiento, encargándose de recibir, interpretar y procesar los comandos del usuario, para luego generar las señales de control necesarias sobre los actuadores del sistema. Esta integración permite una interacción coordinada entre hardware y software, garantizando un funcionamiento estable y eficiente [9]–[11].

El reconocimiento de voz constituye una de las principales interfaces de interacción en sistemas de asistencia modernos. A través de la captura y procesamiento de señales de audio, es posible identificar comandos previamente definidos y traducirlos en acciones de control. No obstante, esta tecnología puede verse afectada por factores como el ruido ambiental, lo que representa un desafío en su implementación práctica y ha sido objeto de estudio en diferentes desarrollos recientes [12]–[14].

Para complementar el sistema y mejorar la seguridad, se emplean sensores ultrasónicos para la detección de obstáculos. Estos dispositivos funcionan mediante la emisión de ondas sonoras de alta frecuencia y el análisis del tiempo de retorno del eco, permitiendo estimar distancias con respecto a objetos cercanos. La integración de estos sensores en sistemas de movilidad asistida ha demostrado ser efectiva para prevenir colisiones y mejorar la seguridad del usuario durante el desplazamiento [14], [15].

Finalmente, el desarrollo de tecnologías de asistencia de bajo costo se ha consolidado como una línea de investigación relevante, orientada a ampliar el acceso a soluciones funcionales para personas con discapacidad motriz severa. En este sentido, la integración de control por voz, sistemas embebidos y sensores demuestra cómo los principios de la mecatrónica y la automatización pueden aplicarse para dar respuesta a necesidades reales, promoviendo la inclusión y la autonomía desde una perspectiva tecnológica y social [15], [16].

III. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

a. Arquitectura Mecánica

La arquitectura mecánica del prototipo se modeló y simuló en SolidWorks, figura 1 y figura2, lo que permitió adaptar una silla de ruedas convencional a un sistema motorizado. A través del diseño 3D, fue posible analizar la distribución de los componentes antes de su montaje físico, asegurando la estabilidad y viabilidad estructural [1], [2].

El sistema incorpora dos motores de corriente continua acoplados a las ruedas principales, trabajando bajo el principio de tracción diferencial. Esto significa que cada rueda puede girar de forma independiente, permitiendo avanzar, retroceder o girar mediante la variación de velocidad entre ambos lados [12].

Durante el diseño se consideró el peso adicional de la batería de 24 V y los componentes electrónicos, evaluando el centro de gravedad y la estabilidad general. Los motores fueron ubicados estratégicamente en la parte trasera para optimizar el desempeño mecánico, mientras que la batería y la electrónica se instalaron en un compartimiento inferior protegido, garantizando así de esta manera seguridad y facilidad de mantenimiento sin afectar la comodidad del usuario [3], [4].



Figura 1. Modelado tridimensional del sistema en SolidWorks



Figura 2. Diseño del compartimiento inferior para integración electrónica en SolidWorks.

a.

La segunda propuesta de modelado tridimensional se enfocó en el diseño del compartimiento inferior destinado a la integración de los componentes electrónicos y de alimentación del sistema. Esta estructura fue diseñada como una bandeja de soporte ubicada en la parte baja de la silla, permitiendo organizar de manera segura elementos como la batería, el Arduino, el módulo Voice V3 y los controladores de potencia [2].

Durante el modelado se buscó optimizar la distribución interna de los componentes para aprovechar el espacio disponible y facilitar el acceso durante tareas de mantenimiento o conexión. Además, la ubicación inferior de la bandeja contribuye a mantener un centro de gravedad más estable, mejorando el equilibrio general del prototipo durante el desplazamiento [1].

El diseño también tuvo en cuenta aspectos relacionados con protección mecánica, ventilación y organización del cableado, evitando interferencias entre los módulos electrónicos y reduciendo riesgos asociados al movimiento o vibraciones del sistema. Esta integración permitió consolidar una arquitectura más compacta, funcional y adecuada para la implementación física del prototipo.

b. Arquitectura Electrónica

El sistema electrónico se organizó bajo una arquitectura embebida centralizada, donde el microcontrolador actúa como el núcleo de procesamiento. Este recibe los comandos de voz, e interpreta y genera las señales necesarias para controlar los motores [12], [13].

La alimentación proviene de una batería de 24 V, destinada principalmente a la etapa de potencia. Cada motor es controlado de manera independiente mediante un driver TB6600, lo que permite regular la velocidad y el sentido de giro, haciendo posible la tracción diferencial, figura 3.

Además, se integraron sensores ultrasónicos en la parte frontal para detectar obstáculos. Estos envían información al microcontrolador en tiempo real, permitiendo detener el sistema si identifica un objeto cercano. Para mejorar la estabilidad y proteger los componentes, se mantuvo una separación entre la etapa de potencia y la etapa de control lógico [12], [14].

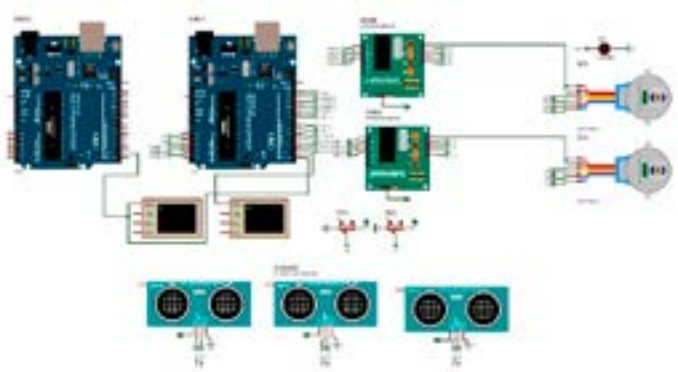


Figura 3. Simulación del sistema electrónico en Proteus.

El sistema de control fue desarrollado bajo un esquema reactivo con retroalimentación, permitiendo supervisar continuamente el entorno y ejecutar acciones en tiempo real a partir de las señales recibidas. El funcionamiento del sistema se basa en la recepción de comandos mediante comunicación serial a través de los pines TX y RX, permitiendo que las instrucciones sean enviadas al microcontrolador encargado de procesarlas y ejecutar las acciones correspondientes. Este mecanismo opera de manera similar al comportamiento de un módulo de reconocimiento de voz, el cual transmite comandos hacia el sistema de control para su posterior ejecución en tiempo real [12], [15].

Para realizar la simulación del módulo de reconocimiento de voz, se utilizaron dos Arduino de apoyo: uno configurado como transmisor y otro como receptor. El Arduino transmisor se encargó de generar y enviar las señales seriales, simulando el envío de comandos del módulo de voz, mientras que el Arduino receptor recibió dichas instrucciones para verificar el funcionamiento correcto del sistema, figura 4.

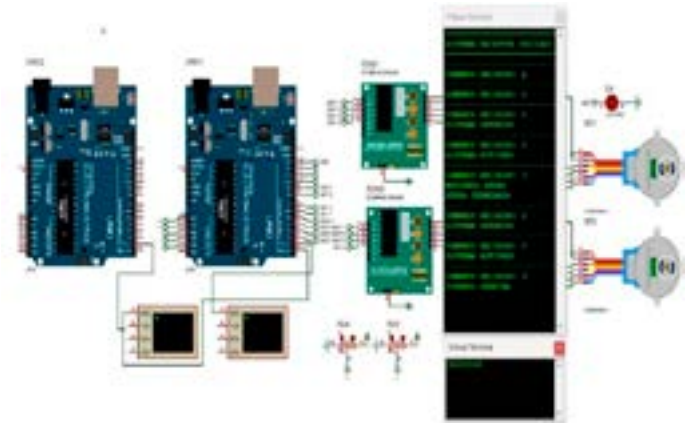


Figura 4. Simulación del control direccional mediante Voice V3 en Proteus.

Como método alternativo de control y simulación de movimiento, se integró un joystick KY-023, cuyo funcionamiento se basa en la variación porcentual de los

potenciómetros internos en los ejes X y Y. Dependiendo del porcentaje detectado, el sistema interpreta una dirección específica de desplazamiento. Por ejemplo, determinados valores en el eje X generan movimientos hacia la izquierda o derecha, mientras que variaciones en el eje Y permiten ejecutar movimientos de avance o retroceso. Esta configuración permitió simular de manera precisa el comportamiento direccional del sistema durante las pruebas [13].

De forma similar, los sensores ultrasónicos fueron configurados considerando rangos definidos mediante valores porcentuales, permitiendo ajustar la distancia de detección de obstáculos según las necesidades de operación. Gracias a ello, el sistema puede supervisar continuamente el entorno y detener el movimiento automáticamente cuando se detecta un objeto dentro del rango de seguridad establecido.

El desplazamiento del prototipo se realiza mediante un sistema de propulsión independiente en cada rueda, lo que permite controlar la dirección y maniobrabilidad a través de la variación de velocidad entre ambos lados. Esta configuración facilita movimientos de avance, retroceso y giro con mayor estabilidad y control [2].

En conjunto, la integración entre comunicación serial, procesamiento embebido, sensores y control de movimiento evidencia la aplicación de principios de automatización y sistemas electrónicos en el desarrollo de una solución funcional orientada a mejorar la movilidad asistida.

IV. ANALISIS ENERGETICO Y AUTONOMIA DEL SISTEMA

Con el propósito de evaluar el comportamiento energético del prototipo y verificar que la batería seleccionada cumple con los requerimientos del sistema, se realizó un análisis de consumo eléctrico considerando tanto la etapa de potencia como la etapa lógica. Este análisis permitió estimar la potencia total demandada durante la operación y calcular la autonomía teórica del prototipo bajo condiciones nominales de funcionamiento [2].

a. Consumo de Potencia del Sistema

El cálculo de potencia se realizó a partir de los valores nominales de voltaje y corriente de operación del sistema. Inicialmente, se determinó el consumo correspondiente a la etapa de potencia y posteriormente se calcularon las pérdidas asociadas al sistema de control y al consumo lógico general.

Tabla I. Cálculo de potencia del sistema

	Datos de Entrada	Resultado
Potencia por motor NEMA 23	$V = 24\ V, I = 2\ A$	$48\ W$
Potencia total motores	$P_{motor} = 48\ W$	$96\ W$
Potencia disipada por driver TB6600	$I = 2\ A, Rds\_on = 0.5\ \Omega$	$2\ W$
Potencia total drivers	$P_{disipada} = 2\ W$	$4\ W$
Consumo Arduino	$V = 5\ V, I = 0.05\ A$	$0.25\ W$
Consumo Voice V3	$V = 5\ V, I = 0.04\ A$	$0.20\ W$
Consumo KY-023 Joystick	$V = 5\ V, I = 0.01\ A$	$0.05\ W$
Consumo sensores ultrasónicos	$V = 5\ V, I = 0.045\ A$	$0.225\ W$
Consumo LED	$V = 5\ V, I = 0.02\ A$	$0.10\ W$
Potencia lógica total	Componentes lógicos	$0.825\ W$
Potencia total sistema	$96 + 4 + 0.825$	$100.8\ W$

De acuerdo con los resultados obtenidos y resumidos en la tabla I, la potencia total estimada del sistema es aproximadamente de 100.8 W. Asimismo, se observó que la mayor demanda energética proviene de la etapa encargada del desplazamiento, mientras que el consumo lógico representa una carga considerablemente menor. Esto evidencia una distribución energética adecuada y confirma que la batería seleccionada es coherente con los requerimientos del prototipo [12].

b. Cálculo de Autonomía

Una vez obtenida la potencia total del sistema, se estimó la autonomía teórica utilizando la capacidad nominal de la batería seleccionada, tabla II.

Tabla II. Cálculo de autonomía del sistema

	Datos de Entrada	Resultado
Energía batería principal	$Ah = 20, V = 24$	$480\ Wh$
Potencia total del sistema	$96\ W + 4\ W + 0.825\ W$	$\approx 100.8\ W$
Autonomía estimada del sistema	$E = 480\ Wh$, $P_{sistema} = 100.8\ W$	4.76 horas
Corriente total del sistema	$P = 100.8\ W, V = 24\ V$	$4.2\ A$
Consumo etapa lógica	$V = 5\ V, I = 0.165\ A$	$0.825\ W$
Eficiencia estimada	$P_{útil} = 96\ W, P_{total} = 100.8\ W$	$95.2\ \%$

Los cálculos realizados indican que el sistema puede alcanzar una autonomía aproximada de 4.76 horas de funcionamiento continuo bajo condiciones nominales. Este tiempo de operación resulta adecuado para pruebas en interiores y desplazamientos de corta o media duración [2].

Además, el análisis permitió comprobar que el consumo de la etapa lógica es bajo en comparación con la etapa de potencia, siendo el sistema de desplazamiento el principal responsable de la demanda energética total.

Es importante tener en cuenta que estos valores corresponden a condiciones ideales de operación. Factores como variaciones de carga, cambios de velocidad, inclinaciones del terreno o aceleraciones frecuentes pueden influir directamente en la autonomía real del sistema. Aun así, los resultados obtenidos validan el dimensionamiento energético del prototipo y demuestran que la configuración seleccionada es técnicamente viable para la aplicación propuesta.

V. METODOLOGIA

El desarrollo del prototipo se llevó a cabo mediante una metodología estructurada en cinco etapas, lo que permitió avanzar de forma organizada desde la definición del problema hasta la validación del sistema en funcionamiento.

En primer lugar, se realizó el análisis de requerimientos, donde se identificaron las principales limitaciones de las sillas de ruedas convencionales en usuarios con cuadriplejía. A partir de este análisis, se establecieron criterios de diseño como accesibilidad, seguridad, estabilidad y facilidad de uso, orientando el proyecto hacia una solución funcional y centrada en el usuario [1], [3], [16].

Posteriormente, se desarrolló el diseño mecánico del sistema mediante modelado tridimensional en SolidWorks. Esta etapa permitió definir la disposición de los componentes, evaluar la distribución de cargas, ubicar estratégicamente los motores y la batería, y verificar la estabilidad estructural del conjunto, asegurando la viabilidad del diseño antes de su construcción.

De manera paralela, se realizó el diseño electrónico utilizando simulación en Proteus. En esta fase se definió la arquitectura del sistema, incorporando un módulo de reconocimiento de voz como unidad de apoyo para la generación y transmisión de comandos hacia el microcontrolador principal, encargado del control directo de los actuadores. Asimismo, se estableció la separación entre la etapa de potencia (24 V), destinada a los motores, y la etapa de control lógico, integrando los drivers de potencia y los sensores ultrasónicos para garantizar una adecuada comunicación entre los módulos [15].

Como parte del proceso, se llevó a cabo un análisis energético para dimensionar la fuente de alimentación y estimar el consumo total del sistema. Se calcularon los requerimientos de potencia de los motores, las pérdidas en los drivers y el consumo de los sistemas de control, incluyendo el microcontrolador y el módulo de reconocimiento de voz, lo que permitió estimar la autonomía del prototipo y verificar la viabilidad de la batería seleccionada.

Una vez finalizadas las etapas de diseño, se procedió a la implementación física del prototipo. Esta fase incluyó el ensamblaje de los componentes, la programación del microcontrolador, la configuración del Arduino uno para el reconocimiento de voz y la integración del sistema para la ejecución de comandos básicos de desplazamiento.

Finalmente, se realizó la validación funcional en un entorno controlado, evaluando la respuesta del sistema ante los comandos de voz, la detección de obstáculos, la estabilidad del desplazamiento y el comportamiento general del prototipo. Esta etapa permitió confirmar la viabilidad técnica del sistema e identificar oportunidades de mejora.

VI. RESULTADOS

El desarrollo del prototipo permitió comprobar la viabilidad técnica de implementar un sistema de movilidad asistida controlado por voz mediante el uso de componentes electrónicos accesibles y de bajo costo. Durante las pruebas realizadas en entornos interiores, el sistema ejecutó correctamente comandos básicos como avanzar, retroceder, girar y detenerse, permitiendo el desplazamiento sin necesidad de interacción manual. Esto evidenció que la propuesta cumple con el objetivo principal de ofrecer una alternativa de movilidad más autónoma para personas con limitaciones motrices severas [12]–[14].

En relación con el sistema de control, se obtuvo una integración estable entre la transmisión de comandos mediante comunicación serial y el accionamiento de los motores. La transmisión de datos a través de los pines TX y RX permitió una comunicación adecuada entre el Arduino transmisor, utilizado

para representar el funcionamiento del módulo de reconocimiento de voz durante la simulación, y el Arduino receptor, encargado de procesar las instrucciones y ejecutar los movimientos del sistema. Asimismo, la simulación desarrollada en Proteus permitió validar el comportamiento del joystick KY-023 Joystick Module mediante variaciones porcentuales en los ejes X y Y, verificando la correcta interpretación de direcciones como avance, retroceso, izquierda y derecha.

Durante las pruebas realizadas bajo niveles moderados de ruido, el sistema presentó tiempos de respuesta estables y sin retrasos perceptibles en la ejecución de comandos simples. No obstante, en ambientes con mayor interferencia sonora se observó una ligera disminución en la precisión del reconocimiento de voz, comportamiento esperado debido a las limitaciones propias del módulo Voice V3 y a la sensibilidad del procesamiento de audio frente al ruido externo [11].

Por otra parte, la incorporación de sensores ultrasónicos permitió implementar un mecanismo básico de seguridad para la detección de obstáculos. El sistema logró identificar objetos a distancias cortas y detener automáticamente el desplazamiento cuando un obstáculo ingresaba al rango de seguridad establecido. Este comportamiento se mantuvo de forma consistente durante distintos recorridos y pruebas de operación en interiores [12].

Desde el punto de vista energético, los cálculos realizados mostraron un consumo aproximado de 100.8 W considerando la etapa de potencia y el sistema lógico. A partir de una batería de 24 V y 20 Ah, se estimó una autonomía teórica cercana a las 4.76 horas de funcionamiento continuo. Aunque la duración real puede variar dependiendo de factores como la carga mecánica, la velocidad de desplazamiento y la frecuencia de uso de los motores, los resultados obtenidos demostraron que el dimensionamiento energético del sistema es coherente con los requerimientos operativos del prototipo [2].

En términos generales, el prototipo presentó un comportamiento estable, una interacción intuitiva y una respuesta adecuada durante las pruebas funcionales. Sin embargo, también se identificaron algunas limitaciones relacionadas con la sensibilidad al ruido ambiental y la dependencia de comandos previamente configurados. Estas condiciones representan oportunidades de mejora para futuras versiones del sistema, especialmente mediante la incorporación de técnicas de procesamiento de señal más robustas y métodos avanzados de reconocimiento de voz.

VII. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que es posible desarrollar una solución de movilidad asistida funcional mediante la integración de componentes electrónicos accesibles y de bajo costo. La interacción entre el sistema de reconocimiento de voz, la unidad de control y los motores de tracción demostró que la arquitectura propuesta es adecuada para cumplir con los objetivos planteados, logrando un sistema estable y coherente en su funcionamiento [7].

Desde el punto de vista técnico, la implementación de un sistema de propulsión independiente en cada rueda permitió un control preciso del desplazamiento. La regulación diferencial de velocidad facilitó la ejecución de maniobras como avance, retroceso y giro con buena estabilidad, validando su efectividad como estrategia de control en plataformas móviles. Asimismo, la incorporación de sensores ultrasónicos aportó un nivel básico de seguridad, al introducir un mecanismo de retroalimentación capaz de detener el sistema ante la presencia de obstáculos.

En cuanto al sistema de reconocimiento de voz, se empleó el módulo Voice V3, el cual funciona mediante comunicación serial o pines GPIO y permite almacenar hasta 80 comandos de voz. Su funcionamiento se basa en la comparación de señales de audio con muestras previamente entrenadas, lo que facilita su implementación en sistemas embebidos de bajo costo. No obstante, durante el desarrollo se evidenció una limitación importante: el módulo solo permite cargar hasta siete comandos de forma simultánea, lo que restringe la cantidad de órdenes disponibles en tiempo real. Esta característica, junto con la sensibilidad al ruido ambiental observada en las pruebas, influye directamente en la flexibilidad y robustez del sistema [11].

Estas limitaciones ponen en evidencia la necesidad de fortalecer el procesamiento de señales, ya sea mediante técnicas de filtrado, mejora en la adquisición de audio o el uso de sistemas de reconocimiento de voz más avanzados. A pesar de ello, el desempeño obtenido en entornos controlados fue consistente con lo esperado para este tipo de tecnología, validando su viabilidad en aplicaciones de asistencia.

En comparación con sistemas comerciales de mayor costo, el prototipo desarrollado no pretende competir en términos de complejidad tecnológica, sino demostrar que es posible construir alternativas funcionales y accesibles. En este sentido, el proyecto no solo valida su viabilidad técnica, sino también su relevancia social, al proponer una solución que puede contribuir a mejorar la autonomía de personas con discapacidad motriz severa [1], [5], [16].

En conjunto, el proceso de diseño e implementación permitió evidenciar que el desempeño del sistema depende en gran medida de la integración coherente entre los subsistemas mecánico, electrónico y de control. Esta experiencia refuerza la importancia de un enfoque interdisciplinario en el desarrollo de soluciones de ingeniería orientadas a necesidades reales.

VIII. CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto permitió demostrar que es posible integrar sistemas mecánicos, electrónicos y de control en una solución de movilidad asistida orientada a personas con cuadriplejía, obteniendo un prototipo funcional y estable capaz de responder a necesidades reales de desplazamiento y autonomía [1], [16].

La arquitectura implementada evidenció una adecuada interacción entre el reconocimiento de voz, el procesamiento de señales y el accionamiento de los motores. La incorporación de comunicación serial entre microcontroladores permitió mejorar la coordinación de las tareas de control y validar la aplicación práctica de principios de automatización y sistemas embebidos en un entorno real.

El sistema de propulsión independiente en cada rueda permitió ejecutar movimientos de avance, retroceso y giro de manera controlada, proporcionando estabilidad durante el desplazamiento. De igual forma, la integración de sensores ultrasónicos fortaleció la seguridad del prototipo al permitir la detección automática de obstáculos y la interrupción del movimiento cuando se identificaban objetos dentro del rango de seguridad establecido.

En cuanto al desempeño energético, el análisis realizado confirmó que el dimensionamiento eléctrico del sistema es coherente con las condiciones de operación del prototipo. Los resultados obtenidos demostraron que la batería seleccionada proporciona una autonomía adecuada para pruebas y recorridos en interiores, manteniendo un equilibrio entre consumo energético y funcionamiento continuo.

Por otra parte, el módulo Voice V3 permitió implementar un sistema de reconocimiento de voz funcional y de bajo costo. Sin embargo, durante las pruebas se evidenciaron limitaciones relacionadas con la sensibilidad al ruido ambiental y la cantidad de comandos activos disponibles de forma simultánea, aspectos que pueden afectar el desempeño del sistema en entornos más complejos [11].

En términos generales, el proyecto permitió establecer una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en tecnologías de asistencia aplicadas a la movilidad inclusiva. Asimismo, demuestra que es posible desarrollar soluciones accesibles utilizando componentes comerciales y herramientas de simulación, manteniendo un enfoque funcional, técnico y social orientado a fortalecer la autonomía de personas con discapacidad motriz severa [6], [2].

IX. REFERENCIAS

[1] Amirjani, N., & Hawley, M. S. (2000). A review of assistive technology for spinal cord injury rehabilitation. PMCID: PMC10758377. [https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10758377/].

[2] Bolaños, N. H., & Hernández, J. (2023). Diseño y construcción de una silla de ruedas motorizada con sistema de asistencia para personas con discapacidad motora. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. [https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10758377/https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/074619c4-ff17-46ba-aae9-7e2432200f82/content].

[3] Model Systems Knowledge Translation Center. (s. f.). Power wheelchair: What consumers with spinal cord injury need to know. [https://msktc.org/sci/factsheets/power-wheelchair-what-spinal-cord-injury-consumer-needs-know].

[4] Red Man Power Chair. (s. f.). Standing wheelchairs for paraplegics and quadriplegics. [https://www.redmanpowerchair.com/standing-wheelchairs-for-paraplegics-and-quadriplegics/].

[5] Cobo, F. (2021, marzo 22). Personas con tetraplejia pueden controlar con la mente una silla de ruedas. Business Insider España. [https://www.businessinsider.es/archivo/personas-tetraplejia-controlan-mente-silla-ruedas-1159267].

[6] El Tiempo. (2007, agosto 4). El futuro de las sillas de ruedas: avances tecnológicos en movilidad asistida. El Tiempo. [https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16667581].

[7] García, A. C., & Pérez, L. M. (2023). Tecnologías de apoyo para personas con discapacidad motriz severa: revisión de casos y tendencias. Revista de Tecnología y Discapacidad,4(4),56-74.[https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16667581].

[8] P. Kundur, "Power System Stability and Control," McGraw-Hill, 1994.

[9] Arduino.cc, "Stepper Motor Control - Arduino Reference," [https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/stepper/].

[10] StepperOnline, "NEMA 23 Stepper Motor Datasheet - 57HD4016-01," [https://www.stepperonline.com/nema-23-bipolar-1-8deg-1-2nm-170oz-in-2a-5-2v-57x57x54mm-4-wires-57hd4016-01].

[11] Elechouse, "Voice Recognition Module V3 Datasheet," [https://uelectronics.com/producto/modulo-de-reconocimiento-de-voz-elechouse-v3/?srsltid=AfmBOopbh0KJXDiRlP_d4YPkwArl1Kxt47x-RDp6ftDRVwtuyvD6R7BU].

[12] K. R. Kumar, P. S. Reddy, and M. V. Kumar, “Arduino-Based Voice Controlled Wheelchair,” ResearchGate, 2019. [https://www.researchgate.net/publication/337019334_Arduino_based_voice_controlled_wheelchair].

[13] A. Sharma and R. Gupta, “Voice Controlled Wheelchair Using Arduino,” International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 11, no. 4, 2024. [https://www.irjet.net/archives/V11/i4/IRJET-V11I404.pdf].

[14] S. Patel, D. Mehta, and R. Shah, “Design and Development of Voice Controlled Wheelchair for Disabled People,” International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET), vol. 12, no. 5, 2025.[https://iarjset.com/wp-content/uploads/2025/05/IARJSET.2025.125197.pdf]

[15] University of Rochester, “WheelTalk: Controlling Electric Wheelchairs Using Voice Commands,” Senior Design Project, 2023. [https://www.hajim.rochester.edu/senior-design-day/wheeltalk-controlling-electric-wheelchairs-using-voice-commands/].

[16] J.A.Rodríguez et al., “Desarrollo de tecnología de asistencia de bajo costo para persones en condición de cuadriplejía: caso de estudio,” ResearchGate, 2020. [https://www.researchgate.net/publication/340508013].

Marco operacional para una solución basada en proxy-caché en la infraestructura del grupo de investigación GRID de la Universidad del Quindío

[1] Santiago Quintero-Uribe
Facultad de Ingeniería
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
santiago.quinterou@uqvirtual.edu.co

[2] Andrés F. Zúñiga-Zuluaga
Facultad de Ingeniería
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
andresf.zunigaz@uqvirtual.edu.co

[3] Juan M. Perdomo-Cárdenas
Facultad de Ingeniería
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
juanm.perdomo@uqvirtual.edu.co

[4] Luis E. Sepúlveda-Rodríguez
Facultad de Ingeniería
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
lesepulveda@uniquindio.edu.co

***Resumen*—En infraestructuras de TI académicas se soportan cargas de trabajo como laboratorios, virtualización, servicios web y acceso recurrente a recursos digitales. En este contexto, problemas como la latencia, el uso ineficiente del ancho de banda, la baja visibilidad operativa y la pérdida de confianza en los servicios expuestos pueden afectar la continuidad de actividades de docencia, investigación y extensión. En respuesta, este trabajo propone un marco operacional para orientar el análisis de requerimientos, la selección de herramientas, el diseño, la implementación y la validación de una solución basada en proxy-caché. El estudio se desarrolla en el Grupo de Investigación de Redes, Información y Distribución (GRID) de la Universidad del Quindío, adoptado como caso de estudio de una problemática presente en entornos académicos con requerimientos intensivos de red. La metodología combina prácticas ágiles con prácticas clásicas apoyadas en PMBOK, CMMI y TOGAF, organizadas en cinco fases: i) identificación de necesidades, problemas y oportunidades junto con la definición de criterios; ii) exploración y soporte a la decisión tecnológica mediante estudio de mapeo sistemático y DAR; iii) diseño de la arquitectura y del plan de pruebas; iv) implementación del prototipo; y v) validación del prototipo. Los resultados incluyen la caracterización del problema, la definición de criterios para evaluar alternativas y una taxonomía para clasificar la literatura del mapeo sistemático. Se espera que las fases siguientes entreguen una arquitectura por capas, un prototipo validado y métricas útiles para reducir tiempos de respuesta, controlar el ancho de banda y fortalecer la confiabilidad de los servicios.**

Palabras clave—Proxy-caché, infraestructura de red, dashboard.

I. Introducción

Las infraestructuras de red de apoyo académico cumplen un papel decisivo en la formación práctica de estudiantes de ingeniería, especialmente cuando soportan actividades de laboratorio y el acceso a entornos virtuales de aprendizaje y experimentación, junto con recursos digitales de uso recurrente, entre ellos imágenes de sistema, contenedores y software especializado [1], [2]. En estos entornos, la eficiencia en el acceso a los recursos no depende únicamente de la conectividad disponible, sino también de la existencia de mecanismos de almacenamiento temporal, control de tráfico, monitoreo continuo y seguridad en el acceso a los servicios institucionales [3], [4].

En múltiples entornos de educación superior, estas condiciones inciden directamente en la continuidad de clases prácticas, la disponibilidad de recursos compartidos y la experiencia de uso de servicios que apoyan actividades de docencia e investigación. Por ello, una solución proxy-caché adquiere valor no solo como mecanismo de aceleración de descargas, sino como componente de una estrategia más amplia de gobernanza del tráfico, priorización del uso académico, observabilidad del comportamiento de red y fortalecimiento de la confiabilidad de los servicios [4]–[6].

Este trabajo aborda esa problemática en el contexto del Grupo de Investigación de Redes, Información y Distribución (GRID) de la Universidad del Quindío, cuya infraestructura tecnológica presta soporte a procesos misionales de docencia, investigación y extensión. En este caso de aplicación, la ausencia de una solución basada en proxy-caché limita la gestión de archivos de gran tamaño, la priorización del tráfico académico, la visibilidad sobre el consumo de red y la confianza en los servicios expuestos hacia la comunidad académica.

Bajo esta perspectiva, el objetivo del proyecto es establecer un marco operacional que sirva como base para la selección, diseño, implementación y validación de una solución proxy-caché. Más que proponer una herramienta aislada, el trabajo busca articular diagnóstico, criterios de decisión, revisión de evidencia, diseño arquitectónico, implementación y validación, de manera que el resultado sea útil tanto para resolver una necesidad concreta como para ofrecer una ruta metodológica aplicable a entornos académicos con demandas semejantes.

Este documento presenta los avances de un trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero de Sistemas y Computación, desarrollado en el semillero del grupo de investigación GRID y organizado en cinco fases metodológicas que permiten distinguir entre productos ya consolidados y resultados esperados de las etapas posteriores. Esta aproximación permite mostrar el valor actual del proyecto sin desligarlo de las condiciones reales en las que se desarrollan iniciativas de mejora de infraestructura en contextos académicos.

II. Contexto del problema y pertinencia para la educación en ingeniería

En entornos académicos que dependen de laboratorios, virtualización y servicios digitales especializados, la disponibilidad oportuna de recursos de red condiciona la calidad de la experiencia formativa y la continuidad de actividades de investigación. Cuando no existen mecanismos de caché, priorización del tráfico, monitoreo o aseguramiento de servicios,

problemas como la latencia, el consumo ineficiente del ancho de banda y la baja confianza en el acceso web escalan más allá de la dimensión técnica y comprometen procesos misionales.

El caso del GRID permite observar esta situación en un contexto concreto. El grupo cuenta con una infraestructura conformada por servidores, dispositivos de comunicaciones y servicios de TI que apoyan procesos de docencia, investigación y extensión. Sin embargo, la ausencia de una solución basada en proxy-caché se traduce en limitaciones operativas que inciden de forma directa en el desarrollo de experiencias formativas y de investigación.

En primer lugar, se identificó que el rendimiento de descarga es deficiente debido a un cuello de botella entre la velocidad de la red administrada por el GRID y la red administrada por el área de TI de la Universidad del Quindío. Esta situación afecta especialmente actividades de docencia práctica y laboratorio, en las que es frecuente el uso de archivos de gran tamaño, como imágenes ISO, contenedores o software especializado. En segundo lugar, existe preocupación por el uso no misional del ancho de banda, pues el consumo de red con fines de entretenimiento puede afectar procesos académicos que dependen de una conectividad estable, incluyendo clases virtuales y actividades experimentales. Finalmente, se identificó una limitación de seguridad y confianza relacionada con el uso de certificados autofirmados en servicios web del grupo, lo que impide ofrecer condiciones sólidas de acceso confiable para usuarios externos e internos.

Desde una perspectiva de educación en ingeniería, esta problemática resulta relevante por al menos tres razones. En instituciones de educación superior, la eficiencia en el uso del ancho de banda y la posibilidad de gestionar el tráfico académico son factores que inciden de forma directa en la calidad de los servicios de apoyo a la formación y al trabajo práctico. La primera es que la infraestructura del grupo constituye un entorno real de aprendizaje y experimentación, de modo que sus restricciones técnicas repercuten directamente en la calidad de la formación [7]. La segunda es que el problema integra dimensiones tecnológicas, arquitectónicas, operativas y de gestión, convirtiéndolo en un caso de estudio pertinente para un trabajo de aplicación tomado desde múltiples perspectivas, siguiendo un proceso metodológico riguroso, que parte de una especificación de una necesidad o problema real, pasando por la selección formal de herramientas, diseño de solución, implementación y evaluación. La tercera es que el resultado esperado no se limita a una mejora local, sino que busca producir un marco metodológico y técnico que ayude a estructurar decisiones sobre infraestructura, gobernanza del tráfico y observabilidad en escenarios académicos con necesidades afines.

De esta manera, el aporte del trabajo no consiste únicamente en proponer una herramienta específica, sino en estructurar un marco operacional que conecte diagnóstico, criterios de selección, revisión de evidencia, diseño arquitectónico y validación progresiva.

III. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolla como un trabajo de aplicación con una secuencia metodológica alineada con el objetivo general de establecer un marco operacional para una solución basada en proxy-caché. Desde el punto de vista de gestión, esta secuencia combina prácticas ágiles con prácticas clásicas y toma como referentes PMBOK, CMMI y TOGAF [8]–[10]. Para efectos del trabajo, la metodología se organiza en cinco fases, cada una correspondiente a un objetivo del proyecto: i) identificación de necesidades, problemas y oportunidades, junto con la definición de criterios para la aplicación; ii) exploración y soporte a la decisión tecnológica mediante estudio de mapeo sistemático y DAR; iii) diseño de la arquitectura de la solución y del plan de pruebas; iv) implementación del prototipo; y v) validación del prototipo mediante el plan de pruebas.

La Fig. 1 sintetiza el flujo metodológico general del proyecto y muestra la relación secuencial entre el problema identificado en la infraestructura, las cinco fases de desarrollo y los principales productos esperados en cada una de ellas.

A. Fase 1: Identificación de necesidades, problemas y oportunidades y definición de criterios

La primera fase metodológica se orientó a comprender el contexto operativo del GRID y a delimitar la problemática que el marco operacional debía abordar. Para ello se diseñó y aplicó una entrevista estructurada, implementada mediante *Google Forms*, a un actor con conocimiento directo de la infraestructura y de sus dinámicas de administración.

La información recolectada se organizó mediante análisis categorial, distinguiendo necesidades, problemas y oportunidades. A partir de esta caracterización, se desarrolló una segunda actividad dentro de la misma fase, consistente en traducir los hallazgos del diagnóstico en criterios para orientar la evaluación y el diseño de la solución. Estos criterios se agruparon en dimensiones funcionales, técnicas, de monitoreo y de gobernanza, con el fin de convertir el diagnóstico inicial en un insumo operativo para las fases posteriores.

Metodológicamente, esta fase permitió construir una línea base del problema, delimitar el alcance funcional esperado para la solución y establecer las condiciones que luego sirven para comparar alternativas tecnológicas, justificar decisiones de diseño y orientar la implementación del prototipo.

B. Fase 2: Estudio de mapeo sistemático y soporte a la decisión tecnológica

La segunda fase se concibe como un frente de exploración y apoyo a la toma de decisiones tecnológicas. Para ello, el proyecto incorpora un estudio de mapeo sistemático (SMS) orientado a identificar herramientas, modelos, metodologías y buenas prácticas relacionadas con tecnologías proxy o proxy-caché y con el tratamiento de archivos de gran tamaño de acceso frecuente en caché [11].

En esta fase se definió un protocolo general de trabajo que incluye la formulación de objetivos y preguntas de investigación, la delimitación de criterios de búsqueda y selección, y el diseño de una taxonomía para clasificar la literatura recuperada. De manera complementaria, esta fase contempla el uso del proceso *Decision Analysis and Resolution* (DAR) de CMMI como mecanismo para apoyar la selección objetiva de herramientas a partir de los criterios definidos en la fase anterior y de la evidencia organizada mediante el SMS [9].



Fig. 1. Flujo metodológico general del proyecto y productos esperados.

En este sentido, la segunda fase articula exploración y decisión: primero amplía el panorama de alternativas y referentes disponibles; luego proporciona una base estructurada para justificar la selección tecnológica que dará soporte a la solución propuesta.

C. *Fase 3: Diseño de arquitectura y plan de pruebas*

La tercera fase se orienta al diseño de la solución desde una perspectiva de arquitectura empresarial. Con base en los insumos producidos por el diagnóstico, los criterios de la solución y la evidencia organizada en la fase anterior, se plantea la especificación de una arquitectura por capas sustentada en TOGAF y representada mediante *ArchiMate* [10].

De forma paralela, esta fase contempla el diseño del plan de pruebas que posteriormente servirá para evaluar el comportamiento del prototipo. Dicho plan se concibe como un instrumento para definir qué atributos serán observados, qué métricas se recogerán y en qué condiciones se verificará el cumplimiento de los objetivos de la solución. Así, esta fase no solo estructura la arquitectura tecnológica, sino también la forma en que será evaluada en la etapa de validación.

D. *Fase 4: Implementación del prototipo*

La cuarta fase corresponde a la materialización de la solución mediante la implementación de un prototipo funcional en un entorno no productivo. Esta etapa toma como base las decisiones tecnológicas adoptadas previamente y la arquitectura definida en la tercera fase, con el propósito de construir una versión operativa que permita integrar los componentes principales de la solución.

Metodológicamente, la implementación del prototipo constituye el paso intermedio entre el diseño y la validación. En esta fase se espera concretar la configuración de herramientas, la articulación de componentes de monitoreo y un *dashboard*, y la preparación del entorno sobre el cual se ejecutarán las pruebas posteriores [12].

E. *Fase 5: Validación del prototipo*

La quinta fase se centra en la validación del prototipo con base en el plan de pruebas diseñado previamente. Su propósito es obtener métricas de desempeño asociadas a latencia, consumo de ancho de banda, comportamiento de caché, priorización del tráfico y monitoreo mediante un *dashboard*, de modo que sea posible valorar el comportamiento de la solución en relación con las necesidades identificadas en el contexto del GRID.

En consecuencia, esta fase proporciona el cierre metodológico del proyecto, ya que permite contrastar la solución implementada con los objetivos definidos, identificar brechas de mejora y formular recomendaciones para trabajo futuro.

IV. Resultados

El proyecto se encuentra en desarrollo, por lo cual los resultados presentados a continuación se organizan de acuerdo con las cinco fases metodológicas descritas. Esta estructura permite diferenciar con claridad qué productos ya fueron obtenidos y cuáles corresponden a resultados en curso o esperados en las fases posteriores, resaltando el valor práctico que ya ofrecen las etapas concluidas en el trabajo.

A. *Resultados de la fase 1: caracterización del problema y definición de criterios*

El primer resultado consolidado del proyecto corresponde a la caracterización de necesidades, problemas y oportunidades del contexto GRID. Este resultado permitió pasar de una percepción general centrada en mejorar descargas a una comprensión más amplia de la problemática, en la que intervienen dimensiones de rendimiento, gobernanza, monitoreo, seguridad y confianza. En términos de necesidades, se identificó la conveniencia de contar con un repositorio local para archivos de gran tamaño, mecanismos de priorización del tráfico académico, capacidades de monitoreo detallado y automatización de certificados digitales. En términos de problemas, se evidenciaron cuellos de botella en descargas, afectación de actividades prácticas, uso no misional del ancho de banda y exposición de servicios con certificados autofirmados. En términos de oportunidades, se reconoció la posibilidad de estructurar una solución con capacidades de filtrado, control, observabilidad y apoyo a decisiones basadas en indicadores.

La Tabla I sintetiza las necesidades, problemas y oportunidades (NN. PP. OO.) identificados durante la primera fase. Esta organización permite observar que la problemática no se concentra únicamente en el rendimiento de descarga, sino que también comprende seguridad, monitoreo, gobernanza del consumo y oportunidades de mejora orientadas a la gestión operativa de la infraestructura.

Más allá del caso particular, este resultado muestra que la adopción de una solución proxy-caché en contextos académicos no debería justificarse únicamente por desempeño, sino también por su capacidad para ordenar el uso de la infraestructura, mejorar la experiencia de acceso a recursos críticos y proporcionar información útil para la gestión operativa.

TABLA I. SÍNTESIS DE NECESIDADES, PROBLEMAS Y OPORTUNIDADES IDENTIFICADOS

Tipo	Síntesis	Implicación
Necesidad	Repositorio local de archivos grandes	Caché/almacenamiento local
Necesidad	Priorización del tráfico académico	Calidad de servicio (QoS) y control de tráfico
Necesidad	Métricas de uso y comportamiento	Monitoreo e indicadores
Necesidad	Certificados digitales confiables	Seguridad y confianza
Problema	Cuellos de botella en descargas	Reducción de latencia
Problema	Afectación de laboratorios y clases	Continuidad operativa
Problema	Uso no misional del ancho de banda	Gobernanza del consumo
Problema	Certificados autofirmados	Acceso web no confiable
Oportunidad	Filtrado y control del tráfico	Políticas de gobernanza
Oportunidad	Priorización por tipo de uso	Alineación misional
Oportunidad	Indicadores para decisión	*Dashboard* y analítica

Como segundo resultado de esta misma fase, la caracterización NN. PP. OO. se tradujo en un conjunto de criterios funcionales, técnicos, de monitoreo y de gobernanza. Este producto es relevante porque convierte el diagnóstico en un insumo operativo para la toma de decisiones posteriores. A partir de estos criterios puede construirse una matriz de caracterización para comparar alternativas tecnológicas y verificar, por ejemplo, si una herramienta soporta caché de archivos de gran tamaño, si permite priorización y control por políticas, si se integra con mecanismos de observabilidad, o si facilita la gestión de certificados digitales y el acceso seguro. En ese sentido, el valor de esta fase no radica solo en describir un problema local, sino en establecer una base de decisión reutilizable para procesos de selección tecnológica en infraestructuras académicas con requerimientos semejantes.

A partir de esta caracterización, la Tabla II presenta los criterios clave que orientan la selección y el diseño de la solución. Su valor dentro del proyecto radica en convertir el diagnóstico inicial en un marco operativo de decisión, útil para comparar alternativas tecnológicas y para delimitar los atributos que la solución debe satisfacer en términos funcionales, técnicos y de gestión.

TABLA II. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

Categoría	Criterios clave
Funcional	Caché de archivos grandes; calidad de servicio (QoS); listas de control de acceso (ACL); soporte a proxy transparente/inverso/estándar; gestión de certificados; control por usuario/rol
Técnico	Escalabilidad de almacenamiento; soporte a alta transferencia; integración con infraestructura existente; monitoreo en tiempo real; alta disponibilidad
Monitoreo	Consumo por usuario; tráfico por categoría; tiempos de respuesta; reportes exportables
Gobernanza	Políticas de uso; diferenciación entre tráfico misional y no misional; adaptación al contexto

B. *Resultados de la fase 2: estructuración del SMS y taxonomía de clasificación*

El tercer resultado parcial corresponde al avance de la segunda fase del proyecto. Hasta el momento, se cuenta con la estructuración metodológica del SMS como frente de apoyo a la toma de decisiones, incluyendo la definición del propósito del mapeo, la formulación inicial de preguntas de investigación y la delimitación de un protocolo general para búsqueda, depuración y clasificación de literatura.

Como parte de esta estructuración, el SMS se organizó siguiendo el enfoque *Goal-Question-Metric* (GQM). En este marco, se definieron dos objetivos principales. El primero, G1, buscó identificar herramientas tecnológicas, modelos, metodologías y buenas prácticas en la adopción e implementación de tecnologías proxy y sus casos de uso con caché. El segundo, G2, se orientó a identificar herramientas, modelos, metodologías y buenas prácticas para el tratamiento de archivos de gran tamaño de acceso frecuente en caché. A partir de estos objetivos se formularon dos preguntas de investigación: Q1, centrada en reconocer qué enfoques proxy o proxy-caché se aplican para reducir tiempos de descarga y acercar recursos a la infraestructura; y Q2, dirigida a identificar cómo se gestionan y almacenan en caché archivos de gran tamaño de acceso frecuente.

Este avance es relevante porque transforma la exploración bibliográfica en un proceso trazable y justificable. En lugar de depender de una revisión ad hoc, el proyecto dispone ya de una ruta metodológica para identificar evidencia útil sobre tecnologías proxy o proxy-caché, mecanismos de tratamiento de archivos de gran tamaño y referentes de implementación aplicables al contexto del GRID.

Como complemento de esta fase, se obtuvo además una taxonomía preliminar que permite organizar los estudios recuperados según su foco temático y el tipo de aporte reportado. La utilidad inmediata de esta taxonomía radica en que facilitará el análisis comparativo de la literatura e identificará qué trabajos aportan herramientas concretas, qué estudios reportan arquitecturas o metodologías, y cuáles documentan buenas

prácticas o evaluaciones comparativas útiles para el diseño del marco operacional. Asimismo, se cuenta con avances en la identificación de los artículos pertinentes en bases de datos como *IEEE Xplore, Web of Science, Springer, Taylor & Francis* y *Science Direct*, con un resultado de 61 estudios primarios evaluados luego de aplicar un proceso de *screening*, destacando herramientas como Nginx y Envoy Proxy. En términos de aporte, esta fase fortalece la trazabilidad de las decisiones tecnológicas y ayuda a reducir selecciones basadas únicamente en familiaridad previa o disponibilidad inmediata de herramientas.

Como producto parcial de esta fase, la Fig. 2 muestra la propuesta taxonómica construida para clasificar los estudios recuperados. Esta organización distingue, por un lado, los trabajos relacionados con tecnologías proxy o proxy-caché y, por otro, los estudios sobre tratamiento de archivos de gran tamaño, incorporando además una clasificación transversal por tipo de aporte. Su utilidad radica en facilitar el análisis comparativo de la literatura y en apoyar una selección tecnológica fundamentada en evidencia estructurada.

C. *Resultados en curso y resultados esperados en las fases posteriores*

El primer resultado en curso corresponde a la consolidación de la segunda fase. En esta etapa se espera culminar el SMS, completar la clasificación de la literatura recuperada y aplicar el proceso DAR para sustentar la selección objetiva de una herramienta o conjunto de herramientas para la solución. Su aporte esperado no es únicamente bibliográfico, sino operativo: suministrar bases comparativas para justificar decisiones tecnológicas con mayor solidez y con criterios que puedan sostenerse frente a necesidades reales de gestión de infraestructura.

El segundo resultado esperado corresponde a la tercera fase y consiste en la especificación y documentación de una arquitectura por capas para la solución, alineada con los objetivos misionales del GRID, sustentada en TOGAF y representada mediante *ArchiMate* [10]. Asimismo, se espera obtener como producto de esta fase un plan de pruebas estructurado, con criterios y métricas que orienten la posterior evaluación del prototipo. Estos productos son especialmente relevantes porque trasladan la discusión desde la selección de herramientas hacia una propuesta arquitectónica verificable y evaluable.

El tercer resultado esperado corresponde a la cuarta fase y es la implementación de un prototipo funcional en un entorno no productivo de la infraestructura del grupo. En esta etapa se espera concretar la integración de los componentes principales de la solución y dejar preparado un entorno operativo para la ejecución de pruebas.

El cuarto resultado esperado corresponde a la quinta fase y consiste en la validación del prototipo mediante el plan de pruebas diseñado. En esta etapa se espera generar métricas de desempeño, verificar reducciones de latencia, analizar el control del ancho de banda, evaluar el comportamiento de la caché y formular recomendaciones para trabajos futuros. De esta manera, la redacción de los resultados esperados queda articulada con la forma en que la metodología plantea su obtención y verificación, y orienta el proyecto hacia resultados con valor demostrable para la gestión de servicios de soporte académico.

Finalmente, la Tabla III sintetiza el estado actual del proyecto en función de sus fases y productos principales. Esta vista permite distinguir con claridad los resultados ya obtenidos, los avances parciales y los productos aún esperados, manteniendo coherencia entre la estructura metodológica del trabajo y la madurez actual de sus entregables. Se estima completar la totalidad de las fases el 28 de septiembre de 2026.

V. Discusión

Los resultados parciales obtenidos permiten discutir el proyecto desde tres perspectivas complementarias. La primera se relaciona con el valor del diagnóstico contextual. La identificación de necesidades, problemas y oportunidades mostró que la problemática abordada no puede reducirse a una cuestión de velocidad de descarga. En realidad, el caso estudiado evidencia que la ausencia de una solución proxy-caché también afecta dimensiones de gobernanza, observabilidad y confianza, lo cual amplía el alcance del problema y obliga a pensar la solución desde una perspectiva sistémica.



Fig. 2. Propuesta taxonómica para la clasificación de estudios.

La segunda perspectiva se relaciona con el papel del SMS dentro del proyecto. En muchos trabajos de aplicación, la selección tecnológica se realiza de forma intuitiva o a partir de familiaridad previa con ciertas herramientas. En contraste, este proyecto busca fundamentar esa selección mediante un proceso de mapeo sistemático. Esta decisión aumenta la trazabilidad metodológica del trabajo y fortalece la calidad del argumento técnico, aunque también introduce un reto en términos de tiempo y volumen de información por procesar.

La tercera perspectiva se asocia con el valor transferible del trabajo. Aunque el proyecto se desarrolla en un contexto institucional específico, los resultados de las fases iniciales muestran que problemas como la gestión de archivos de gran tamaño, la priorización del tráfico académico, la observabilidad del consumo de red y la confiabilidad de servicios expuestos no son exclusivos de un solo entorno. En ese sentido, la principal fortaleza del trabajo radica en convertir una necesidad concreta en una ruta metodológica trazable, con productos parciales verificables y criterios que pueden orientar procesos de decisión sobre infraestructura en otros escenarios académicos con demandas semejantes.

Dado que el proyecto se encuentra en desarrollo, los resultados presentados corresponden principalmente a las fases iniciales de diagnóstico, definición de criterios y estructuración del soporte metodológico para la toma de decisiones. Esto implica que, aunque ya existe una base sólida para orientar el diseño de la solución, la validación del prototipo y la obtención de métricas de desempeño aún constituyen etapas clave para confirmar el alcance real de la propuesta. No obstante, el avance logrado permite sostener que el aporte del trabajo no se limita al diseño futuro de un artefacto tecnológico, sino también a la construcción de una lógica de intervención útil para abordar problemas de infraestructura de red en contextos educativos.

Desde el punto de vista de la educación en ingeniería, el proyecto también aporta un caso de aprendizaje situado. Permite integrar gestión de proyectos, redes, arquitectura empresarial, evaluación de tecnologías, observabilidad y diseño de servicios en un problema real de infraestructura académica. En ese sentido, el valor del trabajo excede la solución técnica puntual y se ubica también en la formación de capacidades para abordar problemas complejos en entornos institucionales reales.

TABLA III. ESTADO ACTUAL DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO

Fase	Producto	Estado
1	Caracterización de NN. PP. OO.	Obtenido
1	Criterios de selección y diseño	Obtenido
2	Estructuración del SMS	Parcial
2	Clasificación final + DAR	En curso
3	Arquitectura TOGAF/*ArchiMate*	Esperado
3	Plan de pruebas	Esperado
4	Prototipo funcional	Esperado
5	Validación del prototipo	Esperado

VI. CONCLUSIONES

El trabajo presentado avanza hacia la construcción de un marco operacional para una solución basada en proxy-caché a partir de una problemática que trasciende el rendimiento de red y compromete dimensiones de gobernanza del tráfico, monitoreo continuo, priorización del uso académico y confianza en los servicios expuestos. El caso abordado muestra que, en infraestructuras académicas con laboratorios, recursos virtualizados y consumo recurrente de archivos de gran tamaño, la ausencia de mecanismos de caché y observabilidad puede afectar de forma directa procesos de docencia e investigación.

Como principales resultados parciales se cuenta con: i) la caracterización de necesidades, problemas y oportunidades del contexto; ii) la derivación de criterios funcionales, técnicos, de monitoreo y gobernanza para orientar la solución; iii) la estructuración metodológica del estudio de mapeo sistemático; y iv) una taxonomía de clasificación que permitirá analizar de manera organizada la literatura recopilada. Estos productos ya constituyen un aporte concreto, pues convierten una necesidad amplia de infraestructura en un proceso metodológicamente trazable, técnicamente orientado y potencialmente reutilizable en escenarios académicos con requerimientos semejantes.

Como trabajo futuro inmediato se plantea concluir el SMS, seleccionar las herramientas candidatas, especificar y documentar la arquitectura de la solución, implementar un prototipo funcional y ejecutar su validación en entorno no productivo mediante un plan de pruebas estructurado. La expectativa es que el resultado final entregue una arquitectura documentada, un prototipo funcional validado, métricas de desempeño visualizables en un *dashboard* y recomendaciones para trabajos futuros. De esta forma, el proyecto busca aportar no solo una respuesta a un caso de aplicación concreto, sino también una referencia útil para estructurar decisiones sobre infraestructura, priorización de tráfico y observabilidad en servicios de soporte académico.

REFERENCIAS

[1] A. Van den Beemt, S. Groothuijsen, L. Ozkan, and W. Hendrix, “Remote labs in higher engineering education: engaging students with active learning pedagogy,” Journal of Computing in Higher Education, vol. 35, pp. 320–340, 2023.

[2] L. Tobarra, A. Robles-Gómez, R. Pastor, R. Hernández, A. Duque, and J. Cano, “Students’ acceptance and tracking of a new container-based virtual laboratory,” Applied Sciences, vol. 10, no. 3, Art. no. 1091, 2020.

[3] K. Krishna, "Advancements in cache management: a review of machine learning innovations for enhanced performance and security," Frontiers in Artificial Intelligence, vol. 8, Art. no. 1441250, Feb. 2025, doi: 10.3389/frai.2025.1441250.

[4] N. El-Khameesy and H. A. R. Mohamed, “A proposed model for web proxy caching techniques to improve computer networks performance,” International Journal of Information Technology and Computer Science, vol. 5, no. 11, pp. 42–53, 2013.

[5] C. E. Gómez, L. E. Sepúlveda, and C. A. Candela, “Servidor proxy caché: comprensión y asimilación tecnológica,” Revista INGE CUC, vol. 8, no. 1, pp. 149–162, 2012.

[6] K. Mohan and A. Rengarajan, “Reverse proxy technology,” International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, vol. 12, no. 2, pp. 1067–1071, 2024.

[7] L. M. Selby and A. Bawa, "Optimizing an efficient use of internet bandwidth for higher learning institutions in Ghana," International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology, vol. 3, no. 8, pp. 50–65, Nov.-Dec. 2018, doi: 10.32628/CSEIT183819.

[8] Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide), 7th ed. Newtown Square, PA, USA: Project Management Institute, 2021.

[9] W. González Obregón, Y. Cruz Segura, A. Parra Fernández, and Y. Trujillo Casañola, "Buenas prácticas en el empleo de CMMI en empresas desarrolladoras de software," Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas, vol. 14, no. 4, pp. 215–225, 2021.

[10] F. F. Mumtaza, R. Mulyana, and I. Y. Mukti, "Utilizing TOGAF 10 to design an enterprise architecture for BPRBCo SME digital transformation," in Proc. 2025 Int. Conf. Advancement in Data Science, E-learning and Information System (ICADEIS), 2025, pp. 1–7.

[11] M. Salama, R. Bahsoon, and N. Bencomo, "Managing trade-offs in self-adaptive software architectures: a systematic mapping study," in Managing Trade-offs in Adaptable Software Architectures, I. Mistrik, N. Ali, R. Kazman, J. Grundy, and B. Schmerl, Eds. Morgan Kaufmann, 2017, pp. 249–297.

[12] M. Bega, F. Ercan, and B. Kuhlenkotter, "Implementation of an OPC UA information model for KPI calculations and dashboard reporting based on ISO 22400," in Proc. 2025 IEEE 8th Int. Conf. Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), 2025, pp. 1–6.

VDC/BIM-Driven Design and Stabilization of Regolith-Based Martian Roads and Landing Pads

Kyle Duffek
Civil Engineering & Construction Management Department
Norwich University
Northfield, United States
kduffek@norwich.edu

Nadia Al-Aubaidy, PhD
Civil Engineering & Construction Management Department
Norwich University
Northfield, United States
nalaubai@norwich.edu

Abstract
This paper presents a critical analysis of current methods for Martian regolith stabilization and the construction of extraterrestrial infrastructure, emphasizing sustainable and resilient approaches. Using a literature review methodology, the study evaluates stabilization techniques—including microwave and furnace sintering, polymer stabilization, geopolymerization, and sulfur-based concrete—alongside additive manufacturing methods and digital design tools such as BIM, VDC, and FEM. Case studies of Lunar landing pads and roads provide insight into dual-zone pad designs, interlocking geometries, and in-situ resource utilization (ISRU), offering transferable lessons for Martian applications. The analysis identifies opportunities for autonomous, energy-efficient construction, material optimization, and dust mitigation, while also highlighting challenges related to low gravity, thermal extremes, environmental degradation, and scalability. The research is significant as it consolidates knowledge across multiple disciplines, informing strategies for sustainable Martian infrastructure and establishing a foundation for future experimental and design studies in extraterrestrial construction.
Keywords- BIM, VDC, Martian Regolith Stabilization

Martian Regolith Properties

Regolith is the uppermost layer of extraterrestrial surfaces such as Mars and the Moon, composed of fine and coarse fragments. Jerde (2021) clarifies that extraterrestrial regolith should not be classified as soil due to the absence of organic content and weathering processes [1]. Like terrestrial soil, regolith properties significantly influence construction performance in applications such as roads and landing pads, particularly particle size distribution, density, and gradation [2]–[4]. These properties directly affect cohesion and shear strength when compacted, improving durability under Martian conditions [6].

Dotson et al. (2024) studied shear strength and cohesion of compacted JSC Mars-1 simulant. Results showed a positive correlation between density and both cohesion and shear strength. Increased particle size non-uniformity also enhanced cohesion and shear strength. However, Martian low-gravity effects were not considered, potentially altering in-situ performance. Particle shape was assumed to have a limited influence [5]. Further testing under simulated Martian gravity is required.

Sullivan et al. (2011) analyzed rover-induced wheel trenches in Gusev Crater and Meridiani Planum, linking them to regolith friction angle and cohesiveness, key parameters in geotechnical design [6]. They found that grain sorting, compaction, shape, size, and angularity strongly influence shear strength. Impact processes generate angular, poorly sorted particles, while aeolian processes promote rounding and sorting [4]. Cohesionless regolith may lead to unstable road behavior due to tailing accumulation under rover loads (Figure 1).

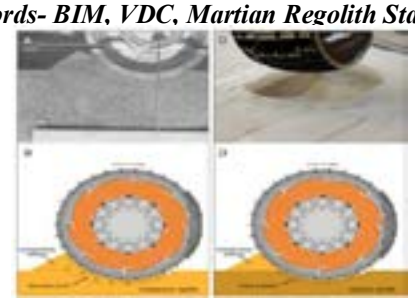


FIGURE 1- MER WHEEL-DIGS INTO COHESIONLESS AND COHESIVE REGOLITH [4]

Viking lander observations confirm that Martian regolith is highly magnetic [2], attributed to maghemite distribution across the surface [7], [8]. The Mars Pathfinder IMP system provided multisensor imaging configurations for surface characterization [2]. Magnetic properties suggest regolith can serve as an in-situ resource for infrastructure requiring thermal and compressive resistance [9].

Castelein et al. (2021) demonstrated microbial biomining using *Shewanella oneidensis* to extract iron-rich minerals from JSC Mars-1 simulant [9]. Treated samples achieved four times higher compressive strength than untreated ones, improving suitability for 3D-printed structures. However, iron extraction requires at least 72 hours, limiting operational efficiency.

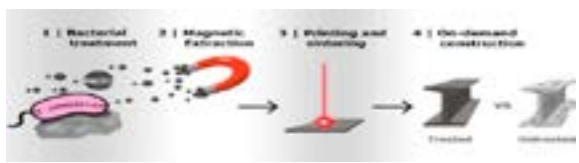


FIGURE 2 - CONCEPTUAL FLOW OF THE MICROBIAL BIOMINING PROCESS [9]

Stabilization Techniques for Extraterrestrial Construction

Stabilization methods are typically evaluated using terrestrial analogs or NASA mission datasets [2], [4]. Key regolith challenges include variability in grain size, shape, sorting, and angularity, all of which affect construction performance. Stabilization techniques aim to convert in-situ regolith into usable structural material for roads and landing pads.

Microwave Sintering

Sintering is a thermal bonding process forming a solid mass from particles [10]. It enhances cohesion and shear strength of regolith. Conventional microwave sintering requires bulky magnetrons and chambers, making it unsuitable for space deployment.

Gatto et al. (2024) proposed Local Microwave Heating (LMH), which concentrates energy in a localized zone using lightweight semiconductor-based systems [3]. LMH significantly reduces mass and energy demand. Although tested on lunar simulants, the method is potentially applicable to Martian regolith.

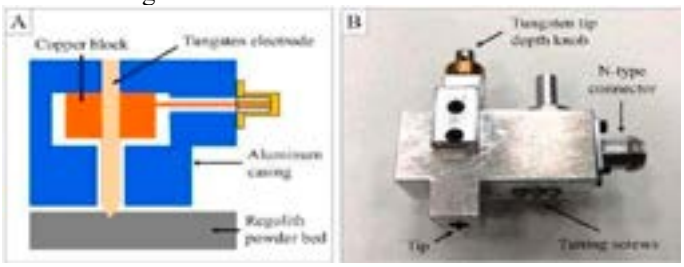


FIGURE 3 A) DESIGN SCHEME FOR ANTENNA B) MANUFACTURED ANTENNA, FOR PROBE THAT MELTS LUNAR REGOLITH [3]

The LMH system includes a vacuum chamber, microwave generator, antenna, CNC system, and monitoring camera, powered by ~36 V solar supply [3]. Integration with BIM-to-CNC workflows enables automated construction planning [11]. However, validation on Martian simulants remains necessary.

Mechanical Compaction

Mechanical compaction enhances regolith density through vibratory or rolling systems. Transport and deployment remain constrained by system mass requirements.

Chen et al. (2016) demonstrated vibratory compaction using an eccentric-weight motor system to densify lunar simulant [12]. Results show that higher vibration frequency increases final density. However, optimal performance requires initially loose regolith conditions.

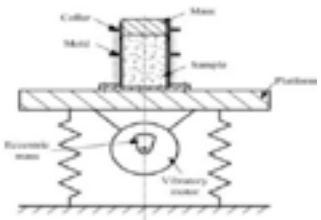


Figure 4 Vibratory Table [12]

Figure 5 shows a positive relationship between frequency and steady-state density, confirming vibratory compaction efficiency for regolith densification [12]. Increased density improves stability and reduces cohesionless failure modes.

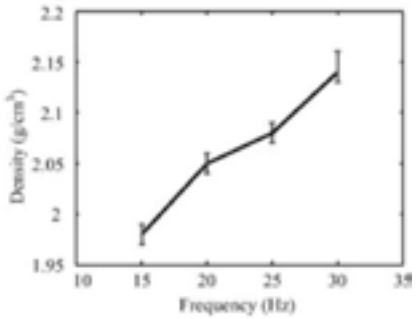


Figure 5 Relationship between final steady-state density of simulant and frequency (Hz) [12]

Geopolymerization

Geopolymerization is a low-energy chemical stabilization process involving alkali activation, reorientation, and polycondensation, producing a hardened inorganic matrix. It enables use of in-situ regolith with high compressive and flexural strength. JSC Mars-1 is suitable due to high silica and alumina content [13].

Polymer Stabilization

Polymer stabilization utilizes CO_2-based polyethylene for additive manufacturing of Martian infrastructure [14]. Benefits include automation, in-situ resource use, and compatibility with BIM-driven construction systems. Martian atmospheric CO_2 and surface water sources support polyethylene production. Polyethylene $(C_2H_4)n$ exhibits tensile strength of 40 MPa, density of 920 kg/m³, and modulus of elasticity of 1000 MPa [15]. Gelino et al. (2022) showed polymer composites reduce regolith ejecta and improve thermal resistance in landing pad applications [16].

Sulfur-Based Concrete

Sulfur-based concrete uses abundant Martian sulfur mixed with regolith to form a water-free construction material. It offers high strength, recyclability, and rapid curing. Amanova et al. (2024) reported strong resistance to thermal cycling and chemical exposure [17].

However, brittleness at low temperatures and sulfur dioxide release during processing present risks [17], [18]. Sulfur must be melted between 120–155°C, requiring significant energy input, which is challenging in Martian environments [17].

3D-Printing Martian Regolith

3D-printing, or additive manufacturing, is a promising construction method for Mars because it can utilize in-situ resources, autonomous systems, and BIM integration. Martian regolith is largely basaltic and contains minerals rich in iron and sulfur [9], [20]. Research by Castelein et al. (2021) demonstrated that iron can be extracted from regolith through microbial biomining, allowing colonies to potentially 3D-print infrastructure using in-situ metals. Sulfur-based concrete

derived from Martian materials is another possible construction medium [17].

3D-printers may operate through robotic-arm or gantry-based systems [21]. One common method, fused deposition modelling (FDM), uses computer numerical control (CNC) to deposit material in layers through an automated nozzle [20]. CNC systems allow BIM-generated models to be directly fabricated into layered structures [16]. The ability to autonomously construct geometrically complex infrastructure using local resources makes 3D-printing highly viable for Martian construction. However, additional research is required on the durability and maintenance of these structures under continuous use and harsh environmental exposure.

Regolith Mitigation through Emission of Laser Technology (MELT)

Sintering is another stabilization method for extraterrestrial regolith. Lutz et al. (2021) proposed using Mars rovers equipped with laser systems to sinter regolith into stable road surfaces [22]. The Lunar regolith mitigation through emission technology (MELT) successfully transformed Lunar regolith simulant into a hardened glass-like surface that improved stability [23]. Compared to transporting large construction systems, rover-based sintering methods may reduce mission costs [3], [22], [23].

Dust remains a major challenge on Mars, particularly for roads and transportation corridors. The thin Martian atmosphere allows dust storms to persist for months, potentially damaging infrastructure [24], [25]. Applying MELT to compact and stabilize regolith could help reduce dust generated by transportation systems, though further testing on Martian regolith simulants is still necessary.

Masten In-Flight Alumina Spray Technique (FAST)

The Masten In-Flight Alumina Spray Technique (FAST) is a proposed method for constructing extraterrestrial landing pads. FAST injects engineered alumina particles into a rocket plume, coating and hardening regolith at the landing site. This process improves thermal resistance and reduces crater formation during landings [22], [26]. The system is estimated to save more than $120 million per launch pad because of its sustainable use of local materials [22].

FAST requires precise timing and thermal control. The lander must briefly hover while the alumina spray is dispersed, increasing fuel consumption. Because FAST has mainly been evaluated for Lunar environments, additional research is required to determine its performance under Martian environmental conditions.

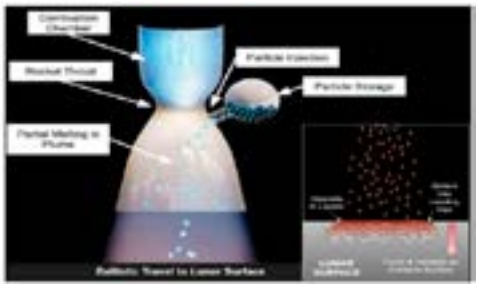


Figure 6- In-Flight Alumina Spray Technique, FAST [27]

Regolith Adaptive Modification System (RAMs)

Researchers at Texas A&M University developed the Regolith Adaptive Modification System (RAMs) under NASA's Innovative Advanced Concepts program to create Lunar landing pads. RAMs uses microcapsule delivery systems that release nanothermite mixtures and organosilanes into regolith. These materials form steel anchors that allow in-situ landing pads to be welded onto the surface [28].

Although primarily intended for Lunar use, testing RAMs with Martian regolith simulants could determine its viability for Mars. BIM software may also help design landing pads compatible with RAMs anchoring systems, enabling rapid development of initial colony infrastructure [28].

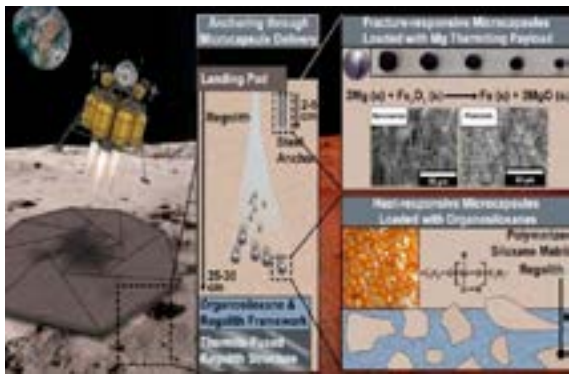


Figure 7 - Regolith Adaptive Modification System, RAMS [28]

Design Methods for Infrastructure on Mars

Designing and Planning Routes on Mars

Route planning on Mars must consider scientific goals, terrain, energy use, and operational safety. Muñoz et al. (2023) identified four major criteria for Martian route planning: total length, terrain traverse cost, accumulated drive time, and ease of implementation [29].

Pathing algorithms calculate route length through segmented paths, while terrain traverse cost measures rover travel efficiency. Seasonal variations are also significant because winter conditions reduce sunlight for solar-powered rovers.

Algorithms can therefore adjust routes according to seasonal energy availability [29]. Ease of implementation evaluates the number of commands required to complete the route [29], [30]. These planning systems can later support BIM-generated road designs that address slope stability and grade resistance.

Finite Element Modeling (FEM)

Finite element modeling (FEM) is a numerical analysis method used to evaluate deformation, stress, and structural performance [31]. FEM is particularly useful for Martian infrastructure because it allows engineers to analyze regolith behavior, structural integrity, and thermal effects under Martian conditions [32]. Such analyses can optimize the design of roads, shelters, and landing pads exposed to wheel loads and thermal fatigue.

Wan et al. (2016) studied Martian sulfur concrete using the Lattice Discrete Particle Model (LDPM) to simulate loading behavior [33]. LDPM replicates concrete performance through calibrated material relationships [34]. When integrated with BIM systems, LDPM can assist in stress and fatigue analysis [35]. Future research should examine the use of LDPM for BIM-generated Martian roads and landing pads to improve material performance under extraterrestrial conditions.

VDC/BIM for Martian Infrastructure

Building Information Modelling (BIM) integrates digital tools and information to create three-dimensional virtual construction models [36]. Software such as Autodesk Revit, Navisworks, AutoCAD, and SketchUp can support Martian infrastructure design. BIM offers advantages including direct fabrication compatibility, structural analysis, and material performance evaluation [37].

Muthumanickam et al. (2021) examined BIM applications within NASA 3D-Printed Habitat Challenge. The challenge involved virtual habitat drafting, detailed design, and physical construction. Design variables included wall thickness, module geometry, conduit depth, and system integration with structural and MEP/ECLSS systems [38].

The BIM workflow began with virtual formulation and modeling in Revit. Designers then analyzed structural performance, constructability, and cost. Optimization algorithms such as NSGA II automatically adjusted geometry according to project constraints before final construction simulations were performed [38].



Figure 8 - Design variables for shelter design on Mars [38]



Figure 9 - (Left) Virtual Design, (Middle) Actual Design, (Right) Actual 3D Printed Structure [38]

Material Selection through BIM & FEM

Martian regolith contains abundant basaltic material, iron, and sulfur, making it suitable for in-situ construction materials [9], [20]. Sulfur-based concrete has been widely studied because sulfur is readily available on Mars [17], [39].

Soureshjani et al. (2022) generated virtual Martian structures using sulfur concrete and evaluated them through FEM using environmental data from the Viking rovers. The analyses considered gravity, atmospheric pressure, marsquakes, asteroids, and meteoroids. Other materials, including plaster of Paris, ordinary Portland cement, geopolymer cement, and Mg-based cement, were also evaluated [39]. All materials displayed brittle behavior with low tensile strength but acceptable compressive performance [39]. FEM analyses identified structural configurations that maximized compressive strength while minimizing tensile stresses under Martian loading conditions.

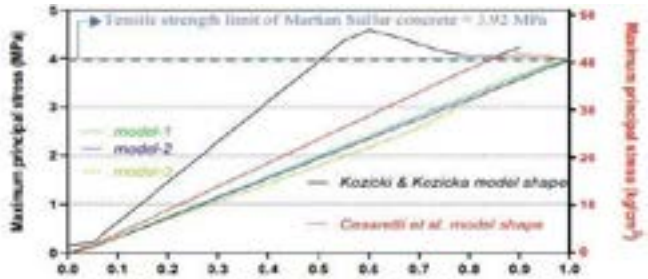


Figure 10- Maximum Principal Stress of each model under atmospheric pressure [39]

Dust Resistance

Martian dust presents a major challenge for infrastructure and equipment. Dust accumulation can impair power systems, rovers, habitats, and landing operations [24], [40]. Consequently, BIM and FEM analyses are important tools for developing infrastructure resistant to dust-related degradation.

Perko et al. (2002) studied methods for removing Martian dust using the JSC Mars-1 simulant. Common removal techniques included vibration, electrostatic repulsion, airflow, thermophoresis, and mechanical manipulation [41]. Thermophoresis uses temperature gradients to create upward airflow that lifts dust particles from surfaces [41]. This technique may be useful for maintaining solar panels and other exposed systems.

Dust mitigation must also be integrated into infrastructure design. Sintering regolith can compact surfaces and reduce dust generation [42], [43]. Roads stabilized through technologies such as MELT may reduce transportation-related dust [23]. Thermal spray coatings may also help protect landing pads and roads from dust buildup [42]. Additionally, compartmentalized habitat and airlock designs can reduce interior dust contamination [23].

Structural Optimization through BIM & FEM

Muthumanickam et al. (2021) analyzed BIM applications in NASA 3D-Printed Habitat Challenge while introducing the integration of artificial intelligence (AI) into BIM workflows. The competition required teams to maximize compressive strength while minimizing material cost and print time. Design teams utilized Autodesk Revit, FEM, and AI optimization algorithms to achieve these structural goals [38].

Martian habitats must withstand environmental challenges including seismic activity, wind, gravity, and atmospheric pressure. Mars' gravity of 3.71 m/s² is significantly lower than Earth's 9.81 m/s², while its atmospheric pressure is only 0.0006 MPa compared to Earth's 0.101 MPa [38]. Habitat walls therefore must resist both compressive and lateral loading caused by internal and external pressure differences. Conical structural designs were selected because they optimized 3D-printability while maintaining structural continuity. FEM analysis was used to determine configurations capable of satisfying these requirements [38].

Javaherikhah et al. (2025) assessed integrating BIM and blockchain technologies to improve information management for Martian habitats and infrastructure. Using SWOT and analytical hierarchy process (AHP) analysis, the study identified BIM's strengths in accurate modelling, data integration, and construction planning, all of which contribute to structural optimization under Martian environmental conditions [44].

Park et al. (2022) conducted FEM-based structural analyses on BIM-generated Martian habitats using Autodesk Nastran to interpret Revit models [45]. Habitat designs needed to satisfy NASA mission requirements such as interior living space, circulation, and radiation protection. FEM analyses examined structural behavior under Martian gravity and atmospheric pressure.

The study divided the analysis into sub-scale and full-scale evaluations. Sub-scale testing examined a one-third habitat model to assess deformation and stress during printing and loading conditions [45]. Results showed that atmospheric pressure differences caused greater deformation than Martian gravity due to the habitat's conical geometry and internal pressure conditions. FEM analysis ultimately optimized the structure to improve load-path continuity and reduce deformation caused by environmental pressures [44], [45]. These findings demonstrate that Martian infrastructure, including landing pads and habitats, must be geometrically optimized to withstand pressure and temperature variations.

Assessing Regolith Stabilization Techniques under Martian Conditions

Sintering

Sintering thermally bonds regolith particles into a solid structure and can improve cohesion and shear strength under Martian conditions [10]. Common methods include furnace, laser, microwave, and solar sintering.

Karl et al. (2018) experimented with furnace sintering of JSC Mars-1 Martian regolith simulant to produce ceramics without binding agents [46]. The study explored slurry-based additive manufacturing methods such as layer-wise slurry deposition (LSD) and laser-induced slip casting (LIS), which may support BIM-driven extraterrestrial construction [46], [47].

Gupta et al. (2024) produced synthetic Martian bricks using furnace sintering and compared them with laser-, microwave-, and solar-sintered alternatives [48]. Furnace-sintered bricks displayed uniform isotropic properties and high compressive strength, averaging 23.9 MPa and reaching 40.8 MPa, greatly exceeding the 6 MPa minimum required under Martian gravity [48]. Furnace sintering is scalable and automatable, though transporting furnace systems to Mars remains a concern.

Excessive loading, however, can still lead to cracking and structural failure.

Solar sintering presents a lower-energy alternative suited for extraterrestrial environments. Urbina et al. (2017) developed automated solar-sintering prototypes using gantry systems and rover-mounted printing heads [49]. These systems used CNC controls capable of printing BIM-generated infrastructure [11], [49]. However, solar-sintered regolith currently lacks sufficient compressive strength for major infrastructure applications [48], [50]. Dust storms and regolith accumulation also reduce solar printer effectiveness on Mars [4], [24].

Local microwave heating (LMH) is another regolith stabilization method optimized for extraterrestrial deployment. LMH systems consume less energy, can operate through solar panels, and support CNC-guided construction from BIM models [3], [11]. Barmatz et al. (2014) proposed a microwave printing head integrated into the ATHLETE robotic rover [51].

Reitz et al. (2021) evaluated additive manufacturing under lunar gravity and vacuum conditions using a mobile selective laser melting (M-SLM) system inside the "Einstein Elevator" [52]. Though focused on Lunar regolith, similar facilities could emulate Martian conditions for future regolith stabilization experiments.

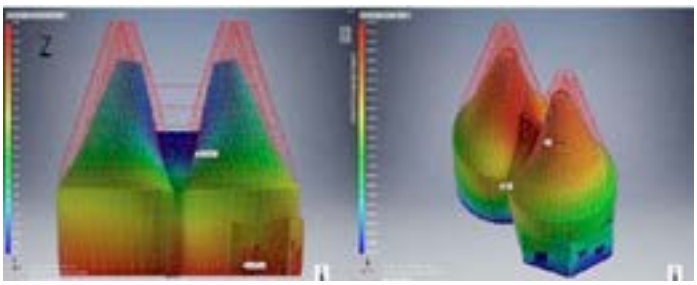


Figure 11 - Deformation along the z-axis and maximum deformation [45]

Polymer Stabilization of Martian Regolith

Yan and Kawasaki (2025) reviewed polymer stabilization methods for regolith-based concrete [17], [53]. Polymer concrete uses polyethylene binders instead of cement and does not require water, which is valuable for Martian life-support systems. Though polyethylene is expensive to transport, researchers proposed producing it on Mars by converting atmospheric CO_2 into CH_4 and eventually polyethylene through catalytic processes [53].

Sen et al. (2010) found that increasing polyethylene content improved the ballistic impact resistance of Martian regolith bricks [54]. Bricks containing 40% polyethylene sustained minimal damage under impact, while those without binders shattered completely [54]. This resilience makes polymer concrete promising for landing pads exposed to rocket plume abrasion. However, polymer concrete performs poorly under extreme temperatures, which remains a concern for Martian applications. Polymer-based concrete can also be integrated into 3D concrete printing systems capable of constructing BIM-generated infrastructure [55], [56].

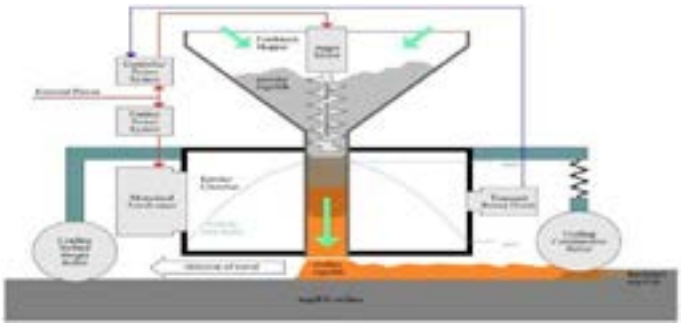


Figure 12 - 3D Microwave printing head [51]

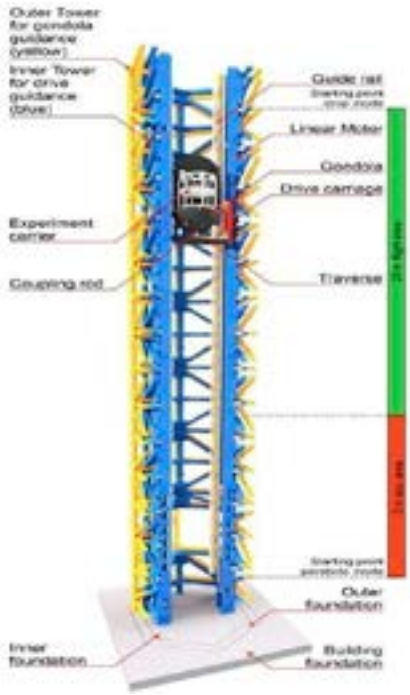


Figure 13 - Einstein Elevator [52]

Geopolymer Stabilization of Martian Regolith

Geopolymers are inorganic polymers used as cementitious binders in regolith concrete [53]. Their production involves alkali activation, reorientation, and polycondensation, enabling the formation of geopolymer concrete suitable for automated 3D printing.

Mills et al. (2022) compared Lunar and Martian regolith simulants, including MGS-1 and MGS-1C, for geopolymer cement production [57]. Martian regolith contains abundant aluminosilicate minerals necessary for geopolymer synthesis, while calcium scarcity limits traditional Portland cement production [13], [57]. Geopolymers require less energy and water than conventional cementation methods, making them attractive for Martian infrastructure [57], [58].

The study also tested geopolymer cement under simulated Martian conditions, including vacuum exposure and freeze-thaw cycles [57]. Though geopolymer cement maintained integrity up to 600 °C, vertical takeoff and landing (VTVL) pads may experience temperatures near 1200 °C [59], [60]. Additionally, the higher iron content of Martian regolith reduced compressive strength compared to Lunar alternatives [57]. Environmental exposure further decreased structural performance, highlighting the material's sensitivity to Martian conditions.

Lunar Landing Pad Case Study

Metzger et al. (2023) evaluated the economic sustainability of Lunar landing pad construction methods [61]. Though focused on Lunar applications, the findings provide insight into potential construction methods for BIM-designed Martian landing pads. The study emphasized a two-zone landing pad design where inner and outer zones require different material properties [61], [62].

The inner zone must resist intense rocket plume temperatures and pressures during landing and launch. Microwave-sintered regolith was identified as the most effective material because iron-rich regolith absorbs microwaves efficiently [61]. In-situ microwave-sintered slabs were mechanically competent for the inner zone [65]. However, low extraterrestrial surface temperatures reduce microwave absorption efficiency [61].

The outer zone primarily addresses erosion and dust ejection from rocket plumes. Stabilization methods included microwave sintering, furnace sintering, polymer infusion, and loose regolith spreading [61]. Polymer-infused regolith was considered viable because the outer zone experiences lower thermal stress. Furnace sintering, however, was less economically sustainable because of high transportation and energy costs.

The study assessed hardware development, transportation, energy consumption, reliability, and operational delays using the Global Security cost-estimating tool [61], [66]. Reliability and repair costs were evaluated through subsystem failure analysis and Mettas's reliability cost model [67], [68].

Microwave sintering for both landing pad zones emerged as the most economically sustainable approach, while microwave sintering combined with polymer infusion ranked second when transportation costs were reduced [61]. These findings highlight the importance of selecting efficient in-situ construction methods for future Martian infrastructure.

Signifier	Inner Pad	Outer Pad
SiSi	Sintered	Sintered
SiGr	Sintered	Gravel/Rock
SiPa	Sintered	Pavers
SiPo	Sintered	Polymer
PaSi	Pavers	Sintered
PaGr	Pavers	Gravel/Rock
PaPa	Pavers	Pavers
PaPo	Pavers	Polymer

Figure 14 - Eight Combined Cases of Pad Construction [61]

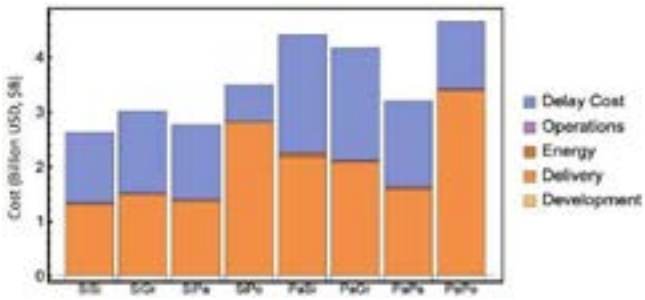


Figure 15 - Full cost of pad construction for each construction pair method [61]

Item	Five Scenarios with Programmatic Schedule and Power Constraints				
Transportation Cost	51M kg	3300k kg	3300k kg	510k kg	52k kg
Schedule Constraint	≤270 d	≤270 d	≤270 d	≤120 d	≤30 d
Power Constraint	≤50 kW	≤50 kW	≤50 kW	≤50 kW	≤100 kW
Optimum Method	S(S)	S(S)	S(S)	S(S)	S(Po
Number of Rovers (~100 kg each)	1	1	1	2	3
Total Mass of Rover(s)	200 kg	100 kg	134 kg	269 kg	330 kg
Sintering Hardware Mass	316 kg	316 kg	445 kg	897 kg	1,110 kg
Polymer Application Systems Mass	--	--	--	--	81 kg
Polymer Material Mass	--	--	--	--	7,200 kg
Max Power Needed	18 kW	18 kW	25 kW	50 kW	66 kW
Grading & Compacting Time	11 d	11 d	8 d	4 d	3 d
Inner Sintering Time	58 d	58 d	41 d	20.5 d	15.5 d
Outer Sintering Time	201 d	201 d	142 d	70.5 d	--
Outer Polymer Application Time	--	--	--	--	1 d
Total Construction Time	270 d	270 d	192 d	95 d	19.5 d
Appropriated Cost	$540M	$229M	$150M	$47.4M	$27.5M

Figure 16 - Example Construction Systems for Five Scenarios with Program Adjustments [61]

Lunar Roads Case Study

Ginés-Palomares et al. (2023) investigated laser sintering as a method for constructing Lunar roads using EAC-1A regolith simulant and a high-powered CO_2 laser [69]. The study examined the mineralogy, structure, and mechanical properties of laser-sintered paving samples.

Compressive strength testing revealed an average strength of 93.97 MPa and a maximum of 216.29 MPa, significantly

outperforming solar-sintered alternatives [69]. These values fall within the compressive strength range of conventional concrete, making laser-sintered regolith a potential substitute for sulfur concrete [69], [70]. Paved regolith surfaces also substantially reduced dust uplift from rover movement [69], [71].

The study developed interlocking paving geometries that could improve construction efficiency and integrate with BIM-driven design processes. However, scalability remains a major limitation. The laser's small beam width requires extensive time and energy to pave large roadways [69]. Even solar concentrators such as Fresnel lenses may not sufficiently improve scalability for large extraterrestrial transportation networks [69]. Continued research into scalable laser sintering methods and Martian regolith paving systems will therefore remain critical for future Martian infrastructure development.

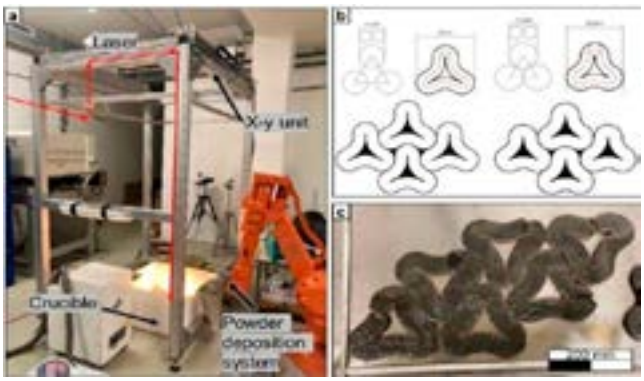


Figure 18 - (a) Setup used for the manufacturing of interlocking geometries, (b) study of different interlocking geometries. (c) samples manufactured as paving elements [69]

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge the support of the National Aeronautics and Space Administration (NASA) for sponsoring and encouraging research in extraterrestrial construction materials and Martian in-situ resource utilization. This work benefited from NASA's extensive datasets, mission findings, and ongoing efforts in advancing planetary surface engineering technologies, particularly those related to regolith characterization and infrastructure development for future Mars exploration.

References

[1] Jerde, E. A. (2021). The Apollo program. *Sample Return Missions*, 9–36.
[2] Bell III, J. F., et al. (2000), Mineralogic and compositional properties of Martian soil and dust: Results from Mars Pathfinder, *J. Geophys. Res.*, 105 (E1).
[3] Gatto, A., et al. (2024). Preliminary study on localized microwave sintering of lunar regolith. *Acta Astronautica*, *218*, 126-136
[4] Sullivan, R., et al. (2011). Cohesions, friction angles, and other physical properties of Martian regolith from Mars Exploration Rover wheel trenches and wheel scuffs. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *116*(E2).
[5] Dotson, B., et al.(2024). Cohesion and shear strength of compacted lunar and Martian regolith simulants. *Icarus*, *411*, 115943.
[6] Rasti, A., Adarmanabadi, H. R., Pineda, M., & Reinikainen, J. (2021). Evaluating the effect of soil particle characterization on internal friction angle. *American Journal and Applied Sciences.*
[7] Hargraves, R. B. et al. (1977) The Viking magnetic properties experiment: Primary mission results, *J. Geophys. Res.*, 82, 4547-4558.
[8] Hargraves, R. B., et al. (1979) Viking magnetic properties experiment: Extended mission results, *J. Geophys. Res.*, 84, 8379-8384.
[9] Castelein, S. M., et al. (2021). Iron can be microbially extracted from Lunar and Martian regolith simulants and 3D printed into tough structural materials. *Plos one,* 16(4), e0249962
[10] Lemoisson, F., & Froyen, L. (2005). Understanding and improving powder metallurgical processes.
[11] Darwish, M., Alsakka, F., Assaf, S., & Al-Hussein, M. (2022). Automated BIM-based CNC file generator for wood panel framing machines in construction manufacturing. *Modular Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings,* 98-105.
[12] Chen, C., Quan, Q., Deng, Z., & Jiang, S. (2016). Vibratory compaction method for preparing lunar regolith drilling simulant. *Advances in Space Research*, *58*(1), 145-154.
[13] Alexiadis, A., Alberini, F., & Meyer, M. E. (2017). Geopolymers from lunar and Martian
soil simulants. *Advances in Space Research*, *59*(1), 490–495.
[14] Koca, E. (2024). *Extraterrestrial Building Design: Martian Infrastructure Utilizing In-Situ CO2-Based Polyethylene* [Ph.D. - Doctoral Program]. Middle East Technical University.
[15] Sahu, S. K., & Sreekanth, P. R. (2023). Evaluation of tensile properties of spherical shaped
SiC inclusions inside recycled HDPE matrix using FEM based representative volume element approach. *Heliyon*, *9*(3).
[16] Gelino, N. J., Mueller, R. P., Sibille, L., Dixon, K. L., Gleeson, J., & Buckles, B. (2022). InSitu Lunar Launch and Landing Pad Construction with Regolith-Thermoset Polymer Composite Materials. In *Earth and Space 2022* (pp. 789-803).
[17] Amanova, N., et al. (2024). Sulfur-based concrete: Modifications, advancements, and future
prospects. *Construction and Building Materials*, *435*, 136765.
[18] Al-Ani, M. J., & Abdalameer, J. (2021). Durability Investigation of Sulfur and Traditional Concrete within Aggressive Environments. *Iraqi Journal of Industrial Research*, *8*(3), 7–16.
[19] Koca, E., & Turer, A. (2024). Design, optimization, and autonomous construction of Martian infrastructure, including slabs, using in-situ CO2-based polyethylene. *Journal of Building Engineering, 98,* 111318.
[20] Kading, B., & Straub, J. (2015). Utilizing in-situ resources and 3D printing structures for a manned Mars mission. *Acta Astronautica*, *107*, 317-326.
[21] Khajavi, Siavash H., et al. "Additive manufacturing in the construction industry: The comparative competitiveness of 3d ccrete printing." *Applied Sciences* 11.9 (2021):3865.
[22] Lutz, K., Mackenzie, B., Wolfe, C., & Kacha, A. (2021). Deployment of Surface Infrastructure, Systems, and Layout for Mars Settlement. In *ASCEND 2021* (p. 4033).
[23] Pederson, A., "Lunar Regolith Mitigation through Emission of Laser Technology (MELT)",43rd COSPAR Scientific Assembly. Vol 43, 2021.
[24] Cantor, B.A., Pickett, N.B., Malin, M.C., Lee, S.W., Wolff, M.J., Caplinger, M.A., 2019. Martian dust storm activity near the Mars 2020 candidate landing sites: MRO-MARCI observations from Mars years 28–34. Icarus 321, 161–170.
[25] Zamani, M. N., Shah, M. S. A., Umar, S., Yahaya, N., Mukhlas, N. A., Kim, J. H. J., & Noor, N. M. (2024). The feasibility of in-situ resource utilization binder systems for construction materials on Mars: A review. *Advances in Space Research*, *74*(3), 1535-1561.
[26] Das, R. (2007). *Processing and characterization of plasma sprayed iron aluminide coatings* (Doctoral dissertation).
[27] Masten. (2022, April 5). *Mitigating lunar dust: Masten completes fast landing pad study*.
[28] Hall, L. (2021, February 23). Regolith adaptive modification system (RAMS). NASA

[29] Muñoz, P., Bellutta, P., & R-Moreno, M. D. (2023). Proposing new path-planning metrics for operating rovers on Mars. *Scientific reports*, *13*(1), 22256.
[30] Daftry, S., Abcouwer, N., Del Sesto, T., Venkatraman, S., Song, J., Igel, L., ... & Ono, M. (2022). MLNav: Learning to safely navigate on Martian terrains. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *7*(2), 5461-5468.
[31] Behera, B. K. (2012). Modelling the structure of woven fabrics. In *Woven Textiles* (pp. 229-263). Woodhead Publishing.
[32] Kim, H., et al. (2023). Finite Element Modeling of Martian Soil Stabilization Techniques. Computational Mechanics in Space Research, 19(2), 112-128
[33] Wan, L., Wendner, R., & Cusatis, G. (2016). A novel material for in situ construction on Mars: experiments and numerical simulations. *Construction and Building Materials, 120,* 222-231.
[34] Cusatis, G., Pelessone, D., & Mencarelli, A. (2011). Lattice discrete particle model (LDPM)for failure behavior of concrete. I: Theory. *Cement and Concrete Composites*, *33*(9), 881-890.
[35] Zhu, Y., & Fascetti, A. (2025). Towards developing reinforced concrete structures digital
twins: A multiscale lattice discrete particle model approach. *Advances in Structural Engineering*, *28*(1), 38-54.
[36] Doan, D., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Zhang, T., & Tookey, T. (2019). What is BIM?: a need for a unique BIM definition.
[37] Ahmed, S., et al. (2021). BIM-Based Simulation for Extraterrestrial Construction: Applications for Lunar and Martian Infrastructure. Journal of Space Engineering, 14(3),45-62.
[38] Muthumanickam, N. K., Duarte, J. P., Nazarian, S., Bilén, S. G., & Memari, A. (2021). BIMfor design generation, analysis, optimization, and construction simulation of a Martian habitat. *Earth and Space*, 1208-1219.
[39] Soureshjani, O. K., & Massumi, A. (2022). Martian buildings: Structural forms using in-place sources. *Scientific reports*, *12*(1), 21992.
[40] Rucker, M. A. (2017, June). Dust storm impacts on human Mars mission equipment and operations. In *Workshop on Dust in the Atmosphere of Mars and Its Impact on Human Exploration* (No. JSC-CN-39139).
[41] Perko, H. A., Nelson, J. D., & Green, J. R. (2002). Review of martian dust composition, transport, deposition, adhesion, and removal. In *Space 2002 and Robotics 2002* (pp. 176-189).
[42] Wilson, T. L., & Wilson, K. B. (2005). Regolith Sintering: A Solution to Lunar Dust Mitigation?. *Lunar and Planetary Science XXXVI, Part 21*.
[43] Vrankar, D., Verseux, C., & Heinicke, C. (2023). An airlock concept to reduce contamination risks during the human exploration of Mars. *npj Microgravity*, *9*(1), 81.
[44] Javaherikhah, A., Lopez, M. V., & Sarvari, H. (2025). Assessing the Efficiency of Integrating BIM and Blockchain to Improve Information Management for Mars Buildings: A SWOT-AHP Analysis. *Buildings, 15*(3), 494.
[45] Park, K., Memari, A., Nazarian, S., Duarte, J., & Hojati, M. (2020). Structural Analysis of Full-Scale and Sub-Scale Structure for Digitally Designed Martian Habitat.
[46] Karl, D., Kamutzki, F., Zocca, A., Goerke, O., Guenster, J., & Gurlo, A. (2018). Towards the colonization of Mars by in-situ resource utilization: Slip cast ceramics from Martian soil simulant. *PloS one*, *13*(10), e0204025.
[47] Guillon, O., Dash, A., Lenser, C., Uhlenbruck, S., & Mauer, G. (2020). Tuning the microstructure and thickness of ceramic layers with advanced coating technologies using zirconia as an example. *Advanced Engineering Materials*, *22*(11), 2000529.
[48] Gupta, N., Dawara, V., Kumar, A., & Viswanathan, K. (2024). Synthetic space bricks from lunar and Martian regolith via sintering. *Advances in Space Research*, *74*(8), 3902-3915.
[49] Urbina, D., Madakashira, H., Salini, J., Govindaraj, S., Bjoerstad, R., Gancet, J., ... & Prodeka, E. (2017, September). Robotic prototypes for the solar sintering of regolith on the lunar surface developed within the Regolight project. In *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC* (Vol. 4, No. November, pp. 2632-2641).
[50] Imhof, B., Urbina, D., Weiss, P., Sperl, M., Hoheneder, W., Waclavicek, R., ... & Preisinger, C. (2017, September). Advancing solar sintering for building a base on the Moon. In *69th International Astronautical Congress (IAC)* (pp. 25-29).
[51] Barmatz, M., Steinfeld, D., Anderson, M., & Winterhalter, D. (2014, March). 3D microwave print head approach for processing lunar and mars regolith. In *45th Annual Lunar and Planetary Science Conference* (No. 1777, p. 1137).
[52] Reitz, B., Lotz, C., Gerdes, N., Linke, S., Olsen, E., Pflieger, K., ... & Overmeyer, L. (2021). Additive manufacturing under lunar gravity and microgravity. *Microgravity Science and Technology*, *33*, 1-12.
[53] Yan, Z., & Kawasaki, S. (2025). Review of In Situ Resource Utilization-Based Biocementation and Regolith Consolidation Techniques for Space Applications. *Buildings*, *15*(11), 1815.
[54] Sen, S., Carranza, S., & Pillay, S. (2010). Multifunctional Martian habitat composite material synthesized from in situ resources. *Advances in space research*, *46*(5), 582-592.
[55] Dvorkin, L., Konkol, J., Marchuk, V., & Huts, A. (2022). Effectiveness of polymer additives in concrete for 3D concrete printing using fly ash. *Polymers*, *14*(24), 5467.
[56] Krčma, M., Škaroupka, D., Vosynek, P., Zikmund, T., Kaiser, J., & Palousek, D. (2021). Use of polymer concrete for large-scale 3D printing. *Rapid Prototyping Journal*, *27*(3), 465-474.
[57] Mills, J. N., Katzarova, M., & Wagner, N. J. (2022). Comparison of lunar and Martian regolith simulant-based geopolymer cements formed by alkali-activation for in-situ resource utilization. *Advances in Space Research*, *69*(1), 761-777.
[58] Wang, K. T., Lemougna, P. N., Tang, Q., Li, W., & Cui, X. M. (2017). Lunar regolith can allow the synthesis of cement materials with near-zero water consumption. *Gondwana Research*, *44*, 1-6.
[59] Sturm, P., Gluth, G. J. G., Simon, S., Brouwers, H. J. H., & Kühne, H. C. (2016). The effect of heat treatment on the mechanical and structural properties of one-part geopolymer-zeolite composites. *Thermochimica acta*, *635*, 41-58.
[60] Launch Pad 39B [WWW Document], 2020. . NASA. URL https://www.nasa.gov/content/launch-pad-39b
[61] Metzger, P. T., & Autry, G. W. (2023). The cost of lunar landing pads with a trade study of construction methods. *New Space*, *11*(2), 94-123.
[62] Van Susante, P. J., & Metzger, P. T. (2016, April). Design, test, and simulation of lunar and mars landing pad soil stabilization built with in situ rock utilization. In *15th Biennial ASCE Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments* (pp. 642-652). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
[63] Morris, A. B., Goldstein, D. B., Varghese, P. L., & Trafton, L. M. (2011, May). Plume impingement on a dusty lunar surface. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1333, No. 1, pp. 1187-1192). American Institute of Physics.
[64] Hogue, M. D., Mueller, R. P., Sibille, L., Hintze, P. E., & Rasky, D. J. (2016, April). Extraterrestrial regolith derived atmospheric entry heat shields. In *15th Biennial ASCE Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments* (pp. 699-712). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
[65] Hintze, P., Curran, J., & Back, T. (2009). Lunar surface stabilization via sintering or the use of heat cured polymers. In *47th AIAA Aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition* (p. 1015).
[66] Global Security, Advanced Missions Cost Model. https://www.globalsecurity.org/military/intro/reference/calc/AMCM.htm, 2005
[67] Military Handbook (MIL-HDBK)-338B, Electronic Reliability Design Handbook (DOD, Oct. 1, 1998), pp. 610–619
[68] Mettas, A. (2000, January). Reliability allocation and optimization for complex systems. In *Annual reliability and maintainability symposium. 2000 Proceedings. International symposium on product quality and integrity (Cat. No. 00CH37055)* (pp. 216-221). IEEE.
[69] Ginés-Palomares, J. C., Fateri, M., Kalhöfer, E., Schubert, T., Meyer, L., Kolsch, N., ... & Günster, J. (2023). Laser melting manufacturing of large elements of lunar regolith simulant for paving on the Moon. *Scientific Reports*, *13*(1), 15593
[70] Penttala, V. E. (1992). Nature of compression strength in concrete. *Magazine of Concrete Research*, *44*(159), 87-106.
[71] Budzyń, D., Tuohy, E., Garrivier, N., Schild, T., Cowley, A., Cruise, R., ... & Cammarano, A. (2022). Lunar dust: Its impact on hardware and mitigation technologies.

Propuesta de Prototipo para Laboratorio de Energías Renovables

Sebastián Restrepo Rodríguez
Estudiante Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
sebastian.restrepor2@uqvirtual.edu.co

Daniel Fabián Yasán Lima
Estudiante Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío Armenia, Colombia
danielf.yasanl@uqvirtual.edu.co

Daniel Jose Padilla Valderrama
Estudiante Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío Armenia, Colombia
danielj.padillav@uqvirtual.edu.co

Juan Manuel Guevara Claros
Estudiante Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío Armenia, Colombia
juanm.guevarac@uqvirtual.edu.co

Pablo Andres Muñoz Gutierrez
Grupo de Automatización y Máquinas de Aprendizaje (GAMA) Universidad del Quindío Armenia, Colombia
pamunoz@uniquindio.edu.co

Diego Fernando Ramírez Jiménez
Grupo de Automatización y Máquinas de Aprendizaje (GAMA) Universidad del Quindío Armenia, Colombia
dframirez@uniquindio.edu.co

***Resumen*— Este artículo presenta la propuesta de prototipo para laboratorio de energías renovables orientado a la experimentación en entornos educativos de ingeniería. Mediante una metodología de diseño estructurado, se formuló una arquitectura modular que integra generación solar fotovoltaica, almacenamiento en baterías, conversión corriente directa a corriente alterna (DC/AC) e instrumentación para la adquisición de variables eléctricas. La propuesta incorpora un sistema de gestión de energía (EMS) con control jerárquico, orientado a coordinar la desconexión selectiva de cargas no críticas, la cooperación energética entre módulos de generación y la conmutación entre los modos de operación en isla y conectado a red. Como resultado, se definieron la arquitectura funcional del sistema, las especificaciones técnicas preliminares de sus subsistemas y una estrategia general de control para su futura implementación física. El trabajo constituye una base técnica para el desarrollo de prácticas académicas y futuras etapas de validación experimental en microrredes inteligentes.**

Palabras clave*— *Arquitectura modular, Control jerárquico, Energías renovables, Sistema de gestión de energía (EMS), Instrumentación

I. Introducción

La transición energética ha venido transformando la manera en que se conciben, operan y estudian los sistemas eléctricos. En este escenario, las microrredes han ganado relevancia por su capacidad de integrar generación distribuida, almacenamiento y cargas dentro de un esquema coordinado de operación, lo que las convierte en una alternativa de interés tanto para aplicaciones reales como para procesos de formación e investigación en ingeniería [1].

A pesar de ese interés creciente, en muchos contextos universitarios el estudio de las microrredes todavía se aborda principalmente desde la teoría. Esto hace que temas como la interacción entre fuentes renovables, conversión de energía, monitoreo, protección y operación conectada o aislada se comprendan de forma parcial, ya que no siempre se dispone de plataformas didácticas que permitan observar el comportamiento del sistema de manera integrada. En consecuencia, surge la necesidad de diseñar entornos de laboratorio que acerquen estos conceptos a una experiencia más práctica, segura y académicamente útil.

En ese sentido, el presente trabajo plantea la propuesta de diseño de un banco de pruebas de una microrred inteligente orientado a apoyar actividades de formación, experimentación y análisis en ingeniería eléctrica, electrónica y áreas afines. En este contexto, la propuesta de prototipo para laboratorio de energías renovables se concreta en el diseño de una microrred inteligente a escala de laboratorio para un entorno educativo. Más que presentar una implementación concluida, el trabajo se enfoca en estructurar una solución técnica que sirva como base para su posterior desarrollo, integrando criterios de arquitectura, selección de subsistemas, instrumentación, seguridad y operación.

La pertinencia de esta propuesta también se relaciona con la evolución de los sistemas eléctricos hacia esquemas más inteligentes, donde el monitoreo, la flexibilidad operativa y la integración de recursos energéticos distribuidos adquieren un papel cada vez más importante [2]. Desde esta perspectiva, el banco de pruebas propuesto busca aportar una herramienta académica que facilite la apropiación de conceptos asociados a microrredes y redes inteligentes, y que a futuro permita fortalecer procesos de docencia, investigación y validación en un entorno controlado. La principal contribución de este trabajo consiste en la formulación de una propuesta técnica para un banco de pruebas de microrred inteligente a escala de laboratorio, estructurada desde la arquitectura del sistema, la selección de subsistemas, la instrumentación, el esquema de

control y los lineamientos de operación segura, con fines de formación e investigación en ingeniería.

II. Marco Teórico y Estado del Arte

Red inteligente (Smart Grid): Una red inteligente es una evolución de la red eléctrica convencional que incorpora sensores, comunicaciones, capacidad computacional y control para mejorar la funcionalidad global del sistema eléctrico. Su propósito no se limita al transporte de energía, sino que busca optimizar de manera conjunta la generación, el almacenamiento, la transmisión, la distribución, los recursos energéticos distribuidos y el consumo final, favoreciendo una operación más eficiente, confiable y flexible. [3]

Generación distribuida: La generación distribuida corresponde a la producción de energía en puntos cercanos al lugar de consumo, en contraste con el esquema tradicional basado en grandes plantas centralizadas. En el contexto de las redes inteligentes, este enfoque permite integrar fuentes renovables, favorecer el flujo bidireccional de energía e información y otorgar un papel más activo al usuario, quien puede pasar de ser solo consumidor a participar también en la provisión energética del sistema. [4]

Microrred: Una microrred es un conjunto de cargas y recursos energéticos distribuidos interconectados dentro de límites eléctricos definidos, capaz de operar como una única entidad controlable frente a la red principal. Su principal característica es que puede funcionar tanto conectada a la red eléctrica como de manera aislada, lo que le brinda mayor flexibilidad operativa, resiliencia y capacidad de adaptación ante fallas o variaciones en la disponibilidad de energía. [5]

Sistema de almacenamiento de energía: El almacenamiento energético, usualmente implementado mediante sistemas BESS, cumple un papel fundamental dentro de una microrred porque permite responder de manera inmediata ante cambios bruscos de carga, contribuir al mantenimiento de la estabilidad del sistema y respaldar la continuidad del suministro. Además, puede emplearse para facilitar la transición entre modos de operación y apoyar procesos como el arranque de la microrred cuando las condiciones del sistema lo requieren. [5]

Sistema de gestión de energía (EMS): El sistema de gestión de energía es el conjunto de funciones de supervisión, decisión y control encargado de coordinar la interacción entre generación renovable, baterías y cargas. Su función principal es administrar el flujo de potencia del sistema de acuerdo con las condiciones de entrada y salida, priorizando fuentes energéticas, definiendo estrategias de carga y descarga, y manteniendo una operación flexible y segura dentro de la microrred. [6]

Modo conectado a red: El modo conectado a red corresponde a la condición en la que la microrred permanece enlazada a la red eléctrica principal y puede intercambiar energía con ella. En este modo, la red de respaldo puede alimentar las cargas cuando la generación local resulta insuficiente o cuando el estado de carga de las baterías se encuentra por debajo del nivel establecido, lo que permite una operación más estable y adaptable a distintas condiciones energéticas. [6]

Modo isla: El modo isla se presenta cuando la microrred se desacopla de la red principal y continúa operando de manera autónoma con sus propios recursos de generación y almacenamiento. Bajo esta condición, el controlador de la microrred debe mantener el equilibrio entre generación y carga, así como conservar la tensión y la frecuencia dentro de límites aceptables, lo que convierte este modo en una de las capacidades más relevantes desde el punto de vista técnico y de resiliencia. [5]

Inversor DC/AC (corriente directa / corriente alterna): El inversor DC/AC es el dispositivo de electrónica de potencia encargado de convertir la energía en corriente continua proveniente de paneles solares o baterías en corriente alterna apta para alimentar cargas o interactuar con la red. Dentro de la microrred, este elemento no solo cumple una función de conversión energética, sino que también participa en la entrega estable de potencia hacia las cargas y en la articulación entre la parte DC del sistema y su operación en AC. [6]

Carga crítica: Una carga crítica es aquella que requiere continuidad de suministro aun en escenarios de perturbación o desconexión de la red principal. En la planeación de una microrred, la identificación de estas cargas permite establecer esquemas de prioridad y estrategias de desconexión de cargas menos esenciales durante la operación en isla, de manera que el sistema preserve la energía disponible para los elementos más importantes. [5]

Banco de pruebas didáctico: Un banco de pruebas didáctico es una plataforma experimental diseñada para reproducir, en un entorno controlado y seguro, el comportamiento de un sistema real con fines de enseñanza, investigación y validación. En el caso de una microrred educativa a escala de laboratorio, este tipo de infraestructura permite integrar fuentes renovables, convertidores, almacenamiento, cargas y estrategias de control, posibilitando que los estudiantes analicen el flujo de energía y validen diferentes condiciones de operación durante actividades de laboratorio. [6]

Estado del Arte

En Latinoamérica se han desarrollado diferentes experiencias orientadas a la implementación de bancos didácticos para el estudio de sistemas fotovoltaicos y microrredes. Un referente importante es el trabajo realizado en la Universidad Antonio Nariño, donde se diseñó un banco didáctico para pruebas de energía solar fotovoltaica que incluyó paneles, reguladores, baterías, inversores y guías de laboratorio, buscando facilitar la comprensión de conceptos como el efecto fotoeléctrico, la conexión de celdas y el dimensionamiento de sistemas autónomos y conectados a red [7].

De manera similar, en la Universidad Nacional de Caaguazú, en Paraguay, se implementó un banco fotovoltaico

con enfoque pedagógico que integró instrumentos de medición para analizar variables como irradiancia, temperatura, orientación e inclinación, además de permitir el estudio de curvas I-V (corriente-voltaje), efectos de sombreado y configuraciones con baterías e inversores. Esta propuesta evidenció la importancia de contar con infraestructura experimental para fortalecer la formación práctica en energías renovables [8].

En Colombia también se identifican antecedentes relevantes. En la Universidad Distrital Francisco José de Caldas se desarrolló una propuesta enfocada en el análisis de variables físicas que afectan la eficiencia de sistemas fotovoltaicos, permitiendo relacionar la teoría con condiciones reales de operación. Por su parte, la Universidad del Norte implementó el laboratorio UniGRID, basado en una red IEEE de 13 nodos escalada a nivel académico, con capacidad para integrar generación renovable, almacenamiento y cargas distribuidas para el estudio de fenómenos asociados a la operación de microrredes. Otro antecedente importante corresponde a la Universidad Nacional de Colombia, donde se planteó un laboratorio flexible para probar dispositivos eléctricos con una arquitectura modular que incorpora convertidores, protecciones y nodos de conmutación. Este tipo de configuración permite recrear escenarios de operación conectada a red y en isla, además de servir como plataforma para evaluar distintas estrategias de control en sistemas de distribución activos [9]-[10].

En conjunto, los antecedentes mencionados evidencian la importancia de contar con plataformas didácticas para el estudio de energías renovables y microrredes. Sin embargo, varios de estos desarrollos se concentran en sistemas fotovoltaicos aislados o en arquitecturas de laboratorio que no priorizan explícitamente la transición entre operación conectada a red y en isla como eje didáctico. En este sentido, la presente propuesta se diferencia por plantear una arquitectura modular orientada a la comprensión de dicha transición operativa, incorporando además criterios de seguridad, adquisición de variables y una estrategia de control jerárquico pensada para un entorno académico accesible.

III. Metodología

A. Enfoque Metodológico

El trabajo se desarrolló bajo un enfoque de diseño aplicado, orientado a la formulación de una propuesta técnica para un banco de pruebas de una microrred inteligente en entorno educativo. La metodología no se centró en la implementación física completa del sistema, sino en la definición estructurada de sus requerimientos, su arquitectura funcional, los subsistemas necesarios y las condiciones de operación segura. La secuencia general de etapas seguida para este proceso se presenta en la Fig. 1.



Fig. 1. Etapas metodológicas para la formulación del banco de pruebas.

En una primera etapa se identificaron las necesidades académicas y técnicas del banco de pruebas, definiendo su alcance como una plataforma didáctica capaz de integrar generación fotovoltaica, almacenamiento energético, conversión de potencia, monitoreo de variables eléctricas y análisis de operación conectada a red y en modo isla. A partir de ello, se establecieron criterios de modularidad, seguridad y aplicabilidad en laboratorio.

Posteriormente, se seleccionaron los subsistemas y materiales principales de la propuesta, considerando su función dentro de la microrred y su valor didáctico. Esta selección incluyó la etapa de generación, el sistema de almacenamiento, los elementos de conversión, las cargas, los dispositivos de protección y los componentes de adquisición de datos para supervisión.

Con base en estos elementos, se planteó la arquitectura general del banco de pruebas mediante representaciones funcionales como caja negra, caja transparente y diagrama de bloques. Además, se definieron las variables de monitoreo más relevantes, entre ellas tensión, corriente, potencia, frecuencia y estado de carga, junto con lineamientos de seguridad para su futura operación en laboratorio.

Finalmente, se estableció una planeación general de pruebas para etapas posteriores de implementación, contemplando escenarios como operación normal, variaciones de carga y transición entre conexión a red y modo isla. Como criterio de diseño, se priorizó el uso de niveles de tensión seguros para laboratorio, componentes de fácil adquisición y subsistemas con alto valor didáctico, de modo que la propuesta fuera técnicamente y económicamente viable, modular y replicable en contextos académicos de formación en ingeniería. De esta manera, la metodología permitió consolidar una propuesta técnica coherente, orientada a su desarrollo futuro y a su uso en procesos de formación e investigación.

IV. Resultados

A. Arquitectura General

Como resultado del proceso de diseño se obtuvo la propuesta de un banco de pruebas de una microrred inteligente orientado a un entorno educativo, concebido como una plataforma modular para el estudio integrado de generación fotovoltaica, almacenamiento energético, conversión de potencia, supervisión de variables eléctricas y análisis de distintos modos de operación. La propuesta se estructuró de manera que permitiera representar, en una escala de laboratorio, la interacción entre fuentes de energía, elementos de conversión, sistemas de control, cargas y mecanismos de monitoreo.

Desde una visión global, el sistema fue definido a partir de entradas, funciones internas y salidas, con el fin de establecer con claridad el propósito general del banco de pruebas y su comportamiento esperado. En esta formulación, las entradas principales corresponden a la energía solar fotovoltaica, la red eléctrica como respaldo, el perfil de cargas y los comandos de operación, mientras que las salidas incluyen la energía suministrada a las cargas, la telemetría, las alarmas o eventos, el modo de operación y las pérdidas asociadas al sistema. Esta representación general se resume en la Fig. 2.

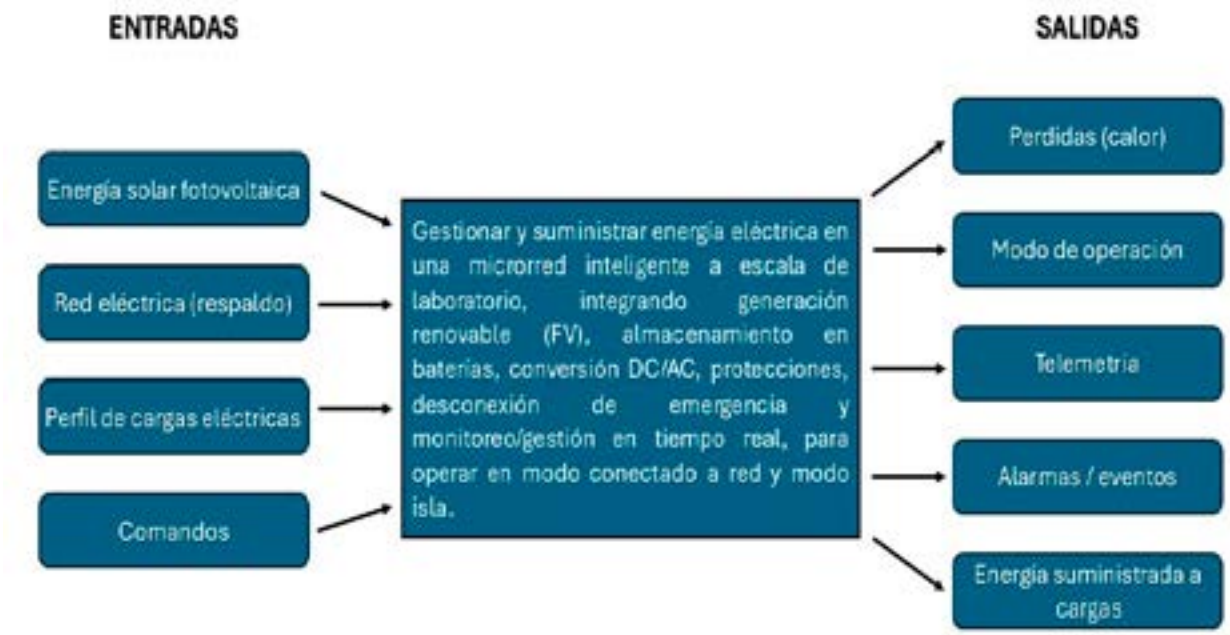


Fig. 2. Modelo funcional general en caja negra de la propuesta de banco de pruebas de la microrred inteligente.

B. Descripción Funcional del Sistema

Una vez definida la visión general del banco de pruebas, se planteó una representación funcional más detallada del sistema, en la que se identifican los procesos internos requeridos para su operación. En esta etapa se establecieron funciones asociadas a la captura de radiación solar, la conversión de energía fotovoltaica, el acondicionamiento y

regulación de energía en corriente continua, el almacenamiento, la conversión de corriente directa a corriente alterna, la medición de variables eléctricas, el procesamiento y control, y las conmutaciones necesarias para definir el modo de operación. Esta organización funcional permitió visualizar la relación entre los distintos subsistemas y entender cómo la información y la energía circulan a través del banco de pruebas. La Fig. 3 muestra esta representación en caja transparente.

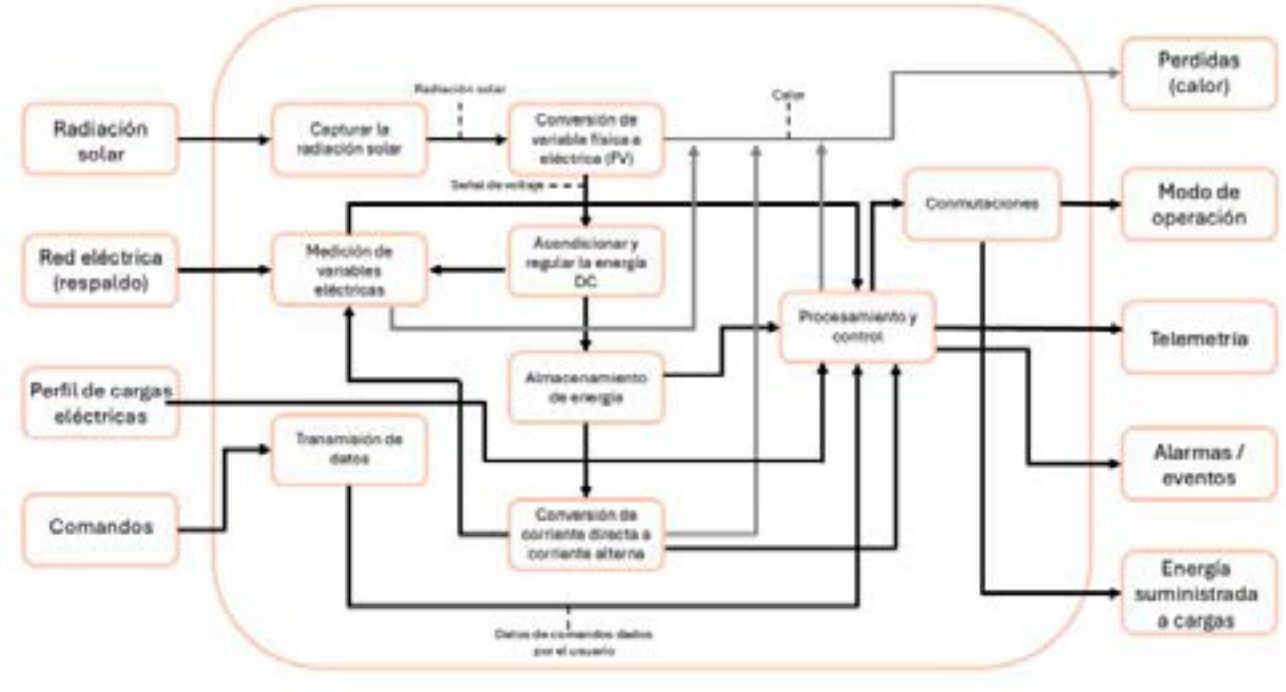


Fig. 3. Modelo funcional detallado en caja transparente del banco de pruebas propuesto.

C. Diagrama de Bloques de la Arquitectura Propuesta

A partir de la descripción funcional del sistema se consolidó una arquitectura general por bloques, orientada a representar de manera más concreta los elementos que conforman la propuesta. En esta arquitectura se definieron como subsistemas principales el panel solar, el regulador de voltaje DC, el banco de baterías, el inversor DC/AC, el bloque de medición de variables, el controlador, el módulo de conmutación red/isla, la visualización de variables y las cargas. La interacción entre estos elementos permite representar la operación de una microrred a escala, considerando la coexistencia de un bus DC, un bus AC y un bus de datos.

La arquitectura propuesta facilita el análisis de la relación entre generación, almacenamiento, conversión, supervisión y consumo, además de permitir una futura implementación organizada por etapas. En particular, el bloque de medición de variables y el controlador adquieren un papel central dentro de la propuesta, ya que constituyen el punto de enlace entre el comportamiento eléctrico del sistema y la capacidad de supervisarlo y gestionarlo en tiempo real. El diagrama de bloques definido para la propuesta se presenta en la Fig. 4.

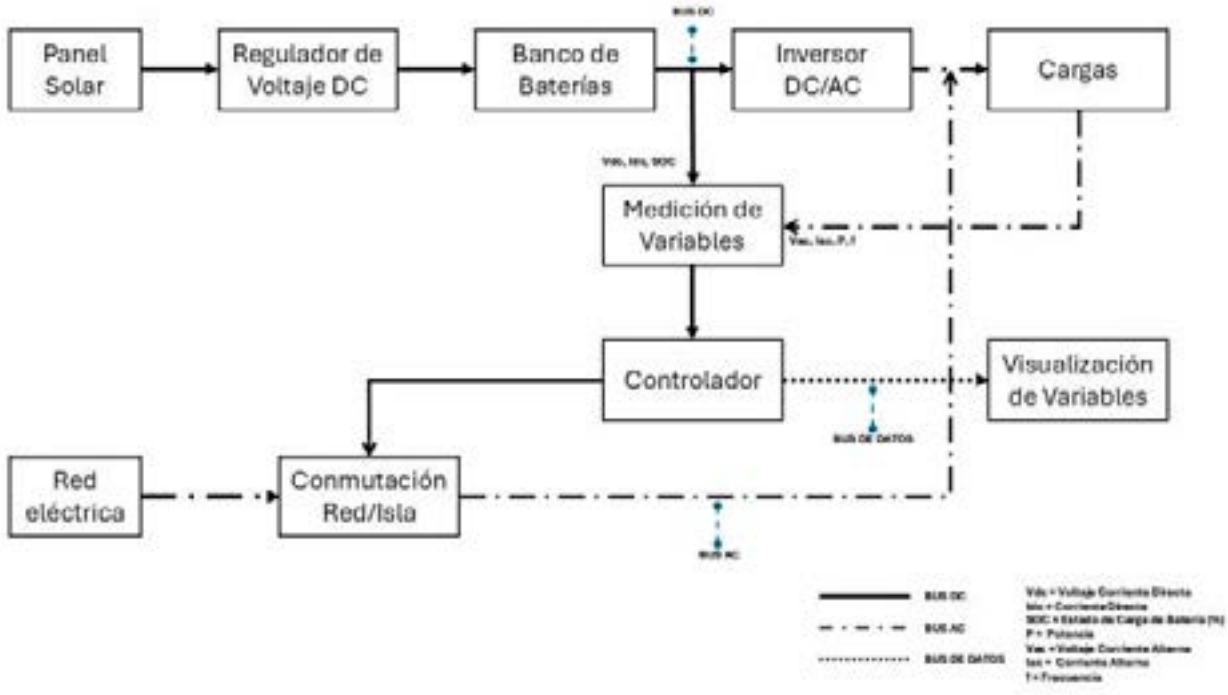


Fig. 4. Diagrama de bloques de la arquitectura propuesta para el banco de pruebas de la microrred inteligente.

Dada la arquitectura de bloques definida, se realizó el predimensionamiento y la selección de las especificaciones técnicas fundamentales para cada módulo. Estos parámetros, resumidos en la Tabla I, garantizan que el sistema opere en niveles de tensión seguros para el entorno de laboratorio (baja tensión) y tenga la capacidad de emular el comportamiento de una microrred real.

TABLA I. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PRELIMINARES DEL BANCO DE PRUEBAS.

Subsistema	Componente	Especificación Propuesta
Generación	Panel Solar Fotovoltaico	Módulo fotovoltaico de baja potencia, 20–50 W, 12 VDC
Acondicionamiento	Regulador de Carga	Controlador PWM (modulación por ancho de pulso) o MPPT (máximo punto de transferencia de potencia), 12V/24V
Almacenamiento	Banco de Baterías	Batería AGM sellada, 12 VDC
Conversión AC	Inversor DC/AC	Inversor de onda senoidal, salida a 120 VAC
Instrumentación	Sensores de Tensión y Corriente	Módulos compatibles con microcontroladores (Ej. INA219, ZMPT101B)
Control	Unidad de Procesamiento	Microcontrolador (Ej. ESP32, Arduino)

D. Consideraciones de Dimensionamiento Preliminar

Con el fin de establecer criterios técnicos iniciales para la implementación futura del banco de pruebas, se consideró un balance básico de potencia entre generación, almacenamiento y carga. En términos generales, la operación propuesta del sistema puede expresarse mediante la relación:

$$P_{gen} + P_{red} = P_{cargas} + P_{perdidas} + P_{alm} \quad (1)$$

donde P_{gen} es la potencia generada por la fuente fotovoltaica, P_{red} la potencia suministrada por la red de respaldo, P_{cargas} la demanda total de carga, $P_{perdidas}$ las pérdidas internas del sistema y P_{alm} la potencia asociada al almacenamiento energético.

Asimismo, la potencia total demandada por las cargas puede estimarse como:

$$P_{total} = \sum_{i=1}^{n} P_i \quad (2)$$

donde P_{total} representa la potencia total demandada, P_i la potencia nominal de la carga i y n el número de cargas incluidas en el banco de pruebas.

A partir de esta estimación, puede establecerse un criterio preliminar para la selección del inversor, cuya capacidad nominal debe ser al menos igual o superior a la potencia total.

$$P_{inversor} \geq P_{total} \quad (3)$$

donde $P_{inversor}$ es la potencia nominal del inversor y P_{total} es la potencia total demandada por las cargas.

Para el almacenamiento, una estimación inicial de la energía disponible en el banco de baterías puede expresarse como:

$$E_{batería} = V_{batería} * \ Ah \quad (4)$$

donde $E_{batería}$ es la energía almacenada en la batería, $V_{batería}$ es el voltaje nominal del banco de baterías y Ah es la capacidad nominal expresada en amperio-hora.

A partir de esta energía disponible, puede proyectarse un tiempo de autonomía aproximado dado por:

$$t = \frac{E_{batería}}{P_{cargas}} \quad (5)$$

donde t es el tiempo estimado de autonomía.

E. Diagrama General de Conexión Eléctrica

Como resultado de la ingeniería de detalle, se consolidó el diagrama general de conexión eléctrico correspondiente a las estaciones de generación de energía solar fotovoltaica del banco de pruebas (ver Fig. 5). Es importante precisar que este diseño estructural se enfoca exclusivamente en la etapa de generación y conversión de energía; por lo tanto, tiene en cuenta la integración del panel solar, el controlador de carga para la gestión de la batería y el respectivo inversor DC/AC. Este esquema detalla tanto el bus de corriente continua (DC) como la etapa de conversión a corriente alterna (AC), destacando la inclusión de instrumentación en nodos críticos para la adquisición de datos en tiempo real. Específicamente, los puntos marcados con la letra "A" corresponden a las mediciones de voltaje y corriente en DC, ubicados estratégicamente a la salida de la generación fotovoltaica y en los bornes del sistema de almacenamiento. Por otro lado, los puntos marcados con la letra "B" representan los sensores encargados de medir el voltaje y la corriente en AC a la salida del inversor, justo antes de la alimentación de las cargas. Asimismo, en el diagrama se integran elementos de protecciones eléctricas (como lo pueden ser fusibles e interruptores termomagnéticos) que permiten al estudiante interactuar con el sistema de forma segura. Este diseño establece el módulo base de potencia e instrumentación sobre el cual, en una fase posterior, se acoplará el sistema de control centralizado y el módulo de conmutación red/isla para completar la arquitectura de la microrred.

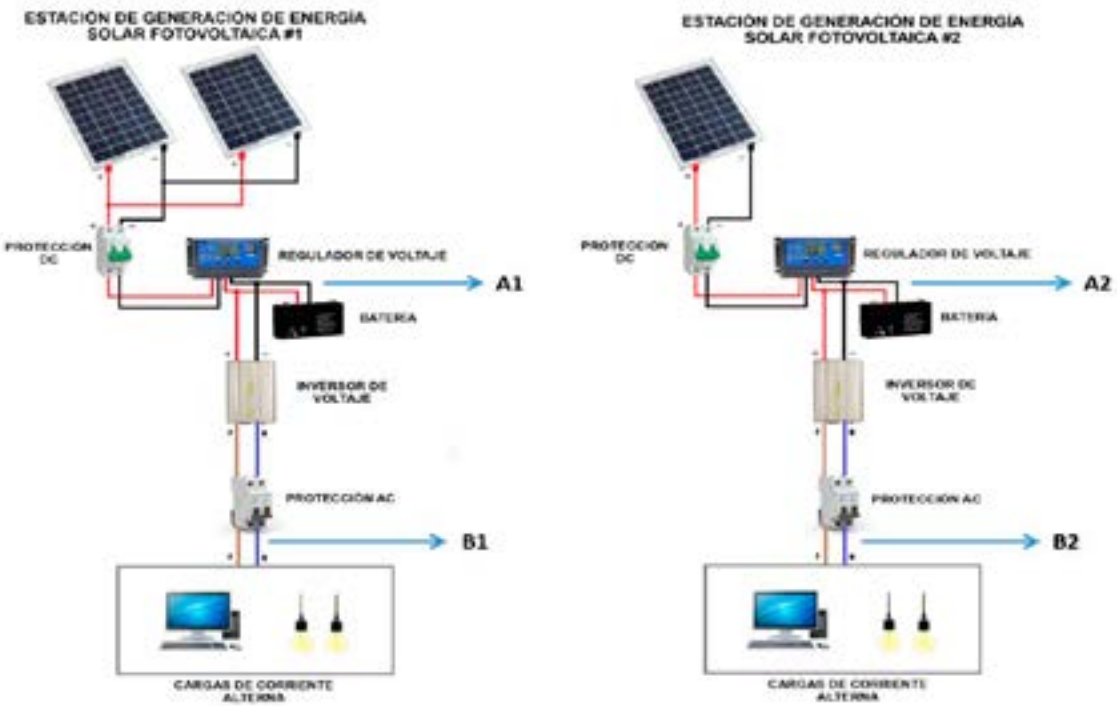


Fig. 5. Diagrama de conexión eléctrica e instrumentación de las estaciones de generación fotovoltaica.

F. Estrategia de Control Centralizado y Gestión de Demanda

Para garantizar la estabilidad y eficiencia del banco de pruebas, se ha diseñado una arquitectura de control jerárquica que gestiona el flujo de energía y la resiliencia del sistema. En esta estructura, cada estación de generación fotovoltaica dispone de un módulo de control específico encargado de la adquisición de datos local y la ejecución de maniobras inmediatas. Estos módulos transmiten la información procesada a un módulo de control centralizado, el cual actúa como el supervisor de la microrred y toma las decisiones finales sobre la conmutación entre el modo isla y el modo conectado a red. La gestión de la demanda se fundamenta en la clasificación de las cargas en dos tipos:

- *Cargas críticas:* Aquellas que requieren un suministro ininterrumpido debido a su importancia en el proceso emulado.
- *Cargas no críticas:* Aquellas que pueden ser desconectadas temporalmente para preservar la estabilidad del sistema.

El algoritmo de control propuesto sigue una lógica de prioridad ante eventos de sobrecarga o baja generación:

- *Desconexión selectiva:* Si el consumo de las cargas supera la capacidad de una estación de generación, su módulo de control específico decide qué cargas no críticas "apagar" para priorizar el suministro a las cargas críticas.
- *Cooperación entre estaciones:* En caso de que la potencia local siga siendo insuficiente tras el corte de cargas no críticas, el módulo específico solicita apoyo al control centralizado. Este último evalúa el estado de las demás estaciones de generación y, si alguna dispone de excedentes de potencia, coordina la transferencia de energía entre estaciones.
- *Conmutación a red convencional:* Si tras agotar las instancias de gestión local y apoyo entre estaciones la potencia sigue siendo deficiente para cubrir la demanda crítica, el módulo centralizado toma la decisión de conmutar al modo conectado a red. En este escenario, la red eléctrica principal asume la responsabilidad de suministrar la energía, garantizando que el sistema nunca pierda su funcionalidad.

Esta lógica de operación, cuyo algoritmo de toma de decisiones se presenta detalladamente en el diagrama de flujo de la Fig. 6, permite a los estudiantes de ingeniería experimentar con conceptos de control distribuido y resiliencia eléctrica, observando en tiempo real cómo el sistema responde autónomamente ante perturbaciones en la demanda o variaciones en la fuente de energía renovable.

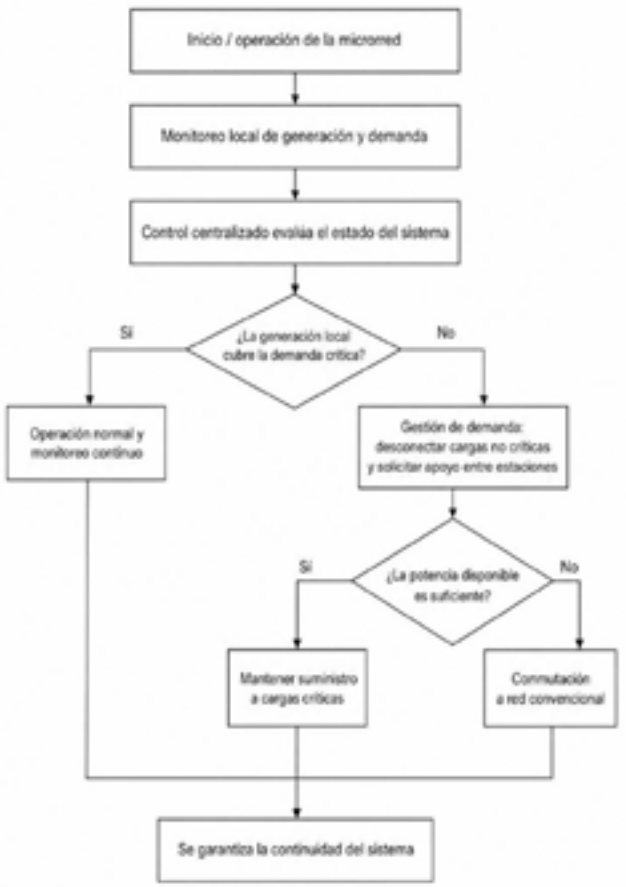


Fig. 6. Diagrama de flujo del algoritmo de gestión de energía y conmutación de modos de operación.

V. Impacto Esperado y Trabajo Futuro

El diseño de este banco de pruebas proporcionará una plataforma técnica concreta para la experimentación con microrredes en entornos académicos. Su implementación habilitará el desarrollo de prácticas de laboratorio estructuradas en áreas como electrotecnia, instrumentación, control y sistemas de potencia, facilitando a los estudiantes la validación empírica de algoritmos de gestión energética y conmutación de redes.

Como trabajo futuro se plantea, en primer lugar, la implementación física del banco de pruebas mediante el ensamblaje de los módulos de generación, almacenamiento, conversión e instrumentación. En segundo lugar, se proyecta el desarrollo del software de supervisión y control para los módulos locales y el EMS centralizado, incluyendo una interfaz de visualización de variables. Finalmente, se prevé la ejecución de pruebas operacionales bajo distintos perfiles de carga y escenarios de conmutación red/isla, con el fin de validar el comportamiento del sistema y medir su respuesta ante perturbaciones.

VI. Conclusiones

El desarrollo de este diseño técnico establece una arquitectura modular para la experimentación con microrredes inteligentes. La metodología de diseño empleada permitió integrar de forma coherente los subsistemas de generación fotovoltaica, almacenamiento de energía y conversión de potencia, facilitando el análisis de los flujos de energía y datos en un entorno de laboratorio.

La lógica de control jerárquico y la estrategia de gestión de demanda propuestas están orientadas a preservar la estabilidad operativa mediante la priorización de cargas críticas y la automatización de la conmutación. Este enfoque plantea una respuesta técnica estructurada frente a variaciones en la generación renovable o incrementos en la demanda, y constituye una base funcional para su futura validación en condiciones tanto autónomas como conectadas.

Los resultados del diseño definen especificaciones preliminares de hardware y lineamientos de instrumentación para la fase de construcción. En este sentido, la propuesta consolida una infraestructura de medición escalable y una lógica general de operación autónoma, proporcionando una base técnica para la futura implementación de un sistema de gestión de energía (EMS) en un entorno académico de redes inteligentes.

Referencias

[1] R. H. Lasseter, “Microgrids,” in Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 1, 2002, pp. 305–308.

[2] H. Farhangi, “The path of the smart grid,” IEEE Power and Energy Magazine, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, 2010.

[3] C. W. Gellings, The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response. Lilburn, GA, USA: Fairmont Press, 2009.

[4] C. A. Díaz Andrade and J. C. Hernández, “Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica – Estado del Arte,” Sistemas & Telemática, vol. 9, no. 18, pp. 53–81, 2011.

[5] S. Booth, J. Reilly, R. Butt, M. Wasco, and R. Monohan, Microgrids for Energy Resilience: A Guide to Conceptual Design and Lessons from Defense Projects. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2020.

[6] A. N. Akpolat, Y. Yang, F. Blaabjerg, E. Dursun, and A. E. Kuzucuoğlu, “Design Implementation and Operation of an Education Laboratory-Scale Microgrid,” IEEE Access, vol. 9, pp. 57949–57966, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072899.

[7] A. Mendoza, Banco de pruebas didáctico para energías fotovoltaicas en Colombia. Bogotá, Colombia: Universidad Antonio Nariño, 2022.

[8] M. Duarte and M. Paredes, Diseño de un banco de pruebas fotovoltaico modular para fines didácticos. Paraguay: Universidad Nacional de Caaguazú, 2025.

[9] I. Oliveros, J. C. Orduz, and A. J. Rodríguez, “UniGRID: Laboratorio de microrredes inteligentes en la Universidad del Norte,” Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 2020.

[10] I. Oliveros, Laboratorio flexible para probar dispositivos eléctricos y emular microrredes. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2020.

Hybrid Machine Learning Approaches for Rainfall Forecasting and Hydrometeorological Alert Support in a Tropical Colombian Basin

1st Julián David Beltrán-Ardila
Faculty of Engineering
EAN University, Bogotá, Colombia
jbeltra57749@universidadean.edu.co

2nd Juan Felipe Garzón-Vallejo
Faculty of Engineering
EAN University, Bogotá, Colombia
jfgarzo21094@universidadean.edu.co

3rd Cristian Steven Ñustes-Hernández
Faculty of Engineering
EAN University, Bogotá, Colombia
cnustes78568@universidadean.edu.co

4th Diana Angélica Varela-Martínez
Dept. of Basic Sciences
EAN University, Bogotá, Colombia
davarela@universidadean.edu.co

5th Diego Armando García-García
Dept. of Basic Sciences
EAN University, Bogotá, Colombia
dagarcia@universidadean.edu.co

6th Lina María Chacón-Rivera
Faculty of Engineering
EAN University, Bogotá, Colombia
lmchacon@universidadean.edu.co

7th Hernán Antonio Montoya-Uribe
Faculty of Admin. & Finance
EAN University, Bogotá, Colombia
hamontoya@universidadean.edu.co

***Abstract*—Reliable short-term precipitation forecasting remains a central challenge for hydrometeorological warning operations in tropical river basins subject to El Niño–Southern Oscillation variability. This paper presents the design and performance evaluation of a hybrid machine learning framework for precipitation prediction and categorical alert support in La Dorada, a flood-prone municipality in the middle reach of Colombia's Magdalena River. An ensemble combining a Long Short-Term Memory (LSTM) network and an XGBoost model through Ridge meta-learning was trained on six years of multi-source atmospheric observations (IDEAM, NASA POWER) and evaluated against four diagnostic rainfall regimes. The stacked ensemble achieved $R^2 = 0.951$ and RMSE = 2.38 mm h^{-1}, outperforming both standalone models in continuous prediction through a bias-correction mechanism rather than adaptive regime switching. For threshold-based alert classification, the standalone XGBoost model delivered the highest macro-F1 (0.979) against 0.958 for the ensemble, revealing a regression–classification asymmetry with direct implications for operational warning systems. A four-level alert framework calculated to IDEAM thresholds is presented alongside a model selection decision criterion for engineering teams deploying precipitation-driven risk classification systems in data-constrained tropical environments.**

Keywords—*Short-term precipitation forecasting; hybrid ensemble learning; LSTM; XGBoost; hydrometeorological alerts; ENSO variability; Magdalena River*

I. Introduction

Flood events in tropical river basins represent the most frequent and socially impactful category of hydrometeorological hazard in Latin America, yet the operational warning systems designed to mitigate their consequences continue to depend heavily on threshold-based monitoring without access to reliable short-term quantitative forecasts [3]. La Dorada, a municipality of approximately 85,700 inhabitants in the middle reach of Colombia's Magdalena River (5°27′N, 74°40′W; 176 m a.s.l.), exemplifies this vulnerability. Its flat alluvial topography, proximity to four converging rivers, and high proportion of flood-exposed urban population make it a priority study site for precipitation-driven warning improvement [12]. During the 2010–2011 La Niña episode, flows exceeding 6,500 $m^3 s^{-1}$ and flood stages above 6.66 m inundated eight neighborhoods and displaced nearly 1,000 residents.

Precipitation in this basin combines bimodal seasonality driven by the Intertropical Convergence Zone with pronounced interannual variability modulated by the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), which systematically shifts the probability and intensity of extreme wet and dry episodes [4]. This superposition of forcing mechanisms creates strongly nonlinear relationships between atmospheric predictors and local rainfall that are difficult to resolve with traditional statistical or physical models at short lead times.

Machine learning and deep learning methods have demonstrated increasing skill in hydrometeorological prediction, with evidence that different architectures exploit complementary aspects of the atmospheric prediction problem [11]. Long Short-Term Memory networks capture temporal persistence and lagged dependencies in sequential data [5], while gradient boosting frameworks such as XGBoost represent nonlinear predictor interactions and abrupt state transitions more efficiently [6]. Stacked ensemble methods provide a principled means of combining these architectures to exploit complementary error structures [7], [8]. However, a systematic gap remains in the literature: most published frameworks evaluate either regression accuracy or classification performance, but rarely both within the same study and with

explicit reference to their operational implications for alert-support systems.

This paper addresses that gap by presenting the design and performance evaluation of a hybrid LSTM–XGBoost ensemble for La Dorada, integrating a four-level alert classification framework calibrated to operational hydrometeorological thresholds. Full methodological details, sensitivity analyses, and reproducible code are reported in the companion deposited manuscript [1] and archived code base [2]. The present contribution focuses on the engineering implications of the results: how different model configurations serve different operational objectives, and how the observed regression–classification asymmetry should inform the design of decision support systems in flood-prone tropical basins.

II. Study Area, Data, and Methods

A. Study Setting and Data Sources

La Dorada's climate is warm and humid, with mean annual precipitation of 2,000–3,000 mm, mean temperatures consistently above 27°C, and a bimodal rainfall cycle that is sensitive to ENSO-driven interannual perturbations. The predictor dataset integrated ground-based hourly observations from the IDEAM station No. 23037010 and reanalysis-derived atmospheric fields from the NASA POWER/MERRA-2 platform, covering January 2018 to December 2023. Predictors included near-surface air temperature, relative humidity, wind speed and direction, and cyclic time encodings capturing seasonal structure. Preprocessing included outlier screening, time-based gap interpolation for short discontinuities, continuous standardization, and chronological partitioning to prevent information leakage from future periods into model calibration.

B. Machine Learning Framework

Three model configurations were developed and evaluated. The LSTM base learner consisted of stacked recurrent layers trained on sliding windows of hourly predictor sequences, implementing gated memory operations to represent temporal persistence in precipitation dynamics [5]. The XGBoost base learner operated on tabular predictor representations and was hyperparameter-tuned through chronological five-fold cross-validation [6]. The stacked ensemble combined both base models through a Ridge-regularised meta-learner (RidgeCV), which determined the relative contribution of each base model from out-of-sample predictions rather than through equal weighting [7], [9]. All models were trained and evaluated on temporally ordered partitions, and performance was assessed over the full test period and across four diagnostic rainfall regimes: general conditions, sustained rainfall, abrupt dry-to-wet transitions, and extreme events. Full architecture specifications and training details are documented in [1].

C. Alert Classification Framework

Continuous precipitation predictions were converted to categorical warning levels using four operationally calibrated thresholds adapted from IDEAM hydrometeorological guidelines for La Dorada's flood risk profile (Table I). An F_2 score weighting recall twice as heavily as precisions was used as the primary optimization criterion for alert classification, reflecting the asymmetric consequence structure in which missed high-precipitation events carry greater social risk than precautionary false alarms.

TABLE I

Four-Level Hydrometeorological Alert Framework for La Dorada

Level	Threshold (mm h⁻¹)	Code	Operational response
1 – Normal	< 5	Green	No immediate action
2 – Moderate	5–15	Yellow	Monitor; notify cooperatives
3 – High	15–30	Orange	Prepare evacuation; restrict riverside activity
4 – Extreme	> 30	Red	Activate emergency protocols

Thresholds adapted from IDEAM and CMGRD operational guidelines.

III. Results

A. Overall Regression Performance

The stacked ensemble achieved the best continuous prediction skill across the full evaluation period (Table II). Relative to the standalone XGBoost, the ensemble reduced RMSE by 7.3% (2.57 to 2.38 mm h⁻¹), improved R^2 by 0.018 (0.933 to 0.951), and reduced MAE by 13.4% (0.237 to 0.205 mm h⁻¹), while producing the smallest absolute bias among the three models (+0.02 mm h⁻¹). The standalone LSTM remained substantially below both alternatives, explaining less than half of precipitation variance ($R^2 = 0.486$) and exhibiting a persistent underestimation bias of −1.85 mm h⁻¹. Diagnostic analysis of the fitted Ridge meta-learner revealed that the ensemble improvement arose primarily through bias correction: the meta-learner assigned a dominant positive coefficient to XGBoost and a negative corrective weight to the LSTM, reducing the systematic underprediction that affected the stronger baseline rather than redistributing predictive dominance across regimes.

TABLE II

Overall Regression Performance on the Independent Test Period (mm h⁻¹)

Model	MAE	RMSE	R^2	Bias
LSTM	2.519	6.701	0.486	−1.85
XGBoost	0.237	2.569	0.933	−0.008
Ensemble	**0.205**	**2.380**	**0.951**	**+0.02**

Best values per metric in bold. Bias: positive indicates overestimation.

B. Regime-Specific Performance

Regime-specific evaluation revealed consistent rankings across all four diagnostic conditions (Table III). Under sustained rainfall, the ensemble achieved the lowest RMSE (2.46 mm h⁻¹) and nearly eliminated residual bias (+0.009 mm h⁻¹), contrary to the initial hypothesis that LSTM temporal memory would confer a structural advantage during persistent wet episodes. During abrupt transitions, XGBoost

demonstrated substantially stronger responsiveness to rapid atmospheric state changes (RMSE = 5.66, R^2 = 0.902), consistent with the capacity of gradient boosting to represent nonlinear threshold responses in predictor space [6], with the ensemble providing a further marginal improvement. Under extreme events, all models experienced approximately fourfold increases in RMSE relative to general conditions, confirming the intrinsic difficulty of resolving convective amplification at short time scales in this tropical lowland basin. The ensemble retained the lowest residual spread and smallest underprediction bias during these high-intensity episodes, providing a modest but consistent improvement that has practical value for warning systems where forecast errors under peak conditions carry the greatest operational consequences.

TABLE III

Regime-Specific Regression Performance by Model

Regime	Model	RMSE	R^2	Bias
Sustained	LSTM	5.69	0.687	−0.562
rainfall	XGBoost	2.66	0.932	−0.062
	Ensemble	**2.46**	**0.941**	**+0.009**
Abrupt	LSTM	12.78	0.503	−3.990
transitions	XGBoost	5.66	0.902	−0.250
	Ensemble	**5.41**	**0.911**	**+0.430**
Extreme	LSTM	16.80	0.420	−6.200
events	XGBoost	11.30	0.790	−1.100
	Ensemble	**10.40**	**0.826**	**+0.430**

RMSE and bias in mm h^{-1}. Best value per regime-metric pair in bold.

C. Alert Classification Performance and Regression–Classification Asymmetry

When continuous predictions were converted to threshold-based warning categories, the relative ranking among models diverged from the regression results (Table IV). The standalone XGBoost model achieved the highest macro-F1 score (0.979), outperforming both the ensemble (0.958) and the LSTM (0.820). The ensemble, despite its superior continuous prediction skill, produced lower categorical discrimination because the bias-correction adjustments introduced by the Ridge meta-learner shifted some predictions across classification boundaries in ways that reduced threshold-based sharpness relative to the uncorrected XGBoost output. This asymmetry constitutes a structurally important finding: improving regression skill through ensemble correction does not guarantee equivalent improvements in categorical warning performance, and the two objectives may impose conflicting demands on model design.

TABLE IV

Categorical Warning Performance on the Independent Test Period

Model	Precision	Recall	Macro-F1
LSTM	0.867	0.957	0.820
XGBoost	**0.993**	**0.993**	**0.979**
Ensemble	0.975	0.968	0.958

Best value per metric in bold. Macro-F1 averaged across the four alert levels.

IV. Engineering Implications and Discussion

The results yield a quantitative and practically applicable decision criterion for engineering teams designing precipitation-driven alert systems in data-constrained tropical basins. When the primary operational objective is accurate continuous rainfall estimation for hydrological routing, flood-plain inundation modelling, or reservoir management, the stacked ensemble is the preferred configuration, as it consistently minimizes systematic bias and residual variance across contrasting hydroclimatic regimes. When the primary objective is categorical warning assignment for emergency response activation, the standalone XGBoost model provides stronger threshold-based discrimination and should be maintained as the operational alert output, particularly given its superior performance in the medium and high alert categories that trigger evacuations and protocol activation.

For systems that must simultaneously serve both continuous estimation and risk classification purposes—the most common operational scenario in municipal early warning contexts such as La Dorada—maintaining both model configurations in parallel and selecting outputs according to the specific task represents the most robust engineering architecture. This dual-model approach requires no additional training infrastructure beyond what was already implemented and can be integrated into the existing API and alert notification logic without modifying the core data pipeline.

The finding that ensemble improvement arose through bias correction rather than adaptive regime switching carries a broader design implication. It suggests that the value of a weaker component model in a stacked framework resides not in its independent predictive skill but in its complementary error structure, which allows the meta-learner to correct systematic deviations in the stronger baseline [7], [13]. This principle is not specific to precipitation forecasting: it applies to any environmental decision support system where two model architectures with structurally different error profiles can be combined through a regularised linear meta-learner trained on chronologically ordered out-of-sample predictions.

Several limitations bound the current results. The analysis operates at hourly temporal resolution and does not resolve sub-daily convective organization relevant to flash-flood dynamics. The primary observational input derives from a single ground station, introducing uncertainty about spatial representativeness across the broader basin. The purely data-driven framework does not incorporate explicit physical process constraints—moisture convergence diagnostics, thermodynamic instability indices, or land–atmosphere coupling—that could improve

resolution of complex convective episodes. Physics-informed hybrid architectures that preserve the statistical flexibility demonstrated here while encoding physically interpretable process representations represent a productive direction for future development in the Magdalena River system.

V. Conclusions

This study designed and evaluated a stacked LSTM–XGBoost ensemble for short-term precipitation prediction and hydrometeorological alert support in La Dorada, Colombia, integrating a four-level operational alert classification framework calibrated to IDEAM thresholds. Three principal conclusions emerge with direct relevance to engineering practice.

First, the stacked ensemble consistently achieved superior continuous prediction skill ($R^2 = 0.951$; RMSE = 2.38 mm h^{-1}; bias = +0.02 mm h^{-1}) through a bias-correction mechanism rather than adaptive regime switching, with improvement holding across all four diagnostic rainfall regimes including extreme convective events.

Second, categorical warning performance exhibited an asymmetry with respect to regression gains: the standalone XGBoost model achieved the highest macro-F1 (0.979), outperforming the ensemble (0.958), because the bias-corrective adjustments of the meta-learner reduced threshold-based sharpness near decision boundaries. This regression–classification asymmetry defines a practical model selection criterion that should be applied explicitly in any flood warning system where continuous estimation and categorical alert assignment are both required.

Third, the framework is deployable without physical parameter calibration, relies on widely available atmospheric predictors, and is fully reproducible from the archived code base [2], making it directly transferable to other data-constrained tropical lowland basins where ENSO-modulated hydroclimatic variability, limited observational networks, and operational warning demands present analogous engineering challenges.

Acknowledgment

The authors acknowledge IDEAM for access to hydrometeorological station records, and NASA's POWER programme for gridded climate data. Computational resources were provided by EAN University. The authors also acknowledge the Research Management Office and student research groups of Universidad EAN for their institutional support throughout the development of this study.

References

[1] J. D. Beltrán-Ardila, J. F. Garzón-Vallejo, C. S. Ñustes-Hernández, D. A. Varela-Martínez, D. A. García-García, H. A. Montoya-Uribe, and L. M. Chacón-Rivera, "Stacked LSTM–XGBoost ensemble learning for short-term precipitation prediction under ENSO-modulated hydroclimatic variability: bias correction mechanisms, regime-dependent skill, and regression–classification asymmetry in a tropical lowland basin," Theor. Appl. Climatol. [deposited], 2026.

[2] J. D. Beltrán-Ardila et al., "Adaptive Ensemble Deep Learning for Short-Term Precipitation Prediction in a Tropical Fluvial Basin under Hydroclimatic Variability [code]," Zenodo, 2026. https://doi.org/10.5281/zenodo.19212475

[3] IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2021. https://doi.org/10.1017/9781009157896

[4] J. A. Marengo et al., "A drought monitoring and forecasting system for Brazil," Bull. Am. Meteorol. Soc., vol. 101, pp. E1605–E1612, 2020. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0271.1

[5] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long short-term memory," Neural Comput., vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, 1997.

[6] T. Chen and C. Guestrin, "XGBoost: a scalable tree boosting system," in Proc. 22nd ACM SIGKDD Int. Conf. Knowledge Discovery and Data Mining, 2016, pp. 785–794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

[7] D. H. Wolpert, "Stacked generalization," Neural Networks, vol. 5, no. 2, pp. 241–259, 1992.

[8] L. Breiman, "Stacked regressions," Mach. Learn., vol. 24, no. 1, pp. 49–64, 1996.

[9] A. E. Hoerl and R. W. Kennard, "Ridge regression: biased estimation for nonorthogonal problems," Technometrics, vol. 12, no. 1, pp. 55–67, 1970. https://doi.org/10.1080/00401706.1970.10488634

[10] X.-H. Le, H. V. Ho, G. Lee, and S. Jung, "Application of long short-term memory neural network for flood forecasting," Water Resour. Manag., vol. 36, pp. 339–356, 2022. https://doi.org/10.1007/s11269-021-03011-1

[11] S. Salcedo-Sanz et al., "Analysis, characterization, prediction, and attribution of extreme atmospheric events with machine learning and deep learning techniques: a review," Theor. Appl. Climatol., vol. 155, pp. 1–44, 2024. https://doi.org/10.1007/s00704-023-04571-5

[12] A. Valle-Garcia, S. Lozano-Bustamante, and Y. Camargo-Caicedo, "Spatial and temporal variability of temperature, precipitation, and solar radiation in Magdalena department, Colombia from 2000 to 2022," Heliyon, vol. 10, Art. e38372, 2024. https://doi.org/10.1016/j.heliyon 2024.e38372

[13] G. Abramowitz et al., "ESD Reviews: model dependence in multi-model climate ensembles: weighting, sub-selection and out-of-sample testing," Earth Syst. Dynam., vol. 10, pp. 91–105, 2019. https://doi.org/10.5194/esd-10-91-2019

Sistema De Generación De Hojas De Ruta Basadas En COBIT 2019® A Partir De Técnicas De Inteligencia Artificial: Avances Preliminares

Julián Andrés Hoyos Gómez
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
juliana.hoyosg@uqvirtual.edu.co

Luis E. Sepúlveda-Rodríguez
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
lesepulveda@uniquindio.edu.co

***Resumen*—Este artículo presenta los resultados preliminares del proyecto de grado Sistema de generación de hojas de ruta basadas en COBIT 2019® a partir de técnicas de inteligencia artificial. El proyecto tiene como objetivo determinar un sistema que permita generar hojas de ruta de gobierno y gestión de TI a partir del procesamiento de activos documentales organizacionales mediante técnicas de inteligencia artificial (IA). Se describen los resultados de tres fases completadas: (1) análisis de factibilidad de la integración IA–COBIT 2019®, que confirma su viabilidad técnica y metodológica; (2) identificación de activos documentales y patrones en necesidades, problemas y oportunidades (NPO) de las organizaciones colombianas, con una muestra de entidades públicas de distintos sectores; y (3) un estudio de mapeo sistemático (SMS) sobre técnicas de IA aplicables al análisis documental en contextos de gobierno de TI, del que se obtuvieron 42 estudios primarios. Los resultados muestran que técnicas como NLP, similitud semántica, grafos de conocimiento y modelos de aprendizaje automático son las más reportadas para transformar información documental en insumos estructurados para la toma de decisiones en COBIT 2019®, y se propone una taxonomía de cuatro dimensiones que organiza el estado del arte en este campo.**

Palabras clave*—*COBIT 2019®, inteligencia artificial, hojas de ruta, procesamiento de lenguaje natural, gobierno de TI, activos documentales, mapeo sistemático.

I. Introducción

La elaboración de hojas de ruta para el gobierno y la gestión de las Tecnologías de la Información (TI) alineadas con el marco COBIT 2019® implica interpretar múltiples activos organizacionales como planes estratégicos, políticas internas, matrices de riesgo e informes de auditoría y transformarlos en un conjunto priorizado de acciones. Este proceso presenta variabilidad metodológica, demanda tiempo y depende del criterio experto de los equipos o consultores encargados de aplicar el marco [1], [2].

En este contexto, el proyecto de grado *Sistema de generación de hojas de ruta basadas en COBIT 2019® a partir de técnicas de inteligencia artificial* busca determinar un sistema que, por medio del procesamiento de activos documentales con técnicas de IA, permita generar hojas de ruta preliminares alineadas con COBIT 2019®. El proyecto contribuiría a reducir el tiempo de diagnóstico inicial y la variabilidad metodológica asociada a la interpretación de activos organizacionales, estandarizar la identificación de NPO, y ofrecer un soporte técnico para la toma de decisiones en gobierno de TI [2].

Este artículo reporta los avances obtenidos en las tres primeras fases del proyecto: (1) determinación de oportunidades para el uso de técnicas de IA dentro de COBIT 2019®; (2) identificación de activos documentales y patrones en NPO de las organizaciones; y (3) un estudio de mapeo sistemático (SMS) sobre técnicas de IA aplicables al análisis documental en el contexto del gobierno de TI. Las fases restantes selección de la técnica de IA, diseño, desarrollo y validación del prototipo se encuentran en curso.

El artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección II presenta el marco conceptual; la Sección III describe la metodología general del proyecto; la Sección IV reporta los resultados de las fases completadas; la Sección V discute los hallazgos; y la Sección VI presenta las conclusiones y el trabajo futuro.

II. Marco Conceptual

A. COBIT 2019® como marco de gobierno y gestión de TI

COBIT 2019®, desarrollado por ISACA, es un marco ampliamente aceptado para el gobierno y la gestión de TI que proporciona principios, objetivos y componentes orientados a maximizar el valor de la información y la tecnología en las organizaciones [4]. El marco organiza el sistema de gobernanza mediante componentes interrelacionados procesos, estructuras organizativas, políticas, flujos de información, cultura y habilidades e introduce once factores de diseño que permiten personalizar el sistema de gobernanza según las características específicas de cada organización [4].

La Guía de Diseño e Implementación de COBIT 2019® establece que, antes de aplicar sus dominios y procesos, se requiere un análisis detallado del entorno organizacional orientado a identificar las NPO que servirán como base para diseñar el sistema de gobernanza [4]. Este proceso analítico previo resulta complejo por la diversidad de formatos documentales y la ambigüedad del lenguaje natural presente en los activos organizacionales.

B. *Inteligencia artificial y análisis documental*

En el contexto de este proyecto, el término "técnicas de inteligencia artificial" comprende métodos capaces de procesar y estructurar información textual proveniente de activos documentales. Entre las técnicas más relevantes se encuentran el procesamiento de lenguaje natural (NLP), las medidas de similitud semántica, los modelos de grafos de conocimiento y los algoritmos de aprendizaje automático [5], [6].

Trabajos previos han demostrado que estas técnicas son aplicables al análisis de documentos organizacionales en contextos de gobierno de TI. Pradipta et al. [5] desarrollaron un sistema recomendador basado en COBIT 2019® que utiliza redes LSTM y TF-IDF para alinear objetivos empresariales con objetivos de gobernanza. Arif Sanjani et al. [6] propusieron un modelo de grafos de conocimiento combinado con TF-IDF para automatizar la identificación de actividades relevantes en auditorías. Teguh et al. [7] integraron IA con el objetivo BAI11 de COBIT 2019® para mejorar la gestión de proyectos mediante modelos predictivos de Machine Learning.

C. *Hojas de ruta en gobierno de TI*

Las hojas de ruta estratégicas son instrumentos complejos de planificación que permiten establecer metas y estimar el potencial de acciones en un horizonte temporal definido [8]. En el contexto de COBIT 2019®, representan el resultado del proceso de diseño del sistema de gobernanza: una secuencia priorizada de acciones que guía la implementación y mejora continua de la gobernanza de TI, considerando factores como la estrategia empresarial, el perfil de riesgo y el rol de TI en la organización [4].

III. Metodología

El proyecto se estructura en siete fases secuenciales: (1) determinación de oportunidades para el uso de IA en COBIT 2019®; (2) identificación de activos documentales y patrones en NPO; (3) identificación y análisis de técnicas de IA aplicables mediante SMS; (4) selección de la técnica de IA; (5) diseño de la solución; (6) desarrollo del prototipo funcional; y (7) validación mediante casos de estudio. Este artículo reporta los resultados de las fases 1, 2 y 3.

La Fase 1 se apoya en una revisión bibliográfica y un análisis de factibilidad técnica, metodológica y organizacional de la integración IA–COBIT 2019®. La Fase 2 combina análisis documental de fuentes organizacionales públicas colombianas con la construcción de una matriz de relación entre activos documentales y factores de diseño de COBIT 2019®. La Fase 3 emplea la metodología de Estudio de Mapeo Sistemático (SMS) descrita por Sepúlveda-Rodríguez et al. [9], que adapta los lineamientos de Kitchenham et al. [13] y Budgen et al. [14] para la construcción de SMS en ingeniería de software. El proceso se soportó en la herramienta SMS-Builder [12] y siguió el protocolo GQM–PICOC para la definición de objetivos, preguntas de investigación y métricas.

IV. Resultados

A. *Fase 1: Factibilidad de la integración IA–COBIT 2019®*

El análisis de factibilidad permitió concluir que la incorporación de técnicas de IA en la etapa previa a la aplicación de COBIT 2019® es viable desde tres perspectivas complementarias.

Desde el punto de vista técnico, existen métodos consolidados NLP, similitud semántica y aprendizaje automático capaces de procesar información proveniente de activos organizacionales y generar resultados estructurados alineados con los componentes y factores de diseño del marco [4], [5], [6]. El White Paper de ISACA [10] reconoce la compatibilidad mutua entre COBIT y sistemas de IA, afirmando que el marco es aplicable a todo el ciclo de vida de los sistemas de IA.

Desde el punto de vista metodológico, la integración es compatible con la estructura conceptual de COBIT 2019® siempre que se mantenga trazabilidad entre los resultados obtenidos por la IA y los componentes del marco, y se garantice la supervisión de expertos en gobierno de TI [4], [10]. La IA se concibe no como sustituto del analista humano, sino como un complemento que amplía su capacidad de interpretación y estandariza criterios de análisis.

Desde el punto de vista organizacional, la automatización del análisis documental puede reducir los tiempos de diagnóstico preliminar, disminuir la variabilidad metodológica e incrementar la reproducibilidad y auditabilidad del proceso de identificación de NPO [11].

B. *Fase 2: Activos documentales y patrones en NPO*

Se identificó un conjunto base de 20 tipos de activos documentales organizacionales, agrupados en cinco categorías: estrategia y dirección, política y normatividad interna, gestión operativa, control y evaluación, y riesgos y seguridad. Estos documentos fueron seleccionados con base en el marco COBIT 2019®, estándares internacionales (ISO/IEC 27001, ISO 31000, ISO 9001) y lineamientos del contexto colombiano, como el Modelo Integrado de Planeación y Gestión (MIPG) y el Decreto 767 de 2022 de MinTIC.

Se construyó una matriz de relación entre activos documentales y los diez factores de diseño de COBIT 2019® aplicables al análisis documental, utilizando una escala de relevancia tipo Likert con Alta (A), Media (M) y Baja (B). Los documentos con mayor relevancia transversal fueron el Plan Estratégico Institucional y el PETI/PETIC, que presentan relevancia alta para los factores de estrategia empresarial, metas empresariales y rol de TI. La Matriz de Riesgos de TI y la Política de Seguridad de la Información muestran alta relevancia para los factores de perfil de riesgo y panorama de amenazas.

La revisión de activos documentales de 15 entidades públicas colombianas incluyendo ministerios, departamentos administrativos y entidades de regulación permitió identificar patrones comunes en la organización documental. Se evidenció

heterogeneidad en la denominación de los documentos, lo que dificulta su identificación y asociación con categorías documentales según su función. Asimismo, en muchos casos los lineamientos de TI no se presentan como documentos independientes, sino integrados dentro de la documentación organizacional general. Finalmente, los registros de acciones correctivas y preventivas presentaron disponibilidad limitada en los repositorios públicos consultados.

C. Fase 3: Mapeo sistemático de técnicas de IA

El SMS se ejecutó siguiendo el protocolo de Sepúlveda-Rodríguez et al. [9], soportado por la herramienta SMS-Builder. Se definieron dos metas: (G1) clasificar enfoques y técnicas de IA aplicadas al análisis de información organizacional para la toma de decisiones en gobierno de TI; y (G2) clasificar modelos, arquitecturas o sistemas de IA para transformar información documental en insumos estructurados.

Las preguntas de investigación guía fueron: Q1) ¿Qué enfoques y técnicas de IA han sido utilizados en la literatura para el análisis de información organizacional orientado al gobierno y la gestión de TI?; y Q2) ¿Qué modelos, arquitecturas o sistemas de IA se reportan para transformar información documental organizacional en insumos estructurados para la toma de decisiones?

La estrategia de búsqueda combinó consultas en cinco bases de datos académicas (IEEE Xplore, Springer, Web of Science, Taylor & Francis y ScienceDirect) y técnicas de snowballing hacia adelante y hacia atrás. El corpus final quedó conformado por 42 estudios primarios seleccionados (SPS), distribuidos así: 5 provenientes de bases de datos (11,90%), 33 del snowballing (78,57%) y 4 de inclusión directa (9,52%). La Tabla I resume la estrategia de búsqueda.

TABLE I. RESULTADOS DE LA ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA DEL SMS

Estrategia	*Identificados*	*Tras criterios*	*Tras screening*	*Seleccionados*
Bases de datos	145	39	5	5 (11,90%)
Snowballing	343	145	33	33 (78,57%)
Inclusión directa	-	-	-	4 (9,52%)
Total	488	184	38	42 (100%)

Los criterios de calidad aplicados Content Validity Index (CVI), Study Citation Index (SCI) e Index of Relationship to Research Questions (IRRQ) confirmaron la pertinencia del corpus: el 100% de los SPS cumplió el CVI, el 50% cumplió plenamente el SCI y el 14,3% cumplió plenamente el IRRQ. La mayor concentración de estudios se encuentra en 2023 (8 SPS) y 2024 (15 SPS), con este último año presentando la mayor relevancia bibliométrica.

La clasificación por tópicos AI approach, AI technique, AI model y AI architecture evidenció que el tópico AI Technique agrupa la mayor cantidad de SPS (24), seguido de AI Approach (22), AI Model (11) y AI Architecture (6). Un mismo estudio puede pertenecer simultáneamente a más de un tópico.

El análisis de palabras clave de los SPS reveló que los términos con mayor frecuencia son: Decision-support (25), Artificial-Intelligence (24), Machine-Learning (21), IT-governance (18) y Organizational-data-analysis (14). Este patrón confirma que la literatura se orienta principalmente al uso de IA como mecanismo de soporte a la toma de decisiones en contextos organizacionales y de gobierno de TI, no como un fin técnico en sí mismo.

A partir del análisis de los SPS, se propuso una taxonomía que organiza los estudios en cuatro dimensiones: AI Approach (enfoques metodológicos de IA), AI Technique (técnicas específicas como NLP, TF-IDF, similitud semántica), AI Model (modelos concretos como redes neuronales, CatBoost, XGBoost) y AI Architecture (estructuras de sistemas que integran IA en esquemas de gobernanza). Esta taxonomía sirve como fundamento para la selección de la técnica de IA a emplear en el prototipo, actualmente en curso como Fase 4 del proyecto.

V. DISCUSIÓN

Los resultados de las tres fases completadas permiten identificar una convergencia entre los hallazgos del análisis de factibilidad (Fase 1), el inventario de activos documentales (Fase 2) y el estado del arte en técnicas de IA (Fase 3). Esta convergencia refuerza la pertinencia del enfoque propuesto y delimita el problema técnico que debe abordar el prototipo.

En primer lugar, la Fase 1 confirma que los activos documentales organizacionales presentan características diversidad de formatos, lenguaje natural, heterogeneidad estructural que dificultan su procesamiento manual. Precisamente, la Fase 2 evidenció que, incluso en organizaciones del sector público con obligaciones normativas de publicar su documentación, la denominación y estructura de los documentos no responde a un criterio uniforme.

En segundo lugar, el SMS confirma que NLP, similitud semántica y grafos de conocimiento son las técnicas más reportadas en la literatura para transformar documentos organizacionales en insumos estructurados orientados al gobierno de TI, en consonancia con los trabajos de Pradipta et al. [5] y Arif Sanjani et al. [6] identificados en la revisión preliminar del anteproyecto.

Finalmente, los hallazgos de las fases completadas confirman la pertinencia del enfoque propuesto y establecen las condiciones necesarias para avanzar hacia la construcción de un sistema que, a partir de activos documentales organizacionales, identifique NPO y las relacione con los factores de diseño y objetivos de COBIT 2019® mediante técnicas de IA con supervisión humana. La Fase 4 actualmente en ejecución tomará como insumo directo la taxonomía generada en el SMS para fundamentar la selección de la técnica más adecuada para el prototipo.

Es importante reconocer algunas limitaciones del estudio. La muestra de la Fase 2 se obtiene de entidades del sector público colombiano con documentación de acceso abierto, lo que puede no representar la diversidad documental del sector privado o de organizaciones de menor tamaño. En cuanto al SMS, la ventana de búsqueda y las bases de datos seleccionadas pueden no cubrir la totalidad de estudios relevantes publicados en idiomas

distintos al inglés o en fuentes no indexadas. Estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, pero deben tenerse en cuenta al interpretar el alcance de las conclusiones y orientarán los ajustes metodológicos en las fases siguientes del proyecto.

VI. Conclusiones

Este artículo presenta los resultados preliminares de un proyecto orientado a desarrollar un sistema de generación de hojas de ruta basadas en COBIT 2019® mediante técnicas de inteligencia artificial. Los principales aportes de las fases completadas son:

• La viabilidad técnica, metodológica y organizacional de integrar técnicas de IA en la etapa previa a la aplicación de COBIT 2019® fue confirmada, con un enfoque complementario al trabajo experto humano y con énfasis en la trazabilidad y auditabilidad de los resultados [10].

• Se construyó un inventario de 20 tipos de activos documentales organizacionales y una matriz de relación con los factores de diseño de COBIT 2019®, con evidencia empírica de patrones documentales en 15 entidades colombianas de diversas regiones y sectores.

• El SMS identificó 42 estudios primarios y propuso una taxonomía de cuatro dimensiones (AI Approach, AI Technique, AI Model, AI Architecture) que organiza el estado del arte sobre el uso de IA para el análisis documental en contextos de gobierno de TI.

Con una fecha de finalización proyectada para Agosto de 2026, el proyecto continuará con la selección de la técnica de IA más pertinente a partir de la taxonomía derivada del SMS (Fase 4), el diseño de la arquitectura de la solución (Fase 5), la implementación del prototipo funcional (Fase 6) y su evaluación mediante casos de estudio en organizaciones colombianas (Fase 7). A la finalización del proyecto, se espera que el prototipo resultante permita procesar activos documentales organizacionales, identificar NPO y establecer correspondencias trazables con los factores de diseño de COBIT 2019®, aportando un mecanismo reproducible y auditable que complemente el diagnóstico preliminar de gobernanza de TI.

VII. Trabajo futuro

Como trabajo futuro, se recomienda extender los resultados de este proyecto hacia su aplicación en contextos organizacionales reales, por ejemplo, mediante pasantías en empresas o entidades públicas colombianas que permitan validar el impacto del prototipo en condiciones de producción y con documentación real. Asimismo, se sugiere explorar la generalización del enfoque a otros marcos de gobierno y gestión de TI, como ISO/IEC 38500 o ITIL 4, así como la incorporación de mecanismos de retroalimentación que permitan al sistema aprender de las correcciones realizadas por los expertos durante la supervisión humana. Estas líneas constituyen oportunidades de continuación para trabajos de grado que tomen como base los resultados aquí reportados y los extiendan hacia niveles de madurez y validación superiores.

References

[1] ISACA, COBIT 2019 Framework: Introduction and Methodology, ISACA, 2018.

[2] M. Ghobakhloo, M. Iranmanesh, B. Foroughi, A. Rejeb, D. Nikbin y M.-L. Tseng, "A practical guide on strategic roadmapping for information and operations technology management," Journal of Industrial and Production Engineering, vol. 41, no. 5, pp. 397–421, 2024. https://doi.org/10.1080/21681015.2024.2325687

[3] ISACA, COBIT 2019 Design Guide: Designing an Information and Technology Governance Solution, ISACA, 2018.

[4] G. L. A. O. C. Pradipta, R. D. Ardy, R. Sarno y K. Sungkono, "A Recommendation System for Internal Business Processes of COBIT 2019 Using Graph Algorithm and Similarity Methods," en 2024 2nd International Conference on Technology Innovation and Its Applications (ICTIIA), pp. 1–6, 2024. https://doi.org/10.1109/ICTIIA61827.2024.10761562

[5] M. Arif Sanjani, U. I. Shabrina, W. Phedra, R. Sarno y K. R. Sungkono, "Knowledge graph models for business-IT alignment using COBIT 2019 and TF-IDF approaches," en 2024 2nd International Conference on Technology Innovation and Its Applications (ICTIIA), pp. 1–6, 2024. https://doi.org/10.1109/ICTIIA61827.2024.10761504

[6] A. Teguh, J. Slamet, H. Saputro, K. Sungkono y R. Sarno, "Optimizing IT Governance and Project Management in Software Development through AI Integration and COBIT 2019 Framework," en 2024 2nd International Conference on Technology Innovation and Its Applications (ICTIIA), pp. 1–6, 2024. https://doi.org/10.1109/ICTIIA61827.2024.10761914

[7] IfM Engage, University of Cambridge, "Strategic Roadmap," [En línea]. Disponible en: https://engage.ifm.eng.cam.ac.uk/why-a-strategic-roadmap-is-important/ [Accedido: may. 2026].

[8] L. E. Sepúlveda-Rodríguez, J. L. Garrido, J. C. Chavarro-Porras, J. A. Sanabria-Ordóñez, C. A. Candela-Uribe, C. Rodríguez-Domínguez y G. Guerrero-Contreras, "Study-based Systematic Mapping Analysis of Cloud Technologies for Leveraging IT Resource and Service Management: The Case Study of the Science Gateway Approach," Journal of Grid Computing, vol. 19, art. 41, 2021. https://doi.org/10.1007/s10723-021-09587-7

[9] ISACA, Leveraging COBIT for Effective AI System Governance, White Paper, ISACA, 2025. https://www.isaca.org/resources/white-papers/2025/leveraging-cobit-for-effective-ai-system-governance

[10] M. R. Lowry, P. B. Lowry, S. Chatterjee, G. D. Moody y V. J. Richardson, "Achieving strategic alignment between business and information technology with information technology governance," European Journal of Information Systems, pp. 1–26, 2024. https://doi.org/10.1080/0960085x.2024.2390998

[11] C. A. Candela-Uribe, L. E. Sepúlveda-Rodríguez, J. C. Chavarro-Porras, J. A. Sanabria-Ordóñez, J. L. Garrido, C. Rodríguez-Domínguez y G. Guerrero-Contreras, "SMS-Builder project," GitHub, 2020. https://github.com/grid-uq/sms-builder

[12] B. Kitchenham, R. Pretorius, D. Budgen, O. Pearl Brereton, M. Turner, M. Niazi y S. Linkman, "Systematic literature reviews in software engineering – a tertiary study," *Information and Software Technology*, vol. 52, no. 8, pp. 792–805, 2010.

[13] D. Budgen, M. Turner, P. Brereton y B. Kitchenham, "Using Mapping Studies in Software Engineering," en *Proceedings of PPIG*, vol. 8, pp. 195–204, 2008.

Solución Basada en Inteligencia Artificial para la Automatización de los Flujos de Trabajo en el Soporte al Servicio de Gestión de Máquinas Virtuales del Grupo de Investigación GRID

1st Jhon Sebastián Alzate Andica
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
jhons.alzatea@uqvirtual.edu.co

2nd Ismenia Marcela Guevara Ortíz
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
ismeniam.guevarao@uqvirtual.edu.co

3rd Luis Eduardo Sepúlveda Rodriguéz
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
lesepulveda@uniquindio.edu

Resumen—La creciente complejidad de las arquitecturas virtualizadas en entornos de infraestructura como servicio (IaaS) ha impulsado la alineación con el paradigma AIOps, el cual integra inteligencia artificial en las operaciones de TI, propiciando automatización y resiliencia en ecosistemas de nube complejos. Sin embargo, la implementación de soluciones medibles bajo este paradigma representa un desafío crítico para las organizaciones, en ese sentido, la gestión manual de máquinas virtuales (VMs) deriva en tiempos de respuesta elevados, riesgo de error humano y subutilización de recursos. Esta problemática se evidencia en el servicio de virtualización del Grupo de Investigación de Redes, Información y Distribución (GRID), adscrito a la Universidad del Quindío, donde la carencia de mecanismos automatizados limita la eficiencia operativa.

Este trabajo propone una solución basada en inteligencia artificial para automatizar los flujos de trabajo de gestión de infraestructura virtualizada del caso de estudio GRID, bajo el paradigma AIOps en entornos IaaS *on-premise*. La propuesta integra prácticas ágiles con principios de calidad orientados a la mejora continua, articulada en cinco fases secuenciales que abarcan desde el diagnóstico de necesidades operativas hasta la validación de un prototipo funcional en entornos controlados, sobre un marco de referencia de arquitectura basada en eventos (EDA).

Se proyecta que el prototipo funcional, previsto para el segundo semestre de 2026, valide la viabilidad del sistema agéntico, demuestre optimización en la tasa de utilización de recursos y reduzca la incidencia de fallos operativos por gestión manual, aportando evidencia tangible sobre el impacto de la inteligencia artificial en arquitecturas IaaS *on-premise* académicas.

Palabras clave—AIOps, Arquitectura basada en eventos (EDA), Automatización de flujos de trabajo, IaaS, Virtualización.

I. Introducción

En la actualidad, infraestructuras como servicio (IaaS) se han visto afectadas por la creciente complejidad y heterogeneidad de las infraestructuras virtualizadas a medida que aumenta la expansión y uso de la nube para la industria [1]. Este crecimiento, junto con el aumento en el volumen de información gestionada por estos sistemas, dificulta cada vez más la administración y reduce la flexibilidad de los entornos virtualizados, lo que exige enfoques de gestión basados en inteligencia artificial para adaptarse dinámicamente a dicha complejidad [2].

En el contexto colombiano, la transformación digital se refleja en una adopción cada vez mayor de servicios en la nube, donde aproximadamente el 72 % de las empresas declara utilizar tecnologías de computación en la nube, de acuerdo con la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) [3]. Hoy en día, las infraestructuras académicas colombianas, como las vinculadas a la Red Nacional Académica de Tecnología Avanzada (RENATA), disponen de servicios de conectividad avanzada y recursos de cómputo que soportan proyectos de ciencia, educación e innovación en las instituciones de educación superior del país [4]. En este contexto, resulta habitual que las universidades desplieguen infraestructura de virtualización local para mantener mayor control sobre la seguridad y el tratamiento de datos sensibles de investigación, bajo modelos de infraestructura como servicio (IaaS) en entornos *on-premise* [5],[6]. Estas arquitecturas requieren la supervisión permanente de operarios para el mantenimiento de los servicios, lo que no solo deriva en una gestión manual de la infraestructura, sino que genera puntos únicos de fallo cuando no se dispone de fundamento técnico suficiente para manipular los entornos virtualizados [7]. De manera similar, la Universidad del Quindío opera

infraestructura de virtualización local para proveer servicios de máquinas virtuales al grupo de investigación en redes, información y distribución (GRID), cuya administración recae sobre un único operario responsable de todos los flujos de trabajo críticos del servicio, lo que constituye precisamente el caso de estudio de este trabajo (véase Sección II).

En consecuencia, esta situación demanda la alineación de dichas arquitecturas con paradigmas estratégicos como la Inteligencia Artificial para Operaciones de TI (AIOps) [8]. Este enfoque facilita la automatización de procesos repetitivos y el análisis acelerado del entorno virtualizado, permitiendo establecer mecanismos de respuesta proactiva y de alta disponibilidad ante eventos que comprometan la continuidad del servicio [7].

El presente trabajo se articula como *Work in Progress* (WIP) entendido como una investigación en curso cuyos resultados son preliminares y cuyas fases finales de implementación y validación están aún en ejecución, que identifica en el grupo de investigación GRID una arquitectura virtualizada sobre una IaaS que presenta una baja madurez en la estandarización de procesos operacionales de virtualización, así como la gestión manual y centralizada en un único administrador encargado de dar soporte a los servicios. Este panorama evidencia limitaciones críticas en la utilización de los servicios, la eficiencia de las operaciones de soporte y la tolerancia a fallos en la continuidad [7].

Bajo esta perspectiva, el objetivo de la investigación es proveer un marco operacional asistido por IA que facilite la transición hacia un modelo de autogestión de flujos de trabajo en la infraestructura de virtualización. Más que la implementación aislada de un aplicativo, este modelo busca mitigar la dependencia de procesos manuales y eliminar el punto único de fallo en la administración de máquinas virtuales, proponiendo una gestión integral del servicio.

El presente artículo se organiza en cinco secciones principales. La primera sección aborda el contexto y la relevancia académica regional de las infraestructuras IaaS bajo el paradigma AIOps. La segunda sección describe la metodología propuesta, estructurada en cinco fases secuenciales que abarcan desde el diagnóstico de necesidades (NPO) y la selección de modelos de IA, hasta el diseño, implementación y validación del prototipo funcional. La tercera sección expone los resultados preliminares obtenidos y el impacto esperado tras la ejecución de las fases finales. Por su parte, la cuarta sección discute el enfoque de la investigación y sus limitaciones metodológicas. Finalmente, la sección quinta presenta las conclusiones sobre el estado actual del proyecto y las líneas de trabajo futuro.

II. Metodología Propuesta

El presente trabajo adopta un enfoque de investigación aplicada con una estructura iterativa de fases secuenciales fundamentada en marcos de referencia y estándares de calidad de organismos internacionales, utilizados en proyectos de desarrollo tecnológico de naturaleza aplicada, según la norma ISO 9001:2015, el marco de referencia ITIL 4, el estándar ISO/IEC 25010:2023 y el estándar IEEE Std 2841-2022 [9],[10],[11],[12].

Por lo anterior, este enfoque metodológico está orientado al diseño de un modelo de solución basado en herramientas y prácticas de inteligencia artificial, más que a la evaluación experimental de un prototipo funcional, cuya implementación está prevista como trabajo en curso. De este modo, las actividades metodológicas se organizan en cinco fases críticas a ejecutar dentro del cronograma de trabajo de grado, que abarcan actividades, desde el diagnóstico de necesidades operativas en el servicio, hasta la definición de una arquitectura basada en eventos (EDA) [13], bajo el paradigma AIOps, definido por Gartner como la convergencia del Big Data y el Machine Learning aplicados a las operaciones de TI [8].

Esta propuesta metodológica contempla la implementación y validación en entornos controlados que emulan el servicio de virtualización GRID, mediante un prototipo funcional, previsto para el segundo semestre de 2026.

Con el propósito de garantizar trazabilidad entre el problema identificado, el marco teórico y la propuesta de solución, la metodología se articula en las fases declaradas en los objetivos específicos del trabajo de grado. A la fecha de este artículo, la fase 1 se encuentra en desarrollo; las fases 2 a 5 constituyen el trabajo proyectado para el período junio – octubre de 2026, conforme al cronograma del trabajo de grado.

El diagrama mostrado en la Fig. 1 presenta la metodología estructurada en cinco fases secuenciales (F1-F5).

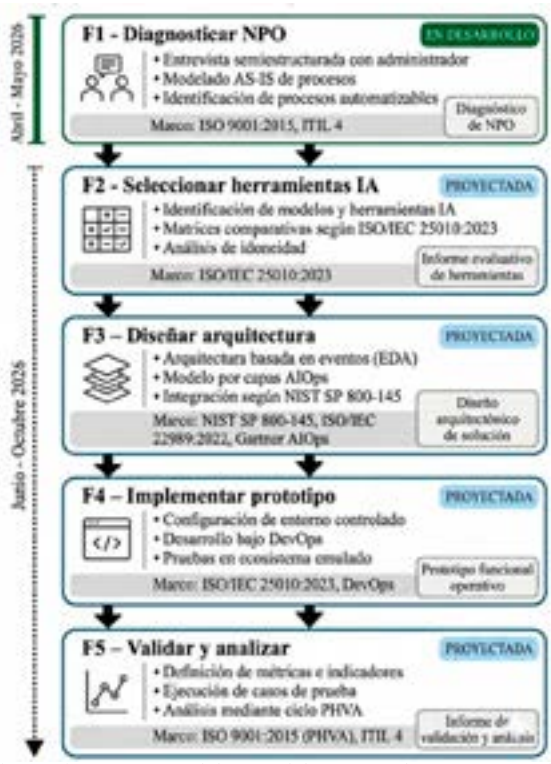


Fig. 1. Diagrama General de Metodología Completa. Fuente propia.

A. *Fase 1: Diagnosticar Necesidades, Problemas y Oportunidades (NPO) dentro del servicio de virtualización*

Por la extensión y complejidad del servicio de virtualización ofrecido por el grupo de investigación GRID, se planifica el desarrollo de la Fase 1, controlada mediante iteraciones con el administrador del servicio, esto con el fin de dar cumplimiento al entregable resultante definido como el diagnóstico de necesidades, problemas y oportunidades, que servirá de insumo para la fase 2, donde se seleccionarán los modelos y herramientas adecuados para la ejecución de la solución propuesta.

La fase 1 tiene como finalidad identificar NPO en los procesos del servicio de virtualización susceptibles de automatización, mediante el apoyo de técnicas de recolección de información como la entrevista semiestructurada y el modelo AS-IS de procesos [14]. A partir de estos instrumentos se revisa de forma preliminar la estructura de flujos de trabajo en los procesos del servicio que se encuentran en operación, esto dado que el servicio no cuenta con documentación oficial de su estructura operacional.

Las bases conceptuales tomadas en consideración para el diagnóstico de NPO presentes en el servicio de virtualización, se estructuran con base en los principios de gestión de calidad de la norma ISO 9001:2015 y las prácticas de identificación de requisitos de ITIL 4 [9],[10]. Esto permite respaldar el entregable bajo un marco orientador para la categorización de los procesos susceptibles de automatización y los riesgos asociados a la gestión manual de infraestructuras como servicio (IaaS, por sus siglas en inglés) [2],[7]. El enfoque metodológico tomado en la fase 1 alimenta directamente la fase siguiente, con un entregable de diagnóstico de necesidades, problemas y oportunidades, alineado con la mejora continua de los procesos de forma clara y estructurada.

El diagrama presentado en la Fig. 2 ilustra la metodología sistemática e iterativa empleada durante la Fase 1 para el diagnóstico de NPO en el servicio de virtualización GRID.

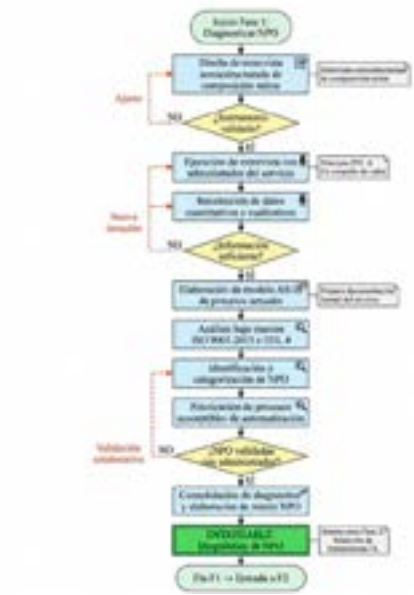


Fig. 2. Diagrama de la metodología para la fase 1. Fuente propia.

B. *Fase 2: Seleccionar los modelos y herramientas de inteligencia artificial adecuados*

Con la necesidad de establecer criterios objetivos de selección y validación, la Fase 2 planifica la identificación de herramientas de inteligencia artificial cuyos atributos correspondan con los aspectos requeridos por el servicio de virtualización, tales como eficiencia del desempeño, compatibilidad con integraciones, fiabilidad y mantenibilidad [11]. La selección de modelos y herramientas permite obtener el insumo principal para la Fase 3, al definir los componentes del diseño de una arquitectura basada en eventos que corresponda a las NPO identificadas en la Fase 1.

La fase 2 tiene como finalidad, identificar, analizar y seleccionar los modelos y herramientas de inteligencia artificial, mediante matrices comparativas afines a resolver los requerimientos funcionales identificados en el servicio de virtualización en los procesos susceptibles a automatizar.

La base conceptual que permite establecer los rubros que deben cumplir las herramientas identificadas, están apoyados bajo el estándar ISO/IEC 25010:2023 [11]. Esto proporciona un marco integral para dar cumplimiento a los requisitos y necesidades del usuario y del negocio.

Este enfoque metodológico atiende a la necesidad de establecer criterios objetivos para la validación de la utilidad de las herramientas de IA respecto a la definición actual de servicios de virtualización [7],[11]. El enfoque metodológico tomado en la fase 2 alimenta directamente la fase siguiente con el insumo de un informe evaluativo de herramientas mediante un análisis comparativo de idoneidad [15],[16]. Esto permite dar claridad para la construcción de la arquitectura de solución en la fase 3.

C. *Fase 3: Diseñar una solución basada en inteligencia artificial que satisfaga las NPO identificadas*

Con el propósito de establecer una arquitectura de solución que dé cumplimiento a las NPO identificadas, alinearla con paradigmas modernos como AIOps y los estándares actuales sobre la implementación de inteligencia artificial en los procesos de negocio, se plantea el diseño del instrumento entregable de una arquitectura de solución, el cual es el insumo directo de la fase 4, donde se dará lugar a la implementación de la solución propuesta con la arquitectura definida en esta fase.

La fase 3 tiene como finalidad, satisfacer las NPO identificadas en el diagnóstico al servicio de virtualización, mediante el diseño de una arquitectura basada en los modelos y herramientas de inteligencia artificial idóneos, según el informe evaluativo obtenido en la fase 2 y el alcance y delimitación establecidos en el trabajo de grado, de modo que permita reducir la gestión manual centralizada, explícitamente en el servicio de virtualización ofrecido por el caso de estudio.

La base conceptual tomada en consideración para el diseño de la arquitectura de solución propuesta se ajusta a las definiciones de la computación en la nube dadas por el NIST en su documento NIST SP 800-145 [5], a las definiciones para la inteligencia artificial, según ISO/IEC 22989:2022 [17] y al paradigma AIOps para las operaciones de infraestructura de TI [8].

Esta base conceptual respalda el entregable arquitectónico propuesto, alineado con un estilo basado en eventos (EDA) [13]. El entregable se integra en un modelo por capas [18], que permite subsanar las NPO identificadas en los procesos susceptibles de automatización mediante herramientas de IA que cumplan con estándares de calidad bajo el paradigma AIOps.

Este planteamiento arquitectónico, se convierte en el insumo principal de la fase 4, en donde se llevará a cabo la implementación en un prototipo funcional bajo un entorno controlado que emule el ecosistema del servicio de virtualización.

D. Fase 4: Implementar el prototipo funcional en un entorno a escala reducida que emule la arquitectura de virtualización

Para dar continuidad al resultado de la fase 3 del diseño de una arquitectura de solución con los modelos y herramientas de IA, que subsanen las NPO identificadas en el diagnóstico al servicio de virtualización, y que estén alineados a paradigmas como AIOps [8]. Esta fase plantea el instrumento entregable de un prototipo desarrollado bajo los marcos y estándares de calidad que aborda este enfoque metodológico, para ser el insumo principal de la fase 5, donde se dará lugar a la validación del prototipo en entornos controlados que emulen el servicio de virtualización.

La fase 4 tiene como finalidad implementar un prototipo funcional bajo entornos controlados de ejecución prolongada, que emulen el ecosistema de virtualización actual, sobre el cual se realizó el diseño arquitectónico de solución en la fase 3. El prototipo funcional busca dar cumplimiento a los estándares y marcos de referencia propuestos en el enfoque metodológico, que validen el cumplimiento de los requisitos funcionales identificados en las fases anteriores.

La base conceptual tomada en consideración para el desarrollo del prototipo funcional obedece a las normas de calidad del software ofrecidas por ISO/IEC 25010:2023 [11], al diseño arquitectónico definido en la fase 3 y al marco de trabajo bajo la filosofía DevOps [19]. Complementariamente, el concepto de prototipo se enmarca según Pressman & Maxim [20] como versión preliminar desarrollada para validar conceptos y requisitos antes de la implementación final.

Esta base conceptual permite mantener el prototipo bajo dimensiones alcanzables, trazables y mejorables derivado en un plan estructurado de desarrollo y calidad del artefacto.

Este planteamiento metodológico para desarrollar el prototipo de esta fase se convierte en el insumo principal de la fase 5, permitiendo tener los elementos necesarios para validar su funcionamiento bajo entornos controlados en un ecosistema de virtualización emulado de su entorno original, de modo que permita el estudio y análisis del comportamiento y el impacto en el servicio de virtualización.

E. Fase 5: Validar y analizar los resultados de la implementación del prototipo funcional

Esta fase corresponde a la validación del prototipo resultante de la arquitectura de solución propuesta en la fase 3, donde se espera, se pueda obtener un entregable con el análisis de la eficacia de la solución propuesta, en entornos controlados que emulen el servicio, esto con el propósito de tener una base tangible que respalde una futura implementación viable y directa sobre el servicio de virtualización.

La fase 5 tiene como finalidad validar el prototipo funcional desarrollado en la fase 4 en entornos controlados, que emulen la arquitectura que compone actualmente al servicio de virtualización, con el propósito de establecer indicadores, métricas y casos de prueba, que permitan dar paso al análisis del modelo de solución propuesto para el caso de estudio. Evaluar el prototipo en un entorno similar al del caso estudio, estimula la mejora continua, al permitir la retroalimentación necesaria de los indicadores técnicos, como de negocio, definidos para las fases anteriores.

La base conceptual tomada en consideración para la validación del prototipo obedece principalmente al estándar de calidad ISO 9001:2015 bajo el ciclo de mejora continua PHVA aplicado en el enfoque metodológico del presente trabajo, y al estándar ISO/IEC 25010:2023 para la definición de indicadores y métricas de calidad del producto [9],[11]. Del mismo modo, ITIL 4 proporciona trazabilidad y alcance a la solución en términos de calidad y valor entregado, orientando los ajustes necesarios a partir de los resultados de la validación [10]. Este enfoque metodológico converge en un informe evaluativo con estándares y fundamentado en marcos de referencia que permiten dar claridad sobre el desempeño de la solución propuesta sobre el servicio de virtualización en la automatización de los flujos de trabajo, bajo el paradigma AIOps [8].

Actualmente, se encuentra en desarrollo la F1, teniendo como resultados preliminares, el instrumento de entrevista semiestructurada de composición mixta, al abarcar la recolección de datos cuantitativos, como cualitativos. Esta actividad está pensada bajo el principio de ITIL 4 en la co-creación de valor en el servicio, que permitirá conocer el valor percibido por el administrador y contribuirá a la construcción del diagnóstico de NPO en la virtualización del caso de estudio.

III. Resultados Esperados

El proyecto se encuentra actualmente en ejecución, con avances parciales correspondientes a la primera actividad de la Fase 1 del plan de trabajo. Los resultados presentados reflejan lo construido hasta la fecha; las fases F2 a F5 constituyen trabajo proyectado conforme al cronograma definido para el segundo semestre de 2026. La Tabla I presenta los entregables definidos para cada fase del proyecto.

TABLA I
ENTREGABLES POR FASE DEL PROYECTO

Fase	Entregable	Estado
F1	Documento con informe diagnóstico de las necesidades, problemas y oportunidades en los procesos susceptibles de automatización del servicio de virtualización del grupo de investigación GRID.	En ejecución
F2	Informe evaluativo con la selección de los modelos y herramientas de IA mediante un análisis comparativo de idoneidad para la automatización del servicio de virtualización del grupo de investigación.	Pendiente
F3	Diseño de arquitectura de la solución basada en los modelos y herramientas de IA que satisfaga a las NPO identificadas en el diagnóstico al servicio de virtualización del grupo de investigación GRID.	Pendiente
F4	Prototipo funcional del diseño de la solución basada en Inteligencia Artificial para el servicio de virtualización del grupo de investigación GRID.	Pendiente
F5	Informe y Análisis del impacto obtenido en la implementación del prototipo funcional para el servicio de virtualización del grupo de investigación GRID.	Pendiente

A. Fase 1: Diagnosticar Necesidades, Problemas y Oportunidades (NPO) dentro del servicio de virtualización

El principal avance obtenido corresponde al diseño del instrumento de recolección de información, una entrevista semiestructurada con encuesta embebida de enfoque mixto cualitativo y cuantitativo, orientada a levantar el modelo AS-IS del servicio de virtualización del GRID. El instrumento integra dos ejes en una sola sesión de 60 a 90 minutos: un eje diagnóstico, que cubre los procesos operativos actuales, roles, infraestructura y continuidad del servicio; y un eje de valor percibido, que captura la percepción del administrador sobre las herramientas actuales y sus expectativas frente a una solución basada en IA. Entre las métricas operacionales que el instrumento busca recopilar se encuentran tiempos de aprovisionamiento de máquinas virtuales, frecuencia de incidentes, tiempos de detección y atención de anomalías, utilización de recursos por host, y carga operativa manual estimada por el administrador. La integración de enfoques de modelado de procesos, aceptación tecnológica, clasificación de valor funcional y satisfacción del usuario en un único instrumento diseñado para construir una base diagnóstica trazable para la priorización cuantitativa y cualitativa de los procesos susceptibles de automatización.

La Tabla II presenta las actividades y entregables parciales definidos para la Fase 1.

TABLA II
ACTIVIDADES Y ENTREGABLES PARCIALES DE LA FASE 1

Actividad	Acción	Entregable parcial	Estado
1	Recopilar información del servicio	Informe consolidado de los artefactos AS-IS de los flujos de trabajo del servicio de virtualización.	En ejecución
2	Delimitar y caracterizar los procesos actuales del servicio de virtualización del GRID	Validar informe de delimitación con el modelo SIPOC de los procesos del servicio de virtualización.	Pendiente
3	Identificar NPO en el servicio de virtualización del GRID	Lista priorizada de NPO del servicio de virtualización del GRID.	Pendiente
4	Consolidar diagnóstico de NPO en el servicio de virtualización del GRID.	Informe diagnóstico NPO del servicio de virtualización del GRID	Pendiente

La Tabla III presenta las tareas y entregables parciales para la primera actividad, reflejando la trazabilidad metodológica entre cada acción y su producto verificable. Cada entregable parcial está sujeto a un ciclo de validación con el responsable del GRID antes de constituirse como insumo de la tarea siguiente, garantizando coherencia entre la información recolectada y su representación en los artefactos generados.

TABLA III
TAREAS Y ENTREGABLES PARCIALES DE LA ACTIVIDAD 1

Tarea	Acción	Entregable parcial	Estado
1	Diseñar y construir entrevista semiestructurada con base en estándares de calidad.	Instrumento de entrevista semiestructurada	Completado
2	Aplicar entrevista presencial al responsable del GRID.	Informe consolidado en ejes temáticos de los procesos hallados en el flujo de trabajo del servicio de virtualización	Pendiente
3	Realizar el modelo AS-IS, de acuerdo con el informe consolidado de los procesos hallados en el flujo de trabajo del servicio de virtualización del GRID	Informe consolidado de los artefactos AS-IS de los flujos de trabajo del servicio de virtualización.	Pendiente

La aplicación, validación y análisis de los hallazgos del instrumento de entrevista semiestructurada constituyen el trabajo inmediato en curso dentro de la Fase 1, cuyo resultado esperado producirá el informe diagnóstico de NPO del servicio de virtualización del GRID como insumo directo para las fases siguientes.

B. *Fase 2: Seleccionar los modelos y herramientas de inteligencia artificial adecuados*

En la fase 2, se espera obtener un informe evaluativo con la selección de modelos y herramientas de IA, construido a partir de un mapeo sistemático de literatura y matrices comparativas de idoneidad, cuyos criterios de evaluación estarán alineados con los requerimientos funcionales identificados en el diagnóstico.

C. *Fase 3: Diseñar una solución basada en inteligencia artificial que satisfaga las NPO identificadas*

En la Fase 3, se proyecta el diseño de una arquitectura por capas bajo el paradigma AIOps y EDA, que integre los modelos y herramientas seleccionados y cubra los procesos susceptibles de automatización identificados en el servicio de virtualización del GRID.

D. *Fase 4: Implementar el prototipo funcional en un entorno a escala reducida que emule la arquitectura de virtualización*

La Fase 4 contempla la implementación de un prototipo funcional en un entorno controlado que emula la infraestructura del servicio de virtualización del GRID, permitiendo evaluar la factibilidad técnica de los flujos de automatización definidos en el diseño.

E. *Fase 5: Validar y analizar los resultados de la implementación del prototipo funcional*

Finalmente, la Fase 5 tiene como resultado esperado un informe de validación que permita medir la tasa de detección de anomalías, los tiempos de respuesta ante eventos y la reducción de carga operativa sobre el administrador, determinando la viabilidad del sistema agéntico propuesto para el servicio de virtualización del GRID.

IV. Discusión

El enfoque de solución propuesto sugiere que, al implementar una combinación conceptual de marcos de referencia para la mejora de servicio y estándares de calidad para procesos en normas internacionales, es posible incentivar la integración de tecnologías y paradigmas emergentes como la inteligencia artificial para operaciones de TI AIOps [8]. De modo que, estos marcos y estándares apoyan de manera estructurada y trazable los servicios de virtualización de infraestructuras académicas como servicio, como el caso de estudio del grupo de investigación GRID.

En comparación con los métodos existentes, propuestos por Jiang [2], Arulappan et al [21], Eramo, et al [19]. El presente trabajo plantea un enfoque formal y fundamentado que busca alinear la definición de la solución con el valor otorgado y percibido por el cliente en los servicios académicos de virtualización, más allá de una solución enfocada en la mejora de aspectos meramente técnicos como la detección de anomalías o de nuevas implementaciones tecnológicas sin un plan de acción verificable y mejorable. De este modo, se pretende que los servicios de virtualización ofrecidos por universidades se orienten a estándares de calidad del servicio en la mejora continua de procesos [9].

Una ventaja importante de la metodología es tener explícitamente definido el desarrollo de la cadena de valor del servicio [10], mediante la secuencia de fases de principio a fin, que posibiliten la implementación tangible de un prototipo funcional para su posterior evaluación y análisis, lo que permite iteraciones para la mejora continua de procesos [11].

Sin embargo, persisten algunas limitaciones, ya que el servicio de virtualización para el caso de estudio no cuenta con documentación preliminar de forma oficial, previa para facilitar la agilidad en el desarrollo de las primeras fases.

Aun así, el enfoque metodológico que adopta este trabajo permite la creación de instrumentos válidos para el desarrollo de la documentación del servicio, de modo que la propuesta es útil para generar instrumentos de valor que sustente la creación de documentación oficial, técnica y de calidad de procesos para los servicios computacionales de infraestructuras académicas.

El trabajo futuro se centrará en la identificación de los procesos dentro del servicio de virtualización, aquellos que requieran automatización mediante la selección de herramientas idóneas de IA para elaborar un diseño que aporte a la respuesta del objetivo principal de este trabajo, el cual es, proveer de una solución basada en inteligencia artificial para que mediante un prototipo funcional se pueda automatizar el soporte a la gestión de máquinas virtuales para el caso de estudio GRID de infraestructura académica en la Universidad del Quindío.

V. Conclusiones

Se formuló el planteamiento de una solución basada en inteligencia artificial, bajo el paradigma AIOps y una arquitectura basada en eventos, para automatizar los flujos de trabajo en el servicio de gestión de máquinas virtuales para el caso de estudio seleccionado del grupo de investigación GRID.

Como trabajo futuro, la validación del prototipo funcional en un entorno controlado permitirá estimar la tasa de detección de anomalías, los tiempos de respuesta ante eventos y la reducción de la carga operativa sobre el administrador.

Esta propuesta busca reducir la dependencia de un único administrador sobre los flujos críticos del ciclo de vida de las máquinas virtuales, mitigando el punto único de fallo en el servicio, promoviendo una gestión proactiva de incidentes y habilitando una escalabilidad operativa acorde con las necesidades de una infraestructura virtualizada académica.

Este enfoque de solución propone una aproximación a la pregunta de cómo integrar el uso de inteligencia artificial para infraestructuras académicas que no cuentan con la posibilidad de una migración completa a la nube, que, por otro lado, deseen aprovechar sus recursos computacionales para automatizar áreas críticas bajo paradigmas modernos de infraestructura como servicio, como lo es el caso de AIOps.

En resumen, la implementación de una solución para la automatización de flujos de trabajo en el servicio de virtualización bajo el paradigma AIOps representa una alternativa técnicamente viable para infraestructuras académicas *on-premise*, con el potencial de promover un impacto significativo mediante la adopción de inteligencia artificial como tecnología emergente.

REFERENCIAS

[1] McKinsey & Company, "AI power: Expanding data center capacity to meet growing demand.",2024. [En línea]. Disponible en: https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/ai-power-expanding-data-center-capacity-to-meet-growing-demand

[2] G. Jiang, "Artificial intelligence-based adaptive anomaly detection technology for IaaS cloud virtual machines," Journal of Engineering and Applied Science, vol. 71, p. 102, 2024, doi: 10.1186/s44147-024-00439-1

[3] Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), Colombia, un país digital. Vol. 3, Bogotá, Colombia, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.andi.com.co/Uploads/Colombia%20un%20Pa%C3%ADs%20Digital%20vol%203%20ANDI%20CIDS%202022.pdf

[4] RedCLARA, "Colombia - RENATA" , 2026. [En línea]. Disponible en: https://redclara.net/es/somos/miembros/colombia-renata

[5] P. Mell and T. Grance, The NIST Definition of Cloud Computing, NIST Special Publication 800-145, 2011, doi: 10.6028/NIST.SP.800-145

[6] Microsoft Azure, "¿Qué es IaaS?," Azure Cloud Computing Dictionary. [En línea]. Disponible en: https://azure.microsoft.com/es-es/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-iaas/

[7] M. Shetty et al., "Building AI agents for autonomous clouds: Challenges and design principles," in Proc. 2024 ACM Symp. Cloud Comput. (SoCC '24), 2024, pp. 99–110, doi: 10.1145/3698038.3698525

[8] W. Cappelli, C. Fletcher, and P. Prasad, Market Guide for AIOps Platforms, Gartner, Stamford, CT, EE. UU., ago. 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.gartner.com/reviews/market/aiops-platforms

[9] International Organization for Standardization, *Quality management systems — Requirements*, ISO Standard 9001:2015, Sept. 2015

[10] AXELOS, ITIL Foundation: ITIL 4 Edition. London, U.K.: TSO, 2019

[11] ISO and IEC, *ISO/IEC 25010:2023 – Systems and Software Engineering – Systems and Software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Product Quality Model*, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.iso.org/standard/35733.html

[12] IEEE, IEEE Standard for Framework and Process for AI Risk Management, IEEE Std 2841-2022, 2022. [En línea]. Disponible en: https://standards.ieee.org/ieee/2841/10729/

[13] G. Hohpe and B. Woolf, Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Professional, 2003

[14] M. Dumas, M. La Rosa, J. Mendling, and H. A. Reijers, *Fundamentals of Business Process Management*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 2018

[15] S. Russell and P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2021

[16] Y. K. Dwivedi et al., "Evolution of artificial intelligence research in Technological Forecasting and Social Change: A bibliometric analysis and future research directions," Technological Forecasting and Social Change, vol. 194, Art. no. 122713, 2023, doi: 10.1016/j.techfore.2023.122713

[17] ISO and IEC, ISO/IEC 22989:2022 – Information Technology – Artificial Intelligence – Concepts and Terminology, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.iso.org/standard/74296.html

[18] M. Richards, Software Architecture Patterns. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2015

[19] R. Eramo, B. Said, M. Oriol, H. Bruneliere, and S. Morales, "An architecture for model-based and intelligent automation in DevOps," Journal of Systems and Software, vol. 217, Art. no. 112180, 2024, doi: 10.1016/j.jss.2024.112180

[20] R. S. Pressman and B. R. Maxim, Software Engineering: A Practitioner's Approach, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2020

[21] A. Arulappan, A. Mahanti, K. Passi, T. Srinivasan, R. Naha, and G. Raja, "DQN approach for adaptive self-healing of VNFs in cloud-native network," IEEE Access, vol. 12, 2024, Art. no. 3365635, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3365635

Desarrollo de aplicacion movil Ruta Violeta para la activacion de protocolos de atencion en caso de Violencia de Genero o Discriminacion

1st Ana María Abril Echeverry
Falcutad de Ingenieria
Universidad Cooperativa de Colombia
Ibagué, Colombia
ana.abrile@campusucc.edu.co

2nd Mixi Yulieth Polo Fonseca
Falcutad de Ingenieria
Universidad Cooperativa de Colombia
Ibagué, Colombia
mixi.polofon@campusucc.edu.co

3rd Oscar Camilo Valderrama Riveros
Falcutad de Ingenieria
Universidad Cooperativa de Colombia
Ibagué, Colombia
oscar.valderramar@campusucc.edu.co

4th Paola Andrea Cardona Buendia
Falcutad de Derecho
Universidad Cooperativa de Colombia
Ibagué, Colombia
pacb81@hotmail.com

Abstract*— En diferentes contextos sociales e institucionales, como instituciones educativas, laborales y espacios comunitarios y sociales, las personas pueden enfrentar situaciones de vulnerabilidad, violencia de genero, discriminacion, en estos escenarios, el desconocimiento de los canales de ayuda orientados a brindar apoyo psicologico, orientacion juridica, acompañamiento o rutas de atencion integral dificulta que las personas accedan oportunamente al apoyo en situaciones sensibles. Las situaciones se mantienen en silencio por miedo, verguenza o falta de informacion sobre a quien acudir y las rutas de atencion disponibles, aquí se ve la necesidad de implementar un medio accesible, cercano y discreto que faciliten la solicitud de ayuda de manera segura y confidencial, ¿Como puede la implementación de un medio digital mejorar el acceso a los canales de ayuda institucional para la comunidad educativa que enfrenta situaciones de vulnerabilidad, violencia de genero o discriminacion?

El presente proyecto tiene como proposito desarrollar una aplicacion movil orientada a facilitar la activacion de la Ruta de Atencion Integral para Victimas de Violencias Basadas en Genero y Discriminacion (VBG-D) de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Ibague. La aplicacion esta pensada para aquellas personas que no estan cómodas acudiendo de manera presencial, brindando una alternativa digital y segura.

Para el desarrollo, se empleo la metodologia agil Scrum, la cual permite trabajar de forma colaborativa y flexible mediante iteracion llamadas Sprint, donde en cada sprint se dara el cumplimiento de los objetivos especificos para garantizar avances continuos, revisiones constantes y posibilidad de realizar mejoras segun las necesidades detectadas.

A traves del boton de alerta, el usuario enviara la solicitud directamente al area de Comite del primer respondiente, que es la encargada de brindar acompanamiento psicologico, asesoria juridica y orientacion en caso de que lo requiera. Aunque la atencion no es inmediata se garantiza una respuesta dentro las 24 horas siguientes al reporte.

El sistema esta disenado exclusivamente para usuarios con correo institucional de la Universidad Cooperativa de Colombia (UCC) con esta herramienta, la universidad busca fortalecer mecanismos de atencion, promover cultura de respeto y equidad, ofrecer un medio de comunicacion seguro y discreto para la comunidad universitaria al solicitar apoyo.

El Desarrollo del proyecto permitio disenar e implementar una solucion tecnologica innovadora que responde a la necesidad de crear canales de ayuda confidenciales, mediante el uso de la metodologia scrum se logro realizar un trabajo en etapas efectivas, el proyecto contribuye significativamente a la promocion del bienestar y prevencion de situaciones de vulnerabilidad dentro del entorno universitario.

***Keywords*—** *Aplicacion movil, boton de ayuda, discriminacion, universidad, violencia de genero.*

I. Introducción

La violencia de género y las distintas formas de discriminación son consolidadas como problemáticas de alta relevancia en Colombia, afectando integridad, dignidad y bienestar de todos, especialmente de mujeres y poblaciones vulnerables. Según la defensoría del pueblo entre el 1 de enero y 31 de mayo del 2025 se registraron 352 feminicidios y 217 tentativas de homicidio, comparándola con el año 2024 que tuvo 872 casos de feminicidios y 684 casos de tentativa de homicidio, en apenas 5 meses ya se alcanzó el 40% de los feminicidios y 30% de las tentativas de homicidio del 2024, lo que evidencia que hay una tendencia preocupante en la que persiste la violencia. [1]

Según las cifras del Observatorio de Discriminación del Ministerio del Interior registran más de 4.000 denuncias anuales por actos de discriminación, asociados a género, etnia, discapacidad y situación socioeconómica [2] y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) evidenciando a través de encuestas que cerca del 20% de la población colombiana ha manifestado haber sido víctima de algún tipo de discriminación [3], lo que no solo nos muestra la magnitud del problema y su normalización de la problemática, sino también la necesidad de fortalecer todos los mecanismos de atención, prevención y acompañamiento a las víctimas.

La violencia de género en las instituciones de educación superior es una problemática presente que en la mayoría de casos permanece silenciada por varios factores, ya sea, miedo, desconocimiento o falta de los canales de atención de apoyo, aunque haya esfuerzos por promover la igualdad, el acoso, discriminación y las otras formas de violencia de genero sigue afectando a los estudiantes y personal universitario.

El avance de la tecnología será una ayuda a este desafío, surge como una herramienta importante para dejar el silencio y miedo atrás y buscar la oportunidad de poner en práctica las soluciones para facilitar el acceso a la ruta de ayuda de forma discreta, rápida y segura, la aplicación móvil tendrá un botón que al activarse iniciará la **Ruta de Atención Integral para Víctimas de Violencias basadas en Género y Discriminación (VBG-D) [4]** con la que cuenta la universidad Cooperativa de Colombia . La aplicación de manera rápida y discreta será gestionada por el área de Bienestar Universitaria, Este sistema de respuesta rápida y discreta será gestionado por el área de Bienestar Universitario, que busca garantizar que las victimas reciban el apoyo necesario de manera segura y eficiente, eliminando barreras que el miedo y el desconocimiento imponen.

La urgencia de crear esta herramienta no solo es teóricamente, también responde a la realidad que se viven en los ámbitos académicos, la **Universidad Cooperativa de Colombia (UCC)** sede **Ibagué**, con la creación de su **Consultorio Jurídico Violeta** en el año 2023 [5] han validado la necesidad de estas rutas de atención que complementen y faciliten el acceso a estos. La aplicación busca dejar atrás la falta de conocimiento sobre las rutas de atención, ofreciendo una solución tecnológica para crear un entorno más seguro y justo para toda la comunidad universitaria.

II. Trabajos Relacionados

De acuerdo con cifras del Ministerio del Interior y de Justicia, desde el año 2013 hasta el mes de julio de 2020, se han reportado 686 casos de trata de personas en el país, siendo las mujeres, los migrantes y los niños los más afectados. [6]

LiberApp fue diseñada para las víctimas de trata de personas, la aplicación cuenta con un botón de pánico que envía de manera inmediata los datos básicos del denunciante y ubicación en tiempo real al centro Operativo Anti trata de Personas-COAT. Esta aplicación fue desarrollada por Migración Colombia para sistemas operativos Android y IOS. [7]

SOSFem – Mexico es un botón de pánico diseñado para mujeres, cuenta con aplicación móvil y sistema web (plataforma institucional), su función es que en el momento que se activa el botón de pánico se envía la ubicación a los contactos de emergencia registrados, ideal para cuando camina sola, viaja en transporte público o si se siente en peligro, esta desarrollado en sistema operativo Android y IOS. [8]

Panic Button – Francia es una aplicación que proporciona a los usuarios seguridad personal en entornos desconocidos (mediante GPS), ya sea por seguridad personal, emergencias médicas, seguridad de seres queridos, seguridad de los transportistas, seguridad de los profesionales, esta aplicación esta desarrollada en Android y IOS. [9]

SOSMex es una aplicación qué está diseñada para enviar alertas inmediatas en situaciones de emergencia, ya sea a contactos de emergencia registrados o las Autoridades, a diferencia de muchas aplicaciones que son gratis, esta cuenta con una suscripción mensual, y esta desarrollada para Android y IOS. [10]

AlarmaSOS está diseñada para ayudar a sus usuarios cuando su seguridad personal está en peligro, al activar el SOS de emergencia suena una alarma fuerte, llama y envía un mensaje (SMS) con un enlace de Google Maps de su ubicación actual a sus contactos registrados durante una emergencia y esta desarrollado en sistema operativo Android. [11]

Codigo Violeta es una aplicación móvil diseñada para prevenir, monitorear y acompañar en casos de violencia de género, especialmente en mujeres en situaciones de riesgo y esta desarrollada en sistema operativo Android y IOS. [12]

III. Desarrollo

El desarrollo se realizó bajo el enfoque iterativo basado en la metodología ágil SCRUM mediante los sprints, permitiendo hacer ajustes conforme a las necesidades que se identificaron durante el proceso, y se describen bajo las siguientes actividades principales. [13]

Diagnóstico y recolección de información, se realizó el análisis del problema, enfocado en como la implementación de un medio digital puede mejorar los accesos a la los canales de ayuda institucional para la comunidad educativa que enfrentan violencias basadas en género o discriminación, se llevó a cabo la recopilación de los requisitos funcionales y no funcionales, así como el estudio del protocolo de atención de violencias basadas en género y discriminación, con el fin de garantizar la alienación de la app con el protocolo existente.

Durante este sprint, se desarrollaron los prototipos de interfaz usuario (UI/UX) usando las herramientas de CANVA y FIGMA, los mockups definieron las funcionalidades básicas y primarias de la app, incluyendo el módulo de registro de usuarios, consentimiento informado, botón de pánico, recuperación de contraseña y la interfaz administrativa para gestionar los reportes e informes. Esta fase nos permitió

identificar y validar la experiencia del usuario antes del desarrollo. [14] [15]



Fig 1. Bocetos en CANVA del formulario de registo y validación del registro exitoso.



Fig 2. Bocetos en CANVA del botón de pánico.



Fig 3. Mockup en FIGMA

Posteriormente, comenzamos con la construcción de la aplicación usando tecnologías como Angular con Ionic para poder desarrollarla multiplataforma, .NET para el backend en conjunto con servicios mediante endpoints y el uso de PostgreSQL como sistema de gestión de bases de datos, se configuraron funcionalidades claves, como la autentificación del correo institucional, accesos restringidos y activación del botón de ayuda. [16] [17] [18] [19]



Fig 4. Interfaz de Registro usuario.

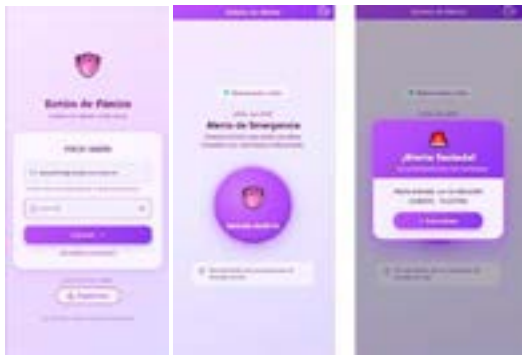


Fig 5. Interfaz de Inicio de sesión y botón de pánico.

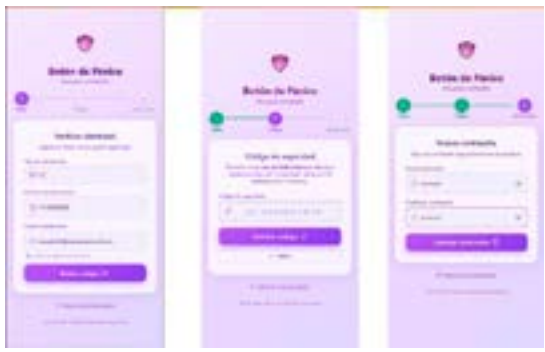


Fig 6. Interfaz de Recuperación contraseña.

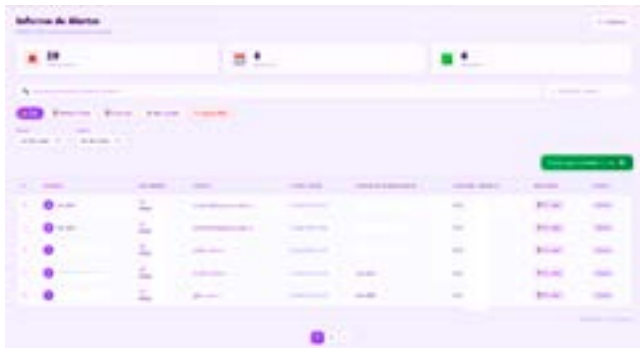


Fig 7. Interfaz de informes y filtros para el usuario administrativo.

Se ejecutaron las pruebas funcionales y de usabilidad para validar el correcto funcionamiento de la app, las pruebas verificaron el envío de correos electroncitos, navegación de las interfaces y respuesta del sistema en diferentes escenarios, a partir de esto, se realización ajustes y mejoras.

Finalmente, se realizó la presentación del prototipo funcional ante la comunidad universitaria, demostrando su aporte de como la herramienta digital facilita el uso de la ruta institucional existente. Actualmente, se está desarrollando la documentación del sistema, incluyendo manuales de usuario y técnicos dirigidos a usuarios y futuros desarrolladores.

IV. Resultados

El desarrollo permitió implementar la aplicación como el medio digital funcional orientado a facilitar y dar a conocer el acceso a canales instituciones de atención en casos de violencias basadas en género o discriminación dentro de la comunidad universitaria.

Como resultado principal, se diseñó e integró el sistema de registro y autenticación que valida cada usuario mediante un dominio institucional como lo es @campusucc.edu.co o @ucc.edu.co, garantizando la pertenencia a la comunidad académica. Al igual, hay un consentimiento informado digital que asegura que los usuarios conozcan el uso y el tratamiento de su información antes de acceder a la app, al igual, la interfaz para recuperación de contraseña que valida al usuario, envía un correo de verificación y se permite modificar la contraseña.

También, se desarrolló exitosamente el botón de pánico, el cual va a permitir enviar a la comunidad universitaria una solución de atención de manera rápida y discreta, facilitando la activación de la ruta institucional existente, esta función representa un aporte enorme en cuanto accesibilidad y oportunidad de atención.

Se construyó la interfaz administrativa que permite la visualización y gestión de reportes, aportando al seguimiento de casos y toma de decisiones por parte del área encargada, ya sea bienestar universitario, comité de primer respondiente o gestión humana.

Los prototipos que se diseñaron al ser válidos e implementados, lograron una interfaz intuitiva y accesible, con las pruebas realizadas se evidencio el correcto funcionamiento de los módulos principales incluyendo registro, recuperación de contraseña, envío de notificaciones por el correo electrónico institucional y la navegación en general del sistema.

Se realizó la socialización del aplicativo móvil a la comunidad universitaria mediante espacios de presentación y capacitación permitiendo obtener una retroalimentación positiva en relación a la herramienta y ruta institucional de ayuda establecida, promover su uso y fortaleces la ruta, evidencia una percepción positiva frente a la utilidad de la herramienta, y actualmente se avanza en la elaboración de manuales de usuario y documentación técnica, con la finalidad de facilitar su futura implementación.

V. Conclusiones

El desarrollo de la aplicación demostró que el uso de las herramientas digitales en los espacios de educación superior facilita el acceso a los canales de ayuda institucionales existentes frente a casos de violencias basadas en género o discriminación, mejorando la comunicación entre la comunidad universitaria.

Por medio de la validación mediante los correos con dominio institucional y el consentimiento informado garantizarán la seguridad de la información y el acceso único a la comunidad universitaria, ofreciendo mayor confiabilidad en el uso de la aplicación.

El botón de pánico es una funcionalidad clave en el espacio académico, ya que, permite una activación rápida, discreta y segura, que fortalece el uso de la ruta de atención y fortalece la capacidad de respuesta por medio de la entidad correspondiente.

El panel administrativo con acceso restringido contribuye a dar un seguimiento a los casos más discreto y personalizado para poder hacer una buena toma de decisiones y mejorar la gestión por el área encargada de algún caso de violencia basadas en género o discriminación.

La socialización de la aplicación evidenció la buena aceptación por parte de la comunidad universitaria, dando a conocerse más a la ruta de atención existente, fortaleciendo y potenciándola, promoviendo una mayor sensibilización frente a estas problemáticas.

Agradecimientos

Agradecemos al acompañamiento y orientación brindada por parte del doctor Oscar Camilo Valderrama Riveros y la doctora Paola Andrea Cardona Buendia, quienes siempre estuvieron atentos al desarrollo de la aplicación, el apoyo y conocimientos fortalecieron el desarrollo de la app, permitiendo tener una mejor compresión de las diferentes formas de violencia e importancia abordándolas desde un enfoque humano y social.

De igual manera, agradecemos a Bienestar Universitario por la orientación durante el desarrollo del proyecto, fueron fundamentales para comprender las rutas de atención

institucional y fortalecer la construcción de la aplicación para el beneficio de la comunidad universitaria.

References

[1] Defensoría del Pueblo, "Panorama de las violencias de género en Colombia: enero a mayo de 2025," Defensoría del Pueblo, Bogotá, Colombia, 25 junio 2025. [En línea]. Disponible en: Defensoría del Pueblo. [Accedido: 8-may-2026]

[2] Ministerio del Interior, "Estadísticas DACN," Ministerio del Interior de Colombia. [En línea]. Disponible en: Ministerio del Interior – Estadísticas DACN. [Accedido: 8-may-2026].

[3] Corporación Excelencia en la Justicia, "Corporación Excelencia en la Justicia revela cifras preocupantes del DANE en materia de discriminación," CEJ, Bogotá, Colombia, 18 jul. 2020. [En línea]. Disponible en: https://cej.org.co/destacados-home-page/corporacion-excelencia-en-la-justicia-revela-cifras-preocupantes-del-dane-en-materia-de-discriminacion/. [Accedido: 8-may-2026].

[4] Universidad Cooperativa de Colombia, *Protocolo y ruta para la prevención, detección y atención de violencias basadas en género y discriminación*, Cali, Colombia, 2024. [En línea]. Disponible en: https://ucc.edu.co/campus-cali/Documents/PROTOCOLO%20Violencias%20basadas%20en%20Genero%201.pdf. [Accedido: 8-may-2026].

[5] Universidad Cooperativa de Colombia, "Primer Consultorio Jurídico Violeta de la UCC en campus Ibagué," UCC, Ibagué, Colombia, 8 mar. 2023. [En línea]. Disponible en: https://ucc.edu.co/actualidad-ucc/noticias/Paginas/primer-consultorio-juridico-violeta-de-la-ucc-en-campus-ibague.aspx. [Accedido: 8-may-2026].

[6] Organización Internacional para las Migraciones (OIM), "6 datos relevantes sobre la trata de personas en Colombia," OIM Colombia, Bogotá, Colombia, 30 jul. 2024. [En línea]. Disponible en: https://colombia.iom.int/es/news/6-datos-relevantes-sobre-la-trata-de-personas-en-colombia. [Accedido: 8-may-2026].

[7] Organización Internacional para las Migraciones (OIM), "Con LibertApp cualquier persona puede denunciar la trata de personas en Colombia," OIM Colombia, Bogotá, Colombia, 30 jul. 2020. [En línea]. Disponible en: https://colombia.iom.int/es/news/con-libertapp-cualquier-persona-puede-denunciar-la-trata-de-personas-en-colombia. [Accedido: 8-may-2026].

[8] SOS Fem, "SOS Fem – Aplicación de apoyo y seguridad para mujeres," [En línea]. Disponible en: https://sosfem.com/. [Accedido: 8-may-2026].

[9] Red Panic Button, "Red Panic Button – Emergency alert system and safety app," [En línea]. Disponible en: https://www.redpanicbutton.com/. [Accedido: 8-may-2026].

[10] SOS-MEX, "SOS-MEX App: Seguridad inmediata y control de emergencia," [En línea]. Disponible en: https://www.sos-mex.com/. [Accedido: 8-may-2026].

[11] Solvaday, "Panic Alarm – aplicación de botón de pánico y alarma de emergencia," Google Play Store. [En línea]. Disponible en: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.solvaday.panic_alarm&hl=es_419. [Accedido: 8-may-2026].

[12] SoftGuard Technologies LLC, "Código Violeta – Tecnología contra la violencia de género," [En línea]. Disponible en: https://codigovioleta.com/. [Accedido: 8-may-2026].

[13] Scrum.org, "What is Scrum?," Scrum.org. [En línea]. Disponible en: https://www.scrum.org/resources/what-scrum-module. [Accedido: 8-may-2026].

[14] Canva, "Canva – Herramienta de diseño gráfico y edición en línea," [En línea]. Disponible en: https://www.canva.com/. [Accedido: 8-may-2026].

[15] Figma, "Mockups botón," [En línea]. Disponible en: https://www.figma.com/design/lvgPOcZLRBjUSjAA5Ecyy9/Mockups-boton?node-id=0-1&p=f&t=nHGyNbuh3IESbvc1-0. [Accedido: 8-may-2026].

[16] Angular, "Angular – Plataforma para el desarrollo de aplicaciones web," [En línea]. Disponible en: https://angular.dev/. [Accedido: 8-may-2026].

[17] Ionic Framework, "Ionic Framework – Plataforma para el desarrollo de aplicaciones móviles multiplataforma," [En línea]. Disponible en: https://ionicframework.com/. [Accedido: 8-may-2026].

[18] .NET, ".NET – Plataforma para crear aplicaciones modernas y servicios en la nube," [En línea]. Disponible en: https://dotnet.microsoft.com/es-es/. [Accedido: 8-may-2026].

[19] PostgreSQL, "PostgreSQL – The world's most advanced open source relational database," [En línea]. Disponible en: https://www.postgresql.org/. [Accedido: 8-may-2026].

Ecodiseño como estrategia de formación en ingeniería para el desarrollo de soluciones sostenibles en contextos urbanos

1st Jeronimo Rincon Peinado
Dept. De Ingenieria Industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
jrinconpeinado63@correo.unicordoba.edu.co

2nd Angel David Camargo Salcedo
Dept. De Ingenieria Industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
acamargosalcedo50@correo.unicordoba.edu.co

3rd Celinne Giovanna Luna Noriega
Dept. De Ingenieria Industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
clunanoriega90@correo.unicordoba.edu.co.

4th Yenifer Tejada Flores
Dept. De Ingenieria Industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
ytejadaflorez83@correo.unicordoba.edu.co.

5th Gabriela Andrea Muñoz Montalvo
Dept. De Ingenieria Industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
gmunozmontalvo70@correo.unicordoba.edu.co

6th Heidi Maria Echeverri Florez
Dept. De Ingenieria Industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
hecheverri@correo.unicordoba.edu.co

***Resumen*— Las dinámicas contemporáneas de desarrollo urbano, junto con el cambio climático y la creciente pérdida de confort ambiental en ciudades de clima cálido como Montería, Colombia, han puesto de manifiesto la necesidad de replantear el diseño de espacios y mobiliario urbano mediante enfoques sostenibles integrados con la naturaleza. En este contexto, el presente estudio desarrolló un prototipo conceptual de mobiliario urbano sostenible mediante la aplicación de metodologías de ecodiseño y biomímesis, con el objetivo de mejorar el confort climático y la experiencia del usuario.**

Se empleó una metodología estructurada de ecodiseño que integró el análisis del contexto ambiental, la evaluación del ciclo de vida, el uso de la matriz MET (Materiales, Energía y Toxicidad) y criterios de diseño centrados en el usuario. Asimismo, se incorporaron principios de biomímesis basados en la observación de estrategias naturales, como el comportamiento heliotrópico del girasol y los mecanismos de regulación térmica presentes en los organismos vivos, con el fin de optimizar la adaptación del producto a las condiciones climáticas locales.

Como resultado, se desarrolló el prototipo SOLARIS, una banca urbana bioinspirada que integra sombreado adaptativo, ventilación pasiva y generación de energía mediante paneles solares. El proceso permitió identificar soluciones de diseño que mejoran el confort térmico, optimizan el uso de los recursos y reducen el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida del producto. Los hallazgos muestran que la integración del ecodiseño y la biomímesis constituye una estrategia eficaz para el desarrollo de soluciones urbanas sostenibles, al tiempo que fortalece la formación en ingeniería mediante la aplicación de enfoques sistémicos y orientados a la sostenibilidad.

Este estudio demuestra cómo la incorporación de metodologías de diseño sostenible en los procesos educativos contribuye a la transformación de la formación en ingeniería, promoviendo el desarrollo de soluciones innovadoras alineadas con los desafíos ambientales y sociales contemporáneos.

Índice de Términos— Biomímesis, ecodiseño, mobiliario urbano sostenible.

I. INTRODUCCION

El acelerado proceso de urbanización en América Latina ha intensificado la demanda de infraestructura pública que responda simultáneamente a criterios de funcionalidad, sostenibilidad ambiental y bienestar ciudadano. En ciudades como Montería, Colombia, donde las temperaturas promedio superan los 28°C durante la mayor parte del año, la ausencia de espacios públicos con condiciones térmicas adecuadas limita el uso y la apropiación de parques, zonas universitarias y áreas de encuentro comunitario, afectando directamente la calidad de vida de la población.

Frente a este escenario, la formación de ingenieros con competencias en diseño sostenible adquiere una relevancia estratégica. La ingeniería no puede limitarse a la resolución técnica de problemas; debe integrar criterios ambientales, sociales y de ciclo de vida desde las etapas más tempranas del proceso proyectual. En este sentido, el ecodiseño se consolida como una metodología clave que permite a los futuros profesionales desarrollar productos y sistemas con menor impacto ambiental, mayor eficiencia energética y mayor responsabilidad frente a las generaciones futuras [1].

En paralelo, la biomimética ha emergido como una disciplina transversal de creciente relevancia en ingeniería, arquitectura y diseño industrial. Al reconocer a la naturaleza

como una base de datos de soluciones validadas por millones de años de evolución [2], la biomimética ofrece principios funcionales transferibles al diseño de productos,

estructuras y materiales. Uno de estos principios, el heliotropismo, describe el movimiento de hojas y flores en respuesta a la posición solar, fenómeno que ha sido estudiado como modelo para optimizar sistemas de captación de energía fotovoltaica [3] y ha inspirado el diseño de edificaciones que rotan para maximizar la exposición solar [4].

Este artículo presenta el proyecto Banca BioSolar SOLARIS, desarrollado como caso de estudio en formación en ecodiseño con estudiantes de Ingeniería Industrial de la Universidad de Córdoba durante el semestre 2025-II. El proyecto integra los tres conceptos mencionados —ecodiseño, biomimética y heliotropismo— en el desarrollo de un mobiliario urbano que ofrece sombra adaptativa mediante pétalos móviles que siguen la trayectoria solar, generación de energía renovable autónoma, iluminación LED y carga USB para usuarios, todo construido con materiales de bajo impacto ambiental.

El objetivo del artículo es documentar el proceso metodológico, los resultados ambientales cuantificables y el valor pedagógico del proyecto, contribuyendo a la discusión sobre estrategias efectivas de formación en sostenibilidad para la ingeniería latinoamericana..

II. JUSTIFICACION

Montería, capital del departamento de Córdoba, es una de las ciudades con mayor índice de temperatura media del país, con registros que superan los 32°C en horas pico. Estudios recientes sobre el efecto isla de calor urbana demuestran que la falta de vegetación, superficies impermeables y ausencia de sombra artificial en espacios públicos intensifican el estrés térmico, reducen la permanencia en espacios abiertos y elevan la demanda energética para climatización [5]. Esta situación es especialmente crítica en contextos universitarios, donde la movilidad peatonal y el uso de zonas de descanso son cotidianos.

Desde una perspectiva ambiental, el mobiliario urbano convencional raramente considera criterios de ciclo de vida en su diseño. El 80% de los impactos ambientales de un producto se definen en la etapa de diseño [6], lo que convierte al ecodiseño en una herramienta de intervención preventiva de alto potencial. La integración de energía solar en infraestructura urbana no solo reduce emisiones, sino que democratiza el acceso a servicios energéticos básicos como la carga de dispositivos o la iluminación nocturna, contribuyendo directamente a los ODS 7, 9, 11 y 12.

Desde una perspectiva pedagógica, existe una brecha entre la formación técnica tradicional en ingeniería y las competencias requeridas para el desarrollo sostenible. Más del 55% de los centros de innovación encuestados en estudios sobre ecodiseño reconocen el concepto pero no lo aplican, citando como barreras la dificultad de obtener beneficios tangibles a corto plazo y la falta de compromiso institucional [7]. Incorporar el ecodiseño como estrategia de formación activa —no solo como contenido teórico— es una respuesta directa a esta brecha, generando profesionales capaces de articular conocimiento técnico con responsabilidad ambiental

III. OBEJTIVOS

Objejtivo General

Desarrollar y evaluar la Banca BioSolar SOLARIS como caso de estudio en formación en ecodiseño para ingeniería, integrando principios de biomimética, heliotropismo y análisis de ciclo de vida para la generación de soluciones sostenibles en contextos urbanos cálidos

Objetivos Especificos

- Aplicar herramientas metodológicas de ecodiseño (Matriz MET, eco-indicadores y estrategias de mejora) al desarrollo del mobiliario urbano SOLARIS.
- Implementar principios de biomimética y heliotropismo en el diseño funcional de la banca para optimizar el aprovechamiento de la energía solar.
- Evaluar el desempeño ambiental del producto mediante eco-indicadores que cuantifiquen el balance de materiales, energía y toxicidad a lo largo del ciclo de vida.
- Validar el ecodiseño como estrategia pedagógica efectiva para la formación en sostenibilidad de estudiantes de Ingeniería Industrial.

IV. MARCO TEORICO

A. Ecodiseño

El ecodiseño se define como el conjunto de acciones orientadas a la mejora ambiental de un producto en la etapa inicial de diseño, mediante la selección de materiales menos impactantes, la aplicación de procesos alternativos y la minimización del impacto en el ciclo de vida [7]. Como estrategia global de innovación, está vinculado a la ecoinnovación: cualquier forma de innovación que avance hacia el desarrollo sostenible reduciendo los impactos ambientales y mejorando el uso eficiente de recursos naturales. Su implementación requiere equipos interdisciplinares, herramientas cualitativas (VEA) y cuantitativas (ACV), y un proceso de seis fases: planteamiento, evaluación del producto, ecobriefing, escenarios de mejora, validación e informe final.

En el contexto educativo, investigaciones recientes destacan que el aprendizaje basado en proyectos de ecodiseño mejora significativamente el desarrollo de competencias de sostenibilidad en ingeniería, al integrar pensamiento sistémico con aplicación práctica real [2]. Estudios sobre la madurez del ecodiseño en empresas señalan que el proceso de cambio está liderado por sectores que lo adoptan como factor diferenciador competitivo, siendo la reducción de emisiones y el uso eficiente de materiales las motivaciones más frecuentes [7].

B. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida es la metodología cuantitativa estandarizada (ISO 14040/14044) para evaluar los impactos ambientales de productos, servicios y sistemas a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta el

fin de vida [6]. Su aplicación en diseño de mobiliario ha demostrado que las decisiones de material y proceso tomadas en fase de diseño determinan hasta el 80% del impacto ambiental total del producto, lo que justifica su incorporación como herramienta formativa en etapas tempranas de la ingeniería.

Investigaciones recientes sobre ACV en mobiliario sostenible identifican como estrategias prioritarias la sustitución de materiales con alternativas recicladas o de menor huella de carbono, la adopción de procesos de fabricación más eficientes energéticamente, y el diseño para facilitar el reciclaje y la economía circular al fin de vida [8]. En este proyecto, el ACV se simplificó mediante la Matriz MET y eco-indicadores, herramienta cualitativa-cuantitativa que permite a estudiantes identificar puntos críticos del ciclo de vida sin requerir software especializado, conservando la esencia metodológica del enfoque.

C. Biomimética

La biomimética es la aplicación de métodos y sistemas biológicos encontrados en la naturaleza al estudio y diseño de sistemas de ingeniería. Su premisa central es que la naturaleza, tras millones de años de evolución, representa una base de soluciones funcionales validadas y optimizadas [3]. En diseño industrial, la biomimética se aplica en tres niveles: imitando morfologías naturales, reproduciendo mecanismos funcionales, y adoptando principios organizativos de sistemas biológicos. El desarrollo sostenible impulsa crecientemente la adopción de la biomimética como estrategia para generar soluciones con menor impacto ambiental, contribuyendo al logro de los ODS mediante la mejora de la eficiencia y la reducción del impacto de cada diseño [9].

En arquitectura y diseño urbano, la biónica vegetal ha demostrado especial potencial: imitar las estructuras, funciones y principios de crecimiento de las plantas ha permitido desarrollar edificaciones que optimizan la captación solar, materiales con autolimpieza inspirados en la hoja de loto, y sistemas de ventilación basados en el metabolismo de plantas [10]. Una revisión de estrategias biomimétcas en ciudades construidas identifica que las aplicaciones de mayor impacto en el entorno urbano son aquellas que trasladan mecanismos funcionales no solo formas de los organismos al diseño construido [11].

D. Heliotropismo

El heliotropismo es el fenómeno biológico por el cual órganos vegetales se mueven en respuesta a la posición solar. El diaheliotropismo describe el movimiento perpendicular a los rayos solares (maximizando captación), mientras el paraheliotropismo describe la orientación paralela (reduciendo sobreexposición). Este fenómeno, regulado por gradientes hormonales y diferencias en la presión de turgencia celular, optimiza el desempeño fotosintético de las plantas según las condiciones de irradiancia [12].

Su transferencia a sistemas de seguimiento solar fotovoltaico ha sido objeto de investigación creciente. Sistemas de doble eje inspirados en el heliotropismo del girasol incrementan la producción energética entre un 27% y un 40% respecto a instalaciones fijas, dependiendo de la latitud y las condiciones climáticas [13]. Una revisión de tecnologías de seguimiento solar documenta que el interés científico en esta área se ha más que duplicado entre 2019 y 2024, consolidándola como una de las estrategias más prometedoras para mejorar la eficiencia de sistemas fotovoltaicos [4]. En el caso SOLARIS, el heliotropismo se traduce en pétalos móviles orientables que siguen la trayectoria solar, reduciendo el ángulo de incidencia directa y maximizando la sombra efectiva sobre el área de descanso.

E. Mobiliario Urbano Sostenible

El mobiliario urbano sostenible integra funciones de confort, servicios tecnológicos y criterios ambientales en un único elemento de espacio público. Investigaciones recientes destacan que la demanda de mobiliario urbano inteligente que combine materiales sostenibles con tecnologías como paneles solares, iluminación LED, puertos de carga USB y conectividad Wi-Fi ha crecido significativamente, impulsada por la expansión urbana y la necesidad de infraestructuras más resilientes y eficientes energéticamente [14].

Estudios sobre confort térmico en espacios públicos abiertos en climas cálidos señalan que la provisión de sombra eficiente, junto con estrategias de ventilación pasiva, reduce el estrés térmico percibido hasta en un 30%, incrementando el tiempo de permanencia en zonas urbanas y mejorando la calidad de vida ciudadana [5]. La integración de sistemas solares en infraestructura pública urbana ofrece además un beneficio dual: mitiga el efecto isla de calor mientras reduce las emisiones de carbono asociadas al consumo energético de servicios urbanos [15].

V. METODOLOGIA

El proyecto SOLARIS se desarrolló durante el semestre 2025-II en la asignatura de Ecodiseño del programa de Ingeniería Industrial de la Universidad de Córdoba, siguiendo la metodología de seis fases de Rieradevall (2009) adaptada al contexto pedagógico universitario. El proceso completo duró 16 semanas, con entregas parciales en cada fase evaluadas por la docente.

A. Fase 1 – Selección y Preparación del Proyecto

Se realizó un diagnóstico del entorno urbano universitario para identificar necesidades no resueltas. La Banca BioSolar fue seleccionada mediante una tabla de criterios ponderados en tres dimensiones: necesidad climática (alta temperatura, ausencia de sombra en zonas de descanso), innovación tecnológica (integración de energía solar y biomimética) e impacto social (mejora de calidad de vida de estudiantes y ciudadanos en contextos de alta temperatura). Complementariamente, se elaboraron hojas de factores motivantes externos (clima, tendencias de mercado, relación con ODS) e internos (innovación del diseño, sostenibilidad del producto, visión del equipo).

B. Fase 2 – Evaluación Ambiental: Matriz MET

Se aplicó la Matriz MET (Materiales, Energía, Toxicidad) para caracterizar los impactos ambientales en cuatro etapas del ciclo de vida. En producción se inventariaron 85,3 kg de materiales: acero inoxidable 304 (18,5 kg), acero galvanizado (12,0 kg), aluminio estructural (30,3 kg totales), policarbonato y ABS (3,3 kg), panel solar flexible (1,2 kg), rattan sintético

PEHD (4,5 kg), lona PVC (3,2 kg) y componentes electrónicos (1,5 kg). La energía de fabricación se estimó en 367 kWh, concentrada en procesos de corte láser y CNC (180 kWh), moldeo por inyección (95 kWh) y soldadura TIG/MIG (45 kWh). Las emisiones tóxicas críticas identificadas fueron COV en pintura (~0,4 kg) y ftalatos potenciales en PVC (~0,15 kg).

En la fase de uso (15 años), la generación solar acumulada se proyectó en 245,6 kWh netos, resultando en un excedente de +166,5 kWh frente al consumo del producto. El punto crítico identificado fue la lona PVC (8,96 mPt en desecho), material de difícil reciclaje que se recomienda sustituir en versiones futuras por textiles técnicos reciclados.

C. *Fase 3 – Generación y Priorización de Ideas de Mejora*

Se generaron siete ideas mediante brainstorming estructurado: autonomía energética solar, materiales sostenibles reciclados, mecanismo de heliotropismo, confort térmico activo/pasivo, diseño biomimético funcional, modularidad y desmontaje, y superficies hidrofóbicas. Cada idea fue evaluada mediante una Matriz de Priorización con dos criterios ponderados: Impacto Ambiental Positivo (IA) y Viabilidad Técnica (VT), en escala de 1 a 5. Las ideas con puntuación total $\geqslant 8$ —autonomía solar (IA=5, VT=4), materiales reciclados (IA=5, VT=4), modularidad (IA=4, VT=5) y diseño biomimético (IA=3, VT=5)— fueron integradas como requisitos de concepto. El mecanismo de heliotropismo (IA=4, VT=3) fue incorporado como elemento diferenciador por su alto valor innovador y su alineación con el concepto generador biomimético.

D. *Fase 4 – Desarrollo de Concepto*

El concepto SOLARIS integra las ideas priorizadas: mástil central de acero inoxidable 304, 12 pétalos de aluminio con lona PVC impermeable y bisagras de acero inoxidable, mecanismo de apertura y orientación activado por sensores solares (biomimética del heliotropismo del girasol), cuatro bancas de marco de aluminio con rattan sintético PEHD, panel solar central flexible de 1,2 kg, sistema LED (8h/día), puertos USB y cableado eléctrico de bajo consumo. El diseño se documentó en planos conceptuales y fue prototipado a escala reducida mediante impresión 3D para validación dimensional y estética. La selección de materiales privilegió aluminio reciclado post-industrial para bancas y estructura, y polipropileno reforzado con fibra para el disco central, reduciendo el impacto ambiental de producción entre 30% y 60% frente a materiales vírgenes.

E. *Fase 5 – Cálculo de Eco-Indicadores*

Los eco-indicadores (sistema de puntuación en mPt que mide la carga ambiental total) se calcularon para los principales flujos de materiales y energía. El aluminio estructural representó el mayor impacto (30,3 kg, 23.634 mPt), seguido del acero (36 kg, 20.920 mPt) y la energía de fabricación (367 kWh, 8.093 mPt). Sin embargo, el potencial de recuperación de aluminio al fin de vida (28,8 kg recuperables, -20.736 mPt) y de acero (34,2 kg recuperables, -2.268 mPt) mejora significativamente el balance ambiental global. La generación solar proyectada durante la vida útil compensa con creces el impacto de producción, resultando en un balance neto positivo.

F. *Fase 6 – Integración en Sistema de Gestión Ambiental (ISO 14001)*

Como parte del ejercicio formativo, el equipo elaboró un plan de acción para la integración del ecodiseño en un sistema de gestión ambiental conforme a ISO 14001. Esto incluyó la actualización de la política ambiental corporativa (incorporando compromisos de diseño responsable a lo largo del ciclo de vida), la identificación de requisitos legales aplicables a mobiliario urbano con componentes eléctricos, el establecimiento de objetivos de minimización de materiales vírgenes y extensión de vida útil, y la definición de roles y responsabilidades transversales para el desarrollo sostenible del producto.

VI. Resultados

A. *Desempeño Ambiental*

El balance ambiental de SOLARIS es positivo. La generación solar estimada durante 15 años (245,6 kWh acumulados) supera el consumo energético imputable al producto en fase de uso, generando un excedente de +166,5 kWh equivalente a evitar aproximadamente 18.200 kg de CO_2 frente a generación convencional. El balance de materiales al fin de vida es también favorable: el aluminio recuperable (28,8 kg) y el acero recuperable (34,2 kg) reducen significativamente el impacto neto de producción. El único punto crítico persistente es la lona PVC (3,2 kg, 8,96 mPt en desecho), cuya sustitución por textil técnico reciclado se recomienda en iteraciones futuras.

B. *Desempeño Funcional y Técnico*

SOLARIS integra cuatro funciones principales: sombra adaptativa mediante pétalos orientables (operación estimada: 5 ciclos/día, 45,6 kWh/año), generación de energía solar autónoma (panel flexible de 1,2 kg), iluminación LED nocturna (8 h/día, 18,25 kWh/año) y carga USB para usuarios (15,3 kWh/año). El diseño modular facilita mantenimiento selectivo y desmontaje sin herramienta especializada. La validación dimensional con prototipo impreso en 3D confirmó la viabilidad del ensamblaje y la coherencia estética del concepto biomimético. En un sistema de doble eje con seguimiento solar comparable, la literatura reporta incrementos de eficiencia del 27% respecto a paneles fijos en latitudes tropicales [13], validando la pertinencia del mecanismo de heliotropismo aplicado.

C. *Desempeño Pedagógico*

El proyecto demostró ser un caso de formación efectivo. Los estudiantes aplicaron integralmente cinco marcos conceptuales y seis herramientas metodológicas en un producto con impacto social real. La articulación entre conocimiento técnico y criterios de sostenibilidad permitió desarrollar competencias transversales documentadas en la literatura como esenciales para ingenieros del siglo XXI: pensamiento sistémico, análisis de impacto ambiental, toma de decisiones multi-criterio y comunicación técnica [2]. La relación directa del proyecto con los ODS proporcionó un marco de pertinencia social que fortaleció el compromiso del equipo con la calidad del proceso formativo.

VII. Conclusiones

El ecodiseño, integrado con ACV, biomimética, heliotropismo y criterios de mobiliario urbano sostenible,

demostró ser una estrategia pedagógica efectiva para el desarrollo de competencias en sostenibilidad en ingeniería. La Banca BioSolar SOLARIS no es solo una solución técnica para el mejoramiento del espacio público en ciudades cálidas, sino un modelo de aprendizaje activo donde los estudiantes asumen el diseño sostenible como responsabilidad profesional integral.

El balance ambiental positivo del producto +166,5 kWh de excedente energético y ~18.200 kg de CO_2 evitados en 15 años confirma que la convergencia entre energía renovable, materiales reciclados y diseño biomimético genera soluciones con beneficios ambientales cuantificables. El punto crítico identificado, la lona PVC, abre una línea de mejora para versiones funcionales futuras del producto.

La biomimética del heliotropismo, traducida en pétalos orientables que siguen la trayectoria solar, evidencia que principios biológicos pueden convertirse en soluciones de ingeniería concretas con ventajas energéticas documentadas. Este enfoque enriquece la formación al vincular conocimiento biológico con resolución de problemas de ingeniería, ampliando el repertorio conceptual de los futuros profesionales más allá del paradigma puramente técnico.

Se recomienda continuar el desarrollo del prototipo funcional de SOLARIS, realizar pruebas de eficiencia del mecanismo de heliotropismo bajo condiciones climáticas reales de Montería, sustituir la lona PVC por alternativas textiles recicladas de alto desempeño UV, y documentar la experiencia pedagógica como referente para la integración del ecodiseño en currículos de ingeniería en Colombia y la región.

REFERENCES

[1] .Frontiers in Sustainable Cities. (2025). "Understanding the transformative potential of solar thermal technology for urban sustainability." doi: 10.3389/frsc.2025.1583316

[2] Fishlock, S., Thompson, M., y Grewal, A. (2023). "Sustainable Engineering Design in Education: A Pilot Study of Teaching Right-to-Repair Principles through Project-Based Learning." Global Challenges, 7(10), 2300158. doi: 10.1002/gch2.202300158

[3] Jiang, M., Deng, W., y Lin, H. (2024). "Sustainability through Biomimicry: A Comprehensive Review of Bionic Design Applications." Biomimetics, 9(9), 507. doi: 10.3390/biomimetics9090507

[4] ScienceDirect. (2025). "A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems." Energies, 18(10), 2553. doi: 10.3390/en18102553

[5] Scientific Reports. (2024). "Optimizing human thermal comfort and mitigating the urban heat island effect on public open spaces." doi: 10.1038/s41598-024-65794-8

[6] Sakib, M.N., Kabir, G., y Ali, S.M. (2024). "A life cycle analysis approach to evaluate sustainable strategies in the furniture manufacturing industry." Science of The Total Environment, 907, 167611. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167611

[7] Rieradevall i Pons, J. (2014). "Ecodiseño estrategia clave para la ecoinnovación de productos y servicios." Teoría y Praxis Investigativa, 9(2), 8-15. Universidad de La Salle, Bogotá.

[8] Yang, D., Vezzoli, C., y Su, H. (2025). "Furniture Product Eco-Design Based on Life Cycle Assessment." BioResources, 20(3), 6765-6778.

[9] PMC / Biomimetics. (2024). "Innovation Inspired by Nature: Applications of Biomimicry in Engineering Design." doi: 10.3390/biomimetics9090523

[10] Mei, X., Liu, C., y Li, Z. (2024). "Research progress on functional, structural and material design of plant-inspired green bionic buildings." Energy & Buildings, 316, 114357. doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114357

[11] PMC. (2024). "Biomimetic Strategies for Sustainable Resilient Cities: Review across Scales and City Systems." doi: 10.3390/biomimetics9090507

[12] Bonfiglioli, F.C.M. (2017). Biomimetismo do paraheliotropismo foliar no estudo de produção de energia elétrica em placas fotovoltaicas. Trabajo de Conclusión de Curso, UNESP - Rio Claro, Brasil.

[13] MDPI Sustainability. (2025). "Dual-Axis Solar Tracking System for Enhanced Photovoltaic Efficiency in Tropical Climates." Sustainability, 17(3), 1117. doi: 10.3390/su17031117

[14] Journal of Sustainability Research. (2025). "Towards Greener Futures: AI-Powered Designs for Sustainable, Accessible, and Energy-Smart Urban Furniture." doi: 10.20900/jsr20250021

[15] Frontiers in Sustainable Cities. (2025). "Solar thermal technology for urban sustainability and UHI mitigation." doi: 10.3389/frsc.2025.1583316.

On the Development of a Progressive Web Application Integrating Generative AI and Intelligent Systems for Personalized Learning in Mathematics and STEM Education

Omar Ramírez González
Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia
omramirezg@unal.edu.co

Juan D. Pérez López
Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia
juperezlo@unal.edu.co

Abstract— This work presents the development of a Progressive Web Application (PWA) designed as a modular intelligent learning environment for personalized education in mathematics and STEM. The system addresses persistent limitations in conventional digital learning platforms, including delayed feedback, weak contextual adaptation, fragmented support between theory and practice, and limited responsiveness to student progression. To overcome these challenges, the platform is built upon a multi-layer architecture integrating a dynamic learner model, an adaptive decision engine, telemetry-driven learning analytics, contextual tutoring, and an interactive scientific visualization layer that governs how content is structured, represented, and activated for each learner. The development emphasizes coordinated interoperability across intelligent subsystems rather than isolated AI functionalities: adaptive planning mechanisms regulate sequencing, difficulty, and representation, while agent-based decision-making components introduce contextual capabilities within study sessions, enabling dynamic content generation, adaptive feedback, and role-oriented instructional behavior. In this framework, large language models provide contextual tutoring, generative explanations, and real-time learning support, complemented by interactive visual modules for guided practice and multimodal content delivery. To ensure pedagogical consistency and reliability, the system incorporates validation and calibration mechanisms that guide the generation and adaptation of exercises, maintaining coherence in difficulty progression, solution quality, and evaluation criteria across learning sessions. Implemented as a PWA, the system ensures cross-device accessibility, low-friction interaction, and session continuity aligned with modern student behaviors. This paper explains how generative artificial intelligence, particularly large language models, and intelligent adaptive systems can converge within a unified online platform to enhance personalization, interactivity, and continuity in learning processes across mathematics and STEM education.

Keywords— Intelligent tutoring systems, Progressive Web Application, Generative Artificial Intelligence, Personalized Learning, Adaptive Learning Systems.

I. INTRODUCTION

Generative artificial intelligence (GenAI), large language models (LLMs), and agentic software have shifted the practical problem of digital education. Students can already obtain explanations, examples, and procedural assistance almost instantly. The harder question for engineering education is whether those capabilities can be placed inside a learning environment that remembers progress, respects prerequisites, validates outputs, and adapts support across sessions [19], [20].

Integral calculus was selected because it exposes this design problem in a compact but demanding form. It combines symbolic manipulation, conceptual interpretation, graphical reasoning, cumulative prerequisites, and repeated practice. Two students may fail on the same integral for different reasons: weak algebraic fluency, poor understanding of accumulation, difficulty connecting formulas with graphs, or lack of feedback while practicing. A useful system must therefore do more than answer; it must guide, sequence, explain, visualize, verify, and keep track of what happened before.

This paper reports the development of a concrete progressive web application (PWA), not a general position paper about AI in education. The artifact combines a domain graph, learner state, adaptive page logic, agent-mediated tutoring services, generated learning resources, validation gates, and a learner-facing workspace. Generative AI is used as a service inside that architecture, mainly for explanation, scaffolding, example generation, feedback, and scientific media specification; it is not treated as the whole tutoring system.

Contributions are therefore framed around development rather than performance claims. First, the paper documents the path from an educational problem to a working platform architecture. Second, it explains how learner modeling, content generation, feedback, scientific media, and interface continuity are connected in one adaptive workflow. Third, it separates designed or implemented mechanisms from empirical effectiveness claims, so that later validation can be evaluated without overstating the current stage of the work.

A development paper is useful when it makes the artifact inspectable. For that reason, the manuscript does not present the platform as a finished product or as a model benchmark. It explains what was built, which abstractions were needed, which

choices were made, and which parts still require empirical validation.

II. BACKGROUND AND DESIGN RATIONALE

Personalized learning is not a visual label or a different paragraph generated for each student. The literature treats it as a family of adaptations involving pace, sequence, content, assessment, feedback, learner control, and context [1], [2]. For a development paper, this distinction matters: personalization becomes operational only when the system uses evidence about the learner to choose or reshape a learning action.

Intelligent Tutoring Systems provide the older but still useful vocabulary for this design. The classical separation among domain model, student model, tutor model, and interface is not included as historical ornament; it is used because it forces the system to separate what is being taught, what is known about the learner, how instruction is selected, and how support is delivered [3]-[6]. That separation becomes more important, not less, when probabilistic AI components are introduced.

Learner modeling is the mechanism that turns interaction data into adaptation. Prior ITS work has used mastery estimates, Bayesian knowledge tracing, clustered student models and more recent transformer-based approaches to infer learning state [5], [30], [38]. The present platform begins with a lighter model based on attempts, correctness, progress, confidence signals and recent history, but its architecture is designed so that more advanced tracing methods can later replace the baseline.

Feedback is the educational point where adaptation becomes visible. Studies on automated feedback, trust-aware feedback and human-in-the-loop adaptive systems show that useful feedback must be timely, specific, reliable and sensitive to the student's current task [13], [29], [34]. The platform therefore treats feedback as a structured pedagogical action rather than as a free-form conversational response.

Recent generative AI work adds flexibility to this ITS structure. LLM-based tutors, pedagogical agents, virtual peers, adaptive chat assistants, and content generators can produce explanations, exercises, recommendations, and guided responses [7], [8], [11], [12], [14]-[18], [21]-[26], [28], [31], [32], [39]. In this paper, however, an agent is not a marketing synonym for autonomy. It denotes a bounded software role with inputs, context, output schema, and validation rules. This framing is necessary because fluent generated text can still be mathematically wrong, too direct, too vague, or misaligned with the learner's need.

Visual support also matters because many learning difficulties in calculus are not purely procedural. Hybrid personalized-learning frameworks, gamified ITS designs, knowledge-graph approaches, learning analytics systems, AI assessment studies, and project-based AI environments all point toward learning environments that combine text, practice, visualization, and monitoring rather than treating learning as a chat-only process [9], [10], [27], [33], [35]-[37]. This motivates the scientific media pipeline used for visual representations of calculus concepts.

Seen from this perspective, the platform builds on a short but specific historical movement rather than on a sudden technological fashion. ITS research decomposed tutoring into inspectable models; adaptive learning emphasized learner evidence and sequencing; recent LLM systems introduced language, feedback, and media generation at lower authoring cost. The development challenge is to combine these lines without reducing education to a free-form chat box.

This historical line is intentionally brief. Earlier ITS work gives the paper its structural grammar, while current GenAI work gives the platform a new authoring and interaction layer. The central design question is how to let the newer layer operate without dissolving the older pedagogical structure.

For engineering education, the economic and institutional context also matters. Courses increasingly expect students to learn with digital material, automated feedback, online assessment, and informal AI assistance, yet many institutional platforms still behave as repositories of files, announcements, and grades. A more ambitious learning platform should treat intelligence as part of the instructional infrastructure: what is recommended, what is explained, what is visualized, what is remembered, and what is reported back to teachers. This paper positions the artifact inside that transition without claiming that software alone can solve the pedagogical problem.

III. DEVELOPMENT SCOPE AND METHOD

This work follows a design and development research approach centered on an educational technology artifact. The unit of analysis is not a dataset or a controlled experiment, but the platform architecture and its learning workflow: a PWA interface, a domain model for calculus, learner evidence, adaptive selection, AI-supported tutoring services, generated learning resources, and validation mechanisms.

Although the initial domain is integral calculus, the architecture is intentionally modular. Calculus was chosen because it exposes the full design burden: prerequisite sequencing, symbolic procedures, conceptual explanation, visual representation, practice, and frequent misconceptions. If the architecture can organize those demands, the same design logic can later be tested in other STEM subjects.

Development did not begin with a model prompt. It began with design artifacts: problem statements from coursework, reading notes from the literature review, knowledge-component lists, prerequisite sketches, interface flows, architecture diagrams, figure drafts, and validation tables. These documents served as intermediate research products. They forced the team to decide what the system must know, what it may generate, when it should intervene, and what evidence would later be required to evaluate it.

Several early documents shaped the artifact before implementation details stabilized. Reading notes from the systematic review helped identify recurring components in the literature: domain models, learner models, feedback policies, conversational support, content generation, analytics, and validation. Separate sketches then translated those concepts into the platform's vocabulary: knowledge components instead of chapters, learner evidence instead of generic profiles, contextual actions instead of open-ended chat commands, and visual blocks instead of decorative media. This intermediate documentation

mattered because it prevented the system from being designed around a single interface feature.

In practice, the first design artifacts were deliberately rough.

Knowledge-component lists were used to ask whether the domain could be sequenced. Flow diagrams were used to ask where the learner would enter, pause, ask for help, attempt a task, and return later. Architecture figures were used to test whether AI services had enough context to be useful without becoming uncontrolled. Validation tables were used to separate what the system can currently do from what must be checked by an instructor, a student, or an empirical study. The paper's figures are therefore not independent illustrations; they are condensed versions of the development reasoning.

Those artifacts were then translated into implementation objects. A knowledge-component list became a domain graph; page sketches became precomputed learning pages; figure drafts became a scientific media pipeline; and review notes became validation criteria. This trace is important because it shows that the system was designed from educational requirements toward software modules, not from an AI API outward.

For clarity, development maturity is separated into three levels. Implemented elements refer to components already represented in the platform design and development workflow. In-development elements have a defined technical role but still require hardening, validation, or instructor calibration. Future work covers empirical studies, richer learner modeling, classroom deployment, and evidence about learning impact.

Claims are kept deliberately conservative. This paper does not state that the platform improves grades, retention, or motivation because controlled classroom validation is not reported here. When the paper discusses personalization, it refers to mechanisms designed or implemented inside the architecture, not to measured educational impact.

IV. SYSTEM DESIGN AND ARCHITECTURE

A. Minimal Operational Model

To avoid a purely descriptive architecture, the platform is summarized through two compact engineering relations. They are not presented as a complete theory of learning; they simply define the main objects that must exist for adaptation to be testable.

(1) $G_D = (K, E)$, where $E \subseteq K \times K$

(2) $a_t = \pi(L_t, G_D, q_t)$, with $L_t(k) = (m_t(k), c_t(k), e_t(k), h_t)$

In (1), G_D is the domain graph, K is the set of knowledge components and E contains prerequisite relations. In (2), a_t is the instructional action selected at time t, π is the adaptation policy, q_t is the current learner request, and $L_t(k)$ stores mastery, confidence, evidence and recent history for concept k.

This notation is useful only because it maps to inspectable software responsibilities. Each term corresponds to a component that must exist if adaptation is to be testable: course structure, learner evidence, adaptive decision, generated output, and interface response. That mapping keeps the system closer to an ITS architecture than to an unconstrained chat interface.

A practical implication follows from this representation. If the domain graph is incomplete, the system may recommend a topic that is formally correct but pedagogically premature. If learner evidence is too shallow, the adaptive policy may confuse persistence with mastery or confusion with lack of effort. If the generated output is not linked to a learning objective, the interface may display a fluent explanation that does not advance the current task. Treating these objects explicitly makes failure modes easier to locate.

Architecturally, six cooperating components define the system. A domain model represents integral-calculus knowledge components such as antiderivatives, substitution, integration by parts, improper integrals, series, and applications. Each component can include prerequisites, objectives, estimated difficulty, examples, exercises, and links to learning resources. A learner model then stores session activity, attempts, correctness, completion, confidence indicators, recent requests, and mastery aggregates. Its purpose is not to fully diagnose cognition, but to maintain enough evidence for the platform to avoid treating every student and every session as new.

Pedagogical adaptation translates that evidence into action. Depending on the domain graph, learner state, current task, and representation mode, the system may provide a conceptual explanation, a worked example, a visual representation, additional practice, a hint, answer verification, or prerequisite review. AI-supported generation is then implemented as bounded services rather than as a single conversational assistant: an explanation service, a hinting service, a practice-item service, a verification service, and a visual-specification service. Each service receives course context, learner evidence, and an output contract; each returns a constrained object that can be displayed, stored, reviewed, or rejected.

Reliability depends on a contract and validation layer. Because generative outputs are probabilistic, the platform uses structured schemas, typed requests, rendering states, and validation rules to separate acceptable learning objects from incomplete or unsafe outputs. This layer is central for traceability, instructor review, later auditing, and responsible use of AI inside an educational system.

Agentic behavior appears in orchestration rather than autonomy. The system can route a learner request to the appropriate service, ask for a visual representation instead of a textual answer, request verification before showing generated material, or fall back to instructor-defined resources. The learner sees this as contextual support inside a page; the architecture treats it as a controlled sequence of decisions.

The agent layer is therefore best understood as a set of controlled instructional roles. One role prepares context by combining the current knowledge component, prerequisites, recent attempts, and preferred mode of representation. Another role requests a specific output, such as a hint, worked example, short explanation, exercise variant, or visual specification. A third role checks whether the returned object satisfies the expected structure and whether it should be shown immediately, cached for later use, or marked for instructor review. This division keeps the platform from relying on a single monolithic response.

LLMs are useful here because they can produce language and examples at a speed that traditional authoring cannot match. They are also risky for exactly the same reason. The platform therefore treats generated text as provisional instructional material. It should be grounded in the course model, shaped by the learner state, and filtered by validation rules before it becomes part of the study experience.

Finally, scientific media and interface components assemble visual assets, page blocks, contextual actions, progress indicators, and feedback messages into learner-facing pages. The interface is not a passive container; it is where the adaptive decision becomes understandable and usable. Precomputed learning pages are used to reduce latency and improve continuity: when learner state and domain context are available, the system can prepare page structures, assets, practice blocks, and support actions before the student needs them.

A session therefore begins with onboarding or course entry, continues through diagnostic evidence and topic selection, and then iterates through explanation, practice, feedback, visual support, and learner-state update. Fig. 1 summarizes the layered architecture, and Table I lists the core components that make the development inspectable.

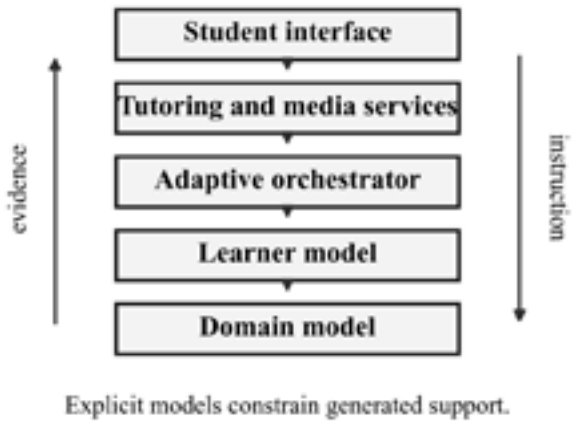


Fig. 1. Layered architecture of the proposed PWA for personalized and adaptive integral-calculus learning.

TABLE I. CORE PLATFORM COMPONENTS AND DEVELOPMENT ROLE

Component	Development role
Domain model	Organizes integral-calculus knowledge components, prerequisites, objectives and resources.
Learner model	Stores attempts, progress, confidence signals and recent history for personalization.
Adaptive model	Selects explanation, practice, hint, visual support, review or verification actions.
AI generation layer	Produces constrained explanations, examples, hints, practice and visual specifications.
Validation layer	Checks schemas, mathematical plausibility, rendering states and pedagogical fit.
Interface layer	Turns adaptive decisions into visible paths, pages, feedback and workspace artifacts.

V. DEVELOPMENT PROCESS AND ADAPTIVE WORKFLOW

Work on the adaptive workflow began from course structure rather than from a prompt interface. Representing calculus as knowledge components connected by prerequisites gives the system a reason to recommend a next topic, detect missing foundations, request a prerequisite review, or align generated material with a concrete learning objective.

A typical learning session follows a loop. The student opens the course path, selects or receives a recommended component, enters a prepared learning page, studies blocks of explanation and examples, requests support when needed, attempts exercises and receives feedback. Each interaction contributes evidence to the learner model, which can alter the next recommendation or representation.

Learner evidence is intentionally modest at this stage, but it is designed to be useful. The platform does not need to infer a complete cognitive profile before it can adapt. It can begin with observable traces: which component the student opened, how long the page remained active, which support actions were requested, which examples were saved, which attempts failed, and whether feedback was followed by another attempt. These signals are imperfect, but they give the system a memory that ordinary static course pages and isolated chat sessions do not have.

That memory also changes the tone of support.

A first request for help may justify a short hint. Repeated requests after failed attempts may justify a worked example, a prerequisite review, or a visual representation. A learner who consistently saves visual resources may benefit from more graphical explanations, while a learner who succeeds after symbolic hints may need a different path. These decisions remain simple, but they are pedagogically different from giving every learner the same generated response.

An adaptive action is not equivalent to asking an LLM a question. The system can choose among guided explanation, formal derivation, visual conversion, additional examples, step-level hints, verification, and practice. This matters because two students asking about the same integral may need different support: one may need prerequisite review, another a graphical interpretation, and another a procedural hint.

Continuity is handled through the learner workspace. Useful explanations, generated examples, visual references, notes, and practice artifacts can persist across sessions. This responds to a common weakness of chat-based assistance: valuable context is often lost after the immediate answer unless the learning environment deliberately stores and organizes it.

For generated content, context is treated as part of the request rather than as optional decoration. A request for an explanation is packaged with the learning objective, current component, prerequisite status, preferred representation, recent attempts, and output constraints. The response then becomes a candidate learning object, not automatically approved content.

Output contracts are especially important for mathematics. A generated response can be correct but unusable if it skips notation, changes variables without warning, gives away the final answer too early, or explains a method that the learner has not yet studied. For that reason, prompts are better understood as structured requests inside a larger instructional protocol. The request should specify the concept, allowed level of help,

expected format, solution boundary, representation mode, and whether the answer should invite another student action.

This is also where documentation and visualization influenced development. Architecture graphs were used to check whether learner evidence, domain knowledge, generated content, and validation were connected. Tables were used to separate implemented functions from future validation. In that sense, the figures in this paper are not decoration; they summarize design constraints that guided the artifact.

Choosing a PWA was a practical educational decision. Students often study across devices and outside controlled computer laboratories, so a browser-native application can preserve session continuity, provide responsive navigation, expose learning paths, and connect to backend services for learner state, generation, and analytics. Fig. 2 and Table II summarize the adaptive workflow and the current development scope.

Interface continuity is not a secondary concern. Many students do not study in one long, clean session; they move between devices, short time windows, browser tabs, lecture notes, messaging apps, and unfinished practice. For this reason, the interface must preserve more than a score. It should keep the current topic, recent generated resources, saved explanations, unfinished attempts, and visible next actions. A learner returning after a break should not have to reconstruct the entire study context from memory.

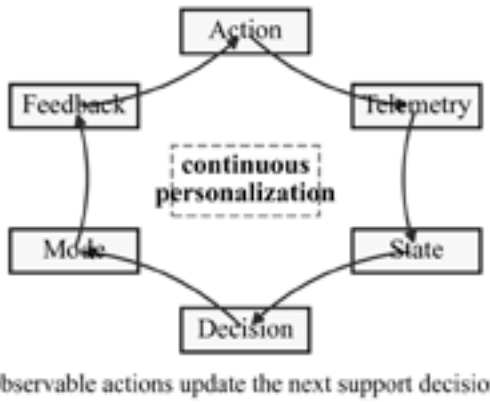


Fig. 2. Continuous personalization workflow connecting student action, telemetry, learner state, adaptive decisions, representation mode and feedback/practice.

TABLE II. DEVELOPMENT STATUS OF MAJOR PLATFORM FUNCTIONS

Function	Current scope and next development step
Course path	Current: prerequisite-based topic path. Next: richer difficulty and misconception tags.
Learner evidence	Current: attempts, sessions, completion and recent actions. Next: calibrated mastery inference.
Adaptive workflow	Current: support modes and contextual actions. Next: policy tuning with real learners.
AI content	Current: constrained explanations, hints and examples. Next: stronger expert review and logging.
Scientific media	Current: visual specifications and rendered assets. Next: validation against learning goals.
Analytics	Current: traces for progress and use. Next: instructor dashboards and cohort-level analysis.

VI. EDUCATIONAL DESIGN AND SCIENTIFIC MEDIA

Educationally, the design follows a simple principle: adaptation should support effort, not remove it. The platform aims to make explanations clearer, examples more relevant, and feedback more timely while preserving the learner's need to reason, attempt, compare, and revise.

That principle affects how assistance is framed. A hint should reduce unproductive blockage, not replace the student's reasoning. A worked example should expose structure, not simply deliver an answer. A generated explanation should be short enough to be usable inside a study page but specific enough to address the current concept. Feedback should help the learner decide what to try next. These constraints are design decisions, not surface-level wording preferences.

Personalized explanation is handled through representation choice. A learner may receive a guided verbal explanation, a formal symbolic derivation, a visual interpretation or a practice-oriented hint depending on the topic and learner state. This is useful in calculus because the same concept can be understood algebraically, geometrically or procedurally.

For visual learning, the scientific media pipeline transforms course context and learning objectives into visual specifications, validates those specifications, and renders reusable learner-facing assets. Examples include graphical interpretations of area, transformations under substitution, accumulation processes, solids of revolution, and convergence behavior.

Visual generation is treated as a scientific media problem rather than as image decoration. A useful visual asset must know what concept it represents, which variables matter, which representation is appropriate, and what misconception it may accidentally reinforce. For example, an area-under-the-curve visualization should not only look clear; it should preserve scale, orientation, interval meaning, and the relationship between accumulation and signed area. Similar care is required for substitution, where the learner must connect an algebraic transformation to a change in structure rather than memorize a mechanical pattern.

This is one reason the platform separates visual specification from rendering.

The specification layer describes the educational intention, mathematical objects, constraints, and expected student-facing block. The rendering layer can then create a reusable asset, while validation checks whether the asset is technically valid and pedagogically meaningful. That separation makes it possible to improve the renderer without changing the educational decision layer, and to improve the pedagogical rules without rewriting the entire media pipeline.

This matters pedagogically because many calculus difficulties are representational. A learner may manipulate a formula without seeing the accumulated quantity, or recognize a graph without connecting it to the symbolic procedure. Scientific media gives the adaptive layer another action besides more text: it can change the mode of representation when the learner's current path suggests that a visual explanation is more appropriate.

Validation is both technical and pedagogical. Technical validation checks schema conformance, rendering feasibility, asset format, latency and failure recovery. Pedagogical validation checks whether the asset actually supports the intended concept, avoids misleading representations and is appropriate for the learner's current level.

This design keeps AI assistance within an instructional frame. The system can generate a visual or textual resource, but the resource should be connected to a learning objective, a known topic, a student action and a later opportunity for practice or feedback. Fig. 3 presents this scientific media pipeline.

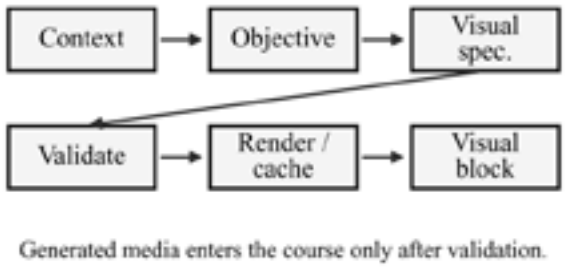


Fig. 3. Scientific media pipeline from course context to validated learner-facing visual assets.

VII. DISCUSSION

A central development argument is that AI becomes educationally useful when it is engineered as part of tutoring infrastructure. A chatbot can answer questions, but it does not necessarily know the course structure, preserve learner evidence, select a pedagogical action, or validate whether a generated explanation fits a learning objective. The platform is designed to provide that missing structure.

This point also matters for the future of AI in education. The next wave of educational systems will likely not be judged only by how well they answer isolated questions. Strong systems will need to maintain durable learner histories, organize domain knowledge, support teachers, generate multiple representations, expose their decisions, and provide evidence that their adaptations are useful. In that sense, development work is not less scientific than evaluation work; it defines the object that later evaluation must examine.

Between deterministic ITS and unconstrained LLM tutoring, this architecture takes a middle position. Deterministic systems are auditable and pedagogically explicit, but they can be rigid and expensive to author. LLM-based systems are flexible, but they can be inconsistent. The proposed design keeps explicit models and validation layers while using generative services where flexibility is useful.

This is where the paper differs from many chatbot demonstrations. The technical contribution is not a model call; it is the coupling between domain graph, learner memory, representation mode, validation gate, and interface action. That coupling is what makes the system a tutoring platform rather than a prompt window.

A simple example illustrates the distinction. If a student asks why an integral requires substitution, a chatbot may produce a plausible explanation. The proposed platform should first identify the active concept, check whether the learner has recently failed prerequisite tasks, decide whether a symbolic explanation or visual transformation is more appropriate, generate bounded support, and then record whether the next student action improved. The answer is only one part of the learning event.

From a system perspective, this creates a small but meaningful feedback loop. The answer influences the next student action; the next action updates the learner model; the updated learner model changes the next support decision. Even if the first version of the policy is rule-based, the architecture leaves room for later statistical calibration, mastery estimation, or instructor-defined intervention rules.

A second implication concerns interface design. Students experience intelligence through interaction: where help appears, whether their prior work is preserved, whether feedback is actionable, whether visuals appear at the right moment and whether the system makes the next step visible. For this reason, the interface is treated as part of the tutoring system, not as a skin over AI services.

Literature alignment helps explain why multiple components are necessary. Personalized learning research justifies adaptation beyond content delivery [1], [2]. ITS research justifies domain and learner models [3]-[6]. GenAI studies justify generated explanations and tutoring support [11], [14]-[18], [31]. Feedback studies justify reliability and human oversight [13], [29], [34]. Learner and course modeling studies justify future expansion of the evidence layer [30], [38]. Fig. 4 and Table III summarize how these evidence streams support design decisions.

Risks remain structural, not merely technical. The tutor may hallucinate, over-scaffold, give premature answers, or encourage dependency. The learner model may be too coarse for fine-grained diagnosis. Visual generation may be technically valid but pedagogically weak. Privacy, assessment integrity, accessibility, and cost must be addressed before broad deployment. These risks support presenting the work as a development paper rather than as an effectiveness study.

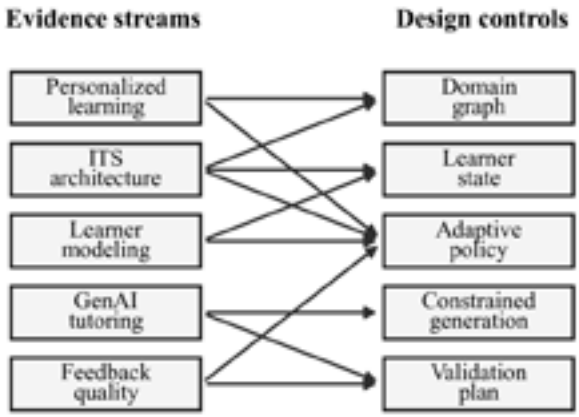


Fig. 4. Literature alignment map showing how evidence streams support platform design decisions.

TABLE III. EDUCATIONAL DESIGN DECISIONS AND LITERATURE SUPPORT

Design decision	Literature-supported rationale
Explicit domain graph	Adaptive systems require inspectable content structure and prerequisite awareness [1], [3], [6].
Separable learner model	Personalization depends on stored evidence rather than isolated prompts [5], [30], [38].
Constrained generation	LLM outputs need context, schemas, feedback controls and validation [14], [18], [24], [31].
Human oversight	Trust-aware and human-in-the-loop feedback reduce unchecked automation risk [29], [34].
Multimodal resources	Visual and interactive artifacts support varied representations in STEM learning [27], [37].
Interface continuity	Learning support must persist across sessions, devices and study actions [4], [33].

VIII. LIMITATIONS, VALIDATION PLAN AND FUTURE WORK

Because classroom validation has not yet been completed, the main limitation is empirical. The current paper documents architecture and development logic, but it does not demonstrate learning gains, retention improvement, or improved motivation. A credible validation plan should begin with technical testing: response validity, schema correctness, rendering failure rates, latency, recovery behavior, and trace quality.

A staged validation plan is important because different failures occur at different layers. Technical testing can reveal broken schemas, rendering errors, latency problems, or missing traces. Expert review can identify mathematical inaccuracies, misleading hints, poor sequencing, or inappropriate difficulty. Usability testing can show whether students understand the interface and whether support appears at the right moment. Learning outcome studies can then examine whether the system changes performance, retention, transfer, or persistence.

A later study should therefore collect both technical and educational traces. Technical traces include failed generations, invalid schemas, render errors, latency, cache reuse, and recovery behavior. Educational traces include topic progression, support frequency, error patterns, hint use, completed practice, revisits, and changes in performance over time. Instructor review can connect both sides by identifying whether a technically valid support action is also mathematically appropriate and pedagogically useful.

This distinction keeps the evaluation honest. A fast system is not necessarily educationally effective, and a pleasant interface does not prove learning. Conversely, a promising learning effect would be difficult to interpret if the system cannot explain which components, prompts, visuals, or feedback actions produced it.

For submission and later extension, this also makes the work more reproducible. Other researchers should be able to inspect the same categories even if they implement them with different software: domain graph, learner evidence, adaptive policy, generation contract, visual-media pipeline, validation layer, and instructor-facing analytics. The specific implementation can evolve, but the paper argues that these categories are necessary if GenAI is to become part of a serious tutoring system rather than a detached conversational add-on.

Expert review should form the second validation layer. Mathematics instructors should evaluate correctness, level alignment, hint quality, visual clarity, and whether each adaptive action is pedagogically appropriate. Student usability testing should then examine navigation, perceived usefulness, cognitive load, help-seeking behavior, and trust in feedback.

Future work should evaluate learning outcomes through pre/post measures, retention tasks, transfer problems, error analysis, and comparison with conventional resources. The technical roadmap is also educational: improve the learner model, expand the item bank, calibrate feedback policies, strengthen scientific-media validation, and provide instructor dashboards for concept bottlenecks, support requests, and cohort-level progress. More broadly, the future of AI in education will likely depend less on isolated prompts and more on durable learner records, course-grounded tools, multimodal representations, teacher-facing analytics, and validation pipelines. Table IV summarizes the validation layers required before effectiveness claims are made.

Beyond evaluation, future development should make the system more explainable to instructors. If an instructor can see which components produce repeated support requests, which representations are most frequently used, and where generated feedback fails, the platform becomes useful not only for individual study but also for course improvement. This connection between learner-facing adaptation and instructor-facing analytics is one of the strongest opportunities for intelligent systems in engineering education.

For engineering education, this matters because instructors often need evidence at two scales. At the individual scale, they need to know whether a learner is blocked by a prerequisite, a procedure, a representation, or a lack of practice. At the course scale, they need to know which concepts repeatedly produce confusion and which forms of support are actually used. A platform that connects adaptive support with instructor analytics can become part of continuous course improvement rather than only a private tutoring tool.

TABLE IV. VALIDATION PLAN AND MEASURES

Validation layer	Evidence required before effectiveness claims
Technical	Schema validity, response failures, render failures, latency, recovery and trace completeness.
Expert review	Mathematical correctness, level alignment, feedback quality and visual clarity.
Student usability	Navigation, perceived usefulness, cognitive load, trust and help-seeking behavior.
Learning outcomes	Pre/post tests, retention, transfer problems, completion and error-pattern analysis.
Instructor analytics	Concept bottlenecks, feedback failures, cohort progress and classroom actionability.

IX. CONCLUSION

Overall, this paper presented the development of a PWA for personalized and adaptive learning in integral calculus. The system is organized around a domain model, learner model, pedagogical adaptation layer, agent-mediated generation services, scientific media pipeline, validation mechanisms, and learner-facing interface. Its contribution is not the claim that AI alone improves learning, but the design of a structured learning environment where AI functions are constrained by course knowledge, learner evidence, and pedagogical decisions. The next step is empirical validation with students and instructors to determine whether this architecture improves continuity, feedback quality, conceptual understanding, and instructor visibility in real educational settings.

REFERENCES

[1] A. Shemshack and J. M. Spector, "A systematic literature review of personalized learning terms," Smart Learning Environments, vol. 7, no. 33, 2020, doi: 10.1186/s40561-020-00140-9.

[2] B. Rodrigues, R. Pinto, and G. Goncalves, "A Systematic Literature Review of AI-Driven Intelligent Tutoring Systems in Engineering Education: Emphasizing Personalization, Feedback, and Student Monitoring," IEEE Access, vol. 13, pp. 190152-190177, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3626473.

[3] D. Li, L. Zhuying, and Y. Bing, "The application of AI technology in Intelligent Tutoring System," in 2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer, 2010, doi: 10.1109/ICETC.2010.5529201.

[4] A. R. Hurson, S. Sedigh, L. Miller, and B. Shirazi, "Enriching STEM education through personalization and teaching collaboration," in 2011 IEEE PERCOM Workshops, 2011, doi: 10.1109/PERCOMW.2011.5766949.

[5] P. Nedungadi and M. S. Remya, "Predicting students' performance on intelligent tutoring system - Personalized clustered BKT (PC-BKT) model," in 2014 IEEE Frontiers in Education Conference, 2014, doi: 10.1109/FIE.2014.7044200.

[6] R. Kokku et al., "Augmenting Classrooms with AI for Personalized Education," in 2018 IEEE ICASSP, 2018, doi: 10.1109/ICASSP.2018.8461812.

[7] T. Nakanishi, "An Inquirer-Responder Architecture Using LLMs: Emulating Virtual Hearing Q&A in Education," in 2023 IEEE WI-IAT, 2023, doi: 10.1109/WI-IAT59888.2023.00088.

[8] O. L. Dos Santos and D. Cury, "Challenging the Confirmation Bias: Using ChatGPT as a Virtual Peer for Peer Instruction in Computer Programming Education," in 2023 IEEE Frontiers in Education Conference, 2023, doi: 10.1109/FIE58773.2023.10343247.

[9] R. Hare, Y. Tang, and C. Zhu, "Combining Gamification and Intelligent Tutoring Systems for Engineering Education," in 2023 IEEE Frontiers in Education Conference, 2023, doi: 10.1109/FIE58773.2023.10343378.

[10] C.-S. Lee et al., "Knowledge Graph-Based Genetic Fuzzy Agent for Human Intelligence and Machine Co-Learning," in 2023 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2023, doi: 10.1109/FUZZ52849.2023.10309699.

[11] X. Wu, H. Wang, Y. Zhang, B. Zou, and H. Hong, "A Tutorial-Generating Method for Autonomous Online Learning," IEEE Transactions on Learning Technologies, 2024, doi: 10.1109/TLT.2024.3390593.

[12] S. Gupta, R. R. Dharamshi, and V. Kakde, "An Impactful and Revolutionized Educational Ecosystem using Generative AI to Assist and Assess the Teaching and Learning benefits," in 2024 ICETITE, 2024, doi: 10.1109/ic-ETITE58242.2024.10493370.

[13] E. Rudolph, H. Seer, C. Mothes, and J. Albrecht, "Automated feedback generation in an intelligent tutoring system for counselor education," 2024, doi: 10.15439/2024F1649.

[14] A. Krouska, C. Troussas, I. Voyiatzis, P. Mylonas, and C. Sgouropoulou, "ChatGPT-based Recommendations for Personalized Content Creation and Instructional Design with a Tailored Prompt Generator," in 2024 FLLM, 2024, doi: 10.1109/FLLM63129.2024.10852487.

[15] A. B. Yosobumi, A. S. D. Martha, and K. A. Laksitowening, "Development of a Pedagogical Agent Utilizing ChatGPT as a Response Mechanism and Scaffolding Method for CSS Learning," in 2024 ICICyTA, 2024, doi: 10.1109/ICICYTA64807.2024.10913323.

[16] S. Vemula, "Enriching Python Programming Education With Generative AI: Leveraging Large Language Models for Personalized Support and Interactive Learning," in 2024 IEEE Frontiers in Education Conference, 2024, doi: 10.1109/FIE61694.2024.10893561.

[17] A. Abid, M. Somai, H. M. Kammoun, and I. Kallel, "The NAJEH Effect: How ChatGPT is Shaping the Future of Higher Education," in 2024 ITHET, 2024, doi: 10.1109/ITHET61869.2024.10837661.

[18] L. Daberao, "A Context-Aware Intelligent Tutoring Framework for Grammar Modeling Using Large Language Models," in 2025 IEEE PICom, 2025, doi: 10.1109/PICom68402.2025.00034.

[19] Q. Lang, M. Wang, M. Yin, S. Liang, and W. Song, "Transforming Education With Generative AI (GAI): Key Insights and Future Prospects," IEEE Transactions on Learning Technologies, 2025, doi: 10.1109/TLT.2025.3537618.

[20] M. Bidry, M. Hanine, A. Ouaguid, and W. J. Obidallah, "Transforming Education With Generative AI: A Comprehensive Review of Advancements, Challenges, and Future Opportunities," IEEE Access, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3636891.

[21] X. Jing, Z. Feng, X. Yang, Z. Wang, and W. Li, "Evolutionary Landscape of Artificial Intelligence in Education: Review and Prospects," in 2025 International Symposium on Educational Technology, 2025, doi: 10.1109/ISET65607.2025.00042.

[22] B. S. Oumaima, B. Abdemadjid, M. Majda, R. Mounira, and M. Derdour, "Examining Intelligent Tutoring Systems and Their AI Underpinnings in the Design of the Future of Learning," in 2025 ICNAS, 2025, doi: 10.1109/ICNAS68168.2025.11298109.

[23] A. Kovari, "AI Gem: Context-Aware Transformer Agents as Digital Twin Tutors for Adaptive Learning," Computers, vol. 14, no. 9, 2025, doi: 10.3390/computers14090367.

[24] T. Suhail and K. Rajakumari, "An Analytical Framework for Personalized and Explainable AI Tutors Using Large Language Models in Digital Education," in 2025 ICECONF, 2025, doi: 10.1109/ICECONF65644.2025.11379461.

[25] R. B. Jerald, S. Elamaran, and R. Umesh, "Comparative Study of Large Language Models for Adaptive AI Tutoring Systems," in 2025 IEEE ICCCA, 2025, doi: 10.1109/ICCCA66364.2025.11325634.

[26] M. Kannangara, C. Rajapakse, D. Asanka, and N. Jayalath, "Development of a Chat Assistant Using Large Language Models for Personalized Mathematics Tutoring to Overcome Educational Disparities in Sri Lanka," in 2025 ICARC, 2025, doi: 10.1109/ICARC64760.2025.10963323.

[27] R. Sajja, Y. Sermet, and I. Demir, "End-to-End Deployment of the Educational AI Hub for Personalized Learning and Engagement: A Case Study on Environmental Science Education," IEEE Access, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3554222.

[28] J. Lee, "GPT-Based Conversational Agents for L2 Speaking Development: A Feedback-Optimized Task Design Framework," in 2025 IEEE Smart World Congress, 2025, doi: 10.1109/SWC65939.2025.00076.

[29] B. Tarun, H. Du, D. Kannan, and E. F. Gehringer, "Human-in-the-Loop Systems for Adaptive Learning Using Generative AI," in 2025 IEEE

Frontiers in Education Conference, 2025, doi: 10.1109/FIE63693.2025.11328658.

[30] T. D. Shukla, S. Manhas, S. K. Sidhu, A. Dhiman, N. Jain, and R. Saravanakumar, "Personalized Learning Pathways using Transformer-based Student Modeling in E-Learning Platforms," in 2025 IC2NC, 2025, doi: 10.1109/IC2NC67409.2025.11376507.

[31] Z. Huang, S. He, and Y. Qiao, "Research and Implementation of Intelligent Tutoring System for AI Education Domain Based on LLM-Powered Agents," in 2025 IEEE IC-NIDC, 2025, doi: 10.1109/IC-NIDC67200.2025.11390477.

[32] S. Huang and Z. He, "Research on Personalized Learning Path Recommendations for Physics Based on Generative AI," in 2025 ICETM, 2025, doi: 10.1109/ICETM67477.2025.11412959.

[33] K. Shah, V. Singh, S. Sonekar, and D. Ambawade, "ReviseSmart: An AI-Powered Personalized Revision Platform," in 2025 IEEE INSPECT, 2025, doi: 10.1109/INSPECT67393.2025.11350596.

[34] X. Meng and Y. Yang, "TAFM: A Trust-Aware Feedback Module for Enhancing Reliability in AI-powered Educational Systems," in 2025 ICMET, 2025, doi: 10.1109/ICMET67594.2025.11452075.

[35] P. Anawade, D. Sharma, S. Gahane, and S. Kadam, "The Impact of AI on Educational Assessment: A Study of Adoption Rates, Performance Metrics and Learning Outcomes," in 2025 IDICAIHEI, 2025, doi: 10.1109/IDICAIHEI65991.2025.11379104.

[36] S. A. Osman, E. Abulibdeh, R. Bashir, and H. K. Sukar, "The Impact of Project-Based Learning Environments Enhanced with Generative AI-Powered Tools on Systemic Thinking in Higher Education," in 2025 GACLM, 2025, doi: 10.1109/GACLM67198.2025.11232407.

[37] M. Babu, E. Subashri, and J. Vincy, "Hybrid AI Framework for Personalized Learning and Student Progress Analysis," in 2026 ICAUC, 2026, doi: 10.1109/ICAUC68182.2026.11441101.

[38] J. Ma, Z. Zhao, Z. Xie, Y. Zhang, and G. Zhou, "LE-DLCM: Decoupled learner and course modeling with large language models for enhanced course recommendation," Knowledge-Based Systems, vol. 334, 2026, doi: 10.1016/j.knosys.2025.115135.

[39] K. Raveendran et al., "RAG SLIITbot: Sri Lankan Universities Develop AI Tutor Tailored to Unique Teaching Styles," in 2025 IEEE ICIIS, 2026, doi: 10.1109/ICIIS69028.2026.11450883.

Desarrollo de una bebida fermentada a partir del mesocarpio del copoazú (*Theobroma grandiflorum)* utilizando kéfir de agua como fuente de microorganismos con potencial probiótico

Valentina Betancourth Sotto
Universidad de la Amazonia
Florencia-Caquetá, Colombia
v.betancourth@udla.edu.co

Daniela del Pilar Mosquera Quigua
Universidad de la Amazonia
Florencia-Caquetá, Colombia
d.mossquera@udla.edu.co

Delia Magaly Bedoya
Universidad de la Amazonia
Florencia-Caquetá, Colombia
d.bedoya@udla.edu.co

***Resumen*—Este studio propone el Desarrollo de una bebida fermentada functional elaborada a partir del mesocarpio de copoazú, una parte de esta fruta amazónica que actualmente se encuentra subutilizada a pesar de su alto contenido de fibra y antioxidants. La investigación aborda la necesidad de valorizar materiales con potencial nutricional que no se están aprovechando plenamente, contribuyendo a los enfoques de sostenibilidad, bioeconomía y economía circular mediante la reincorporación de esta biomasa en la creación de un product de valor agregado.**

La propuesta se basa en la fermentación del mesocarpio utilizando kefir de agua como Fuente de microorganismos con potencial probiótico, con el objetivo de obtener una bebida con propiedades funcionales. Para ello, se diseñaron tres formulaciones con diferentes proporciones de mesocarpio y mucílago, junto con agua y sacarosa, las cuales se someterán a fermentación en condiciones controladas. Posteriormente, se evaluará su aceptabilidad mediante un análisis sensorial con un panel de consumidores no entrenados, considerando atributos como el color, el aroma y el sabor.

La formulación con mayor aceptabilidad se analizará mediante pruebas fisicoquímicas, que incluyen pH, contenido de alcohol, actividad antioxidante, sólidos solubles (°Brix), acidez titulable y recuento de microorganismos fermentativos. El objetivo es desarrollar una bebida innovadora, sensorialmente acceptable y de valor agregado que demuestre potencial del mesocarpio como materia prima para el Desarrollo de alimentos funcionales, en línea con la creciente demanda de productos saludables y sostenibles.

Además, en colaboración con la asociación AYAKUNÁ, ubicada en Belén de los Andaquíes, el Proyecto busca promover un modelo de uso responsible de los recursos amazónicos que fortalezca las cadenas agroalimentarias locales, foment eel empoderamiento de las mujeres y contribuya al desarrollo sostenible en regions productoras como Caquetá, impulsando el aprovechamiento integral del copoazú con potencial agroindustrial.

Palabras clave: Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum),* fermentación, valorización de subproductos.

I. Introducción

El copoazú o cupuazú (*Theobroma grandiflorum)* es un fruto tropical amazónico reconocido por su contenido de compuestos bioactivos, fibra y capacidad antioxidante [1,3]. Durante su procesamiento se generan subproductos poco aprovechados, entre ellos el mesocarpio, considerando que la cáscara (epicarpio y mesocarpio) representa aproximadamente el 53% del peso total del fruto, lo que evidencia su potencial para estrategias de valorización y aprovechamiento agroindustrial.[2] Las bebidas fermentadas constituyen una alternativa para la valorización de materias primas de origen vegetal debido a que la fermentación puede mejorar características fisicoquímicas y sensoriales del producto final. En este contexto, el kéfir de agua es un cultivo fermentativo compuesto por bacterias y levaduras capaces de transformar azúcares en diversos metabolitos de interés tecnológico y funcional [4].

Por lo anterior, este trabajo propone desarrollar una bebida fermentada a partir del mesocarpio del copoazú utilizando kéfir de agua como cultivo fermentativo, con el fin de valorizar este subproducto amazónico, aprovechando su contenido de fibra y compuestos bioactivos antioxidantes [2,3] para transformarlo en un producto con valor agregado. De esta manera, la investigación contribuye al aprovechamiento sostenible de recursos regionales y a la generación de alternativas alimentarias innovadoras basadas en frutas amazónicas.

II. Metodología

El presente proyecto de investigación es de tipo aplicado y enfoque experimental, ya que busca aprovechar el mesocarpio del copoazú (Theobroma grandiflorum) mediante el desarrollo de una bebida fermentada utilizando kéfir de agua. Con ello, se pretende generar valor agregado a este subproducto amazónico

y promover su aprovechamiento sostenible a través de la elaboración de un alimento funcional.

a) Recepción, selección y acondicionamiento de materia prima

Las partes deseadas del Copoazú (mesocarpio) fueron adquiridas en la empresa AYAKUNÁ ubicada en el municipio de Belén de los Andaquíes, mediante un muestreo simple, tomando un total de 4 kg de alícuota la cual debe ser seleccionada bajo estricta inspección teniendo en cuenta el estado de madurez del fruto y el proceso de limpieza y desinfección aplicado. Posteriormente, la materia prima fue sometida a congelación hasta la realización de los análisis y su posterior transformación.

b. Análisis fisicoquímicos del mesocarpio de copoazú (Theobroma grandiflorum)

El estudio se desarrolló bajo un diseño completamente al azar con tres tratamientos: mesocarpio, mucílago y una mezcla de ambos, cada tratamiento se preparará con un volumen de 200 mL y fermentado con kéfir de agua bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo.

Se evaluaron variables fisicoquímicas como pH, sólidos solubles (°Brix) e índice de refracción, así como atributos de color y aceptabilidad sensorial, todas las muestras fueron procesadas bajo las mismas condiciones, garantizando que las diferencias observadas correspondieran únicamente al efecto de los tratamientos.

c. *Formulación de la bebida fermentada*

Se plantearon tres formulaciones para la obtención de bebidas fermentadas de 200 mL, diferenciadas por la proporción de mesocarpio y mucílago del Copoazú. La primera formulación contenía mesocarpio como fuente principal, la segunda empleó mucílago y la tercera correspondió a una mezcla de ambos componentes, en todos los casos se mantuvieron constantes el volumen total, la proporción de kéfir y las condiciones de fermentación, con el fin de evaluar el efecto del tipo de sustrato sobre las características del producto final, la variación en el contenido de sacarosa se estableció como un ajuste preliminar para favorecer el proceso fermentativo y la aceptabilidad sensorial en cada formulación. Las proporciones específicas de cada tratamiento se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. *Formulación de bebidas fermentadas de copoazú (Theobroma grandiflorum)*

Componente	F1	F2	F3
Agua (%)	57.02	57.02	57.02
Sacarosa (%)	7.89	7.02	7.46
Mesocarpio (%)	26.32	0.00	13.15
Mucílago (%)	0.00	26.32	13.15
Kéfir (%)	8.77	8.77	8.77

Fuente: Elaboración propia

Nota: Los valores se expresan en porcentaje (%p/v) respect al volume total de la formulación)

d. Evaluación de aceptabilidad

Para dar cumplimiento a este objetivo, se diseñó y validó una escala hedónica de 5 puntos, en la cual se evaluaron atributos como color, olor y sabor.

Se contó con un panel no entrenado conformado por 50 participantes (25 hombres y 25 mujeres), quienes fueron previamente seleccionados bajo criterios establecidos. Durante la sesión de evaluación, los panelistas valoraron las tres formulaciones utilizando una escala que va desde “me disgusta mucho” (1) hasta “me gusta mucho” (5), los datos obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva y comparativa, con el fin de determinar el nivel de aceptabilidad de cada formulación.

Determinación del contenido de alcohol.

El contenido alcohólico será determinado conforme a la norma NTC 5113, mediante método por destilación y posterior determinación densimétrica a 20°C.

Determinación de pH

Se tomó una pequeña cantidad de la bebida y se sumergió en el electrodo de un potenciómetro a temperatura ambiente. Las medidas se realizaron por triplicado.

Determinación del índice de refracción

Se evaluó el índice de refracción según su método para etanol puro n_D = 1,3611 a una temperatura de 20°C utilizando la línea D del sodio.

III. Resultados Preliminares y Discusión

Como parte de la fase inicial del proyecto, se realizó la recepción y selección de la materia prima obtenida en alianza con la asociación AYAKUNÁ, ubicada en Belén de los Andaquíes, durante esta etapa se llevó a cabo el reconocimiento del copoazú y el acondicionamiento de las muestras destinadas al desarrollo de las formulaciones.



Ilustración 1. *Frutos de copoazú utilizados como materia prima*



Ilustración 2. Visita a la asociación AYAKUNÁ en Belén de los Andaquíes-Caquetá

Se desarrollaron tres formulaciones de bebidas fermentadas a partir del mesocarpio y mucílago del copoazú utilizando kéfir de agua como agente fermentativo. Durante el proceso se observaron diferencias en apariencia y aroma entre los tratamientos evaluados. Las formulaciones con mayor contenido de mesocarpio presentaron mayor estabilidad física y homogeneidad visual durante el proceso fermentativo, mientras que las elaboradas con mucílago mostraron una textura más líquida y mayor producción de gas durante la fermentación. La mezcla de mesocarpio y mucílago evidenció características intermedias y un equilibrio favorable entre color, olor y textura, siendo seleccionada para continuar con las siguientes etapas de evaluación.

Tabla 2. *Determinación de apariencia en las formulaciones*

Formulación	Composición principal	Apariencia	Textura	Aroma
F1	Mesocarpio	Homogénea	Densa	Característico del copoazú
F2	Mucílago	Translúcida	Líquida	Ácido-dulce
F3	Mezcla (mesocarpio/mucílago)	Uniforme	Intermedia	Equilibrado

Fuente: Elaboración propia

La formulación F3, compuesta por una mezcla de mesocarpio y mucílago, presentó las características más favorables entre los tratamientos evaluados. Durante el proceso fermentativo se observó una adecuada estabilidad física, una textura intermedia y un aroma equilibrado, lo cual permitieron seleccionarla para continuar con las etapas de evaluación sensorial y caracterización fisicoquímicas.

En las pruebas preliminares de evaluación sensorial se realizaron utilizando una escala hedónica de 5 puntos para valorar atributos relacionados con color, olor y sabor de las formulaciones fermentadas elaboradas. Las formulaciones con mezcla de mesocarpio y mucílago evidenciaron una percepción más equilibrada en términos de aroma y aceptabilidad general.



Ilustración 3*. Comparación de parámetros sensoriales*

Continuamente se realizaron análisis fisicoquímicos a la formulación seleccionada, entre las pruebas efectuadas se incluyeron la determinación de contenido de alcohol, pH e índice de refracción.

El contenido de alcohol de las muestras fermentadas fue evaluado mediante alcoholímetro, siguiendo los lineamientos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 5113, en las cuales se realizaron dos muestras correspondientes a diferentes tiempos de fermentación, la primera con 48 horas de fermentación controlada y la segunda con una fermentación más reciente.

Los resultados obtenidos indicaron que ninguna de las muestras presento contenido alcohólico detectable mediante el método utilizado, registrando valores de <1% **v/v** en ambos casos.



Ilustración 4. *Diferencia en colorimetría debido a los tiempos de fermentación*



Ilustración 6*. Determinación mediante alcoholímetro (24-48 horas de fermentación)*

En los análisis del pH se realizaron mediante potenciómetro digital, en las cuales podemos observar que las dos muestras obtuvieron un valor de pH igual, siendo este de pH 3,8.

Los valores obtenidos evidencian una adecuada acidificación del producto como consecuencia de la producción de ácidos orgánicos por parte de bacterias ácido-lácticas y levaduras durante la fermentación.



Ilustración 7. pH observado en potenciometro

Como análisis complementario se evaluó el índice de refracción de las muestras fermentadas. La muestra con mayor tiempo de fermentación presentó un índice de refracción de

1,350, mientras que la muestra de menor tiempo de fermentación registró un valor de 1,344.

La diferencia observada entre las muestras puede relacionarse con cambios en la concentración de sólidos solubles ocasionados por el proceso fermentativo y el consumo de azúcares por parte de los microorganismos presentes en el cultivo de kéfir.

***Tabla 3**. Resultados fisicoquímicos*

Formulación	pH	Índice de refracción (nD)	Alcohol (%)
F1	3.81	1.350	< 1%
F2	3.81	1.344	< 1%
F3	3.82	1.350	< 1%

***Fuente**: Elaboración propia*

Nota: Las formulaciones presentaron valores de pH similares después de 24 h de fermentación, evidenciando un comportamiento homogéneo. Asimismo, el índice de refracción mostró ligeras variaciones entre tratamientos, asociadas al contenido de sólidos solubles presentes en cada formulación. El contenido de alcohol fue bajo, característica asociada a bebidas fermentadas bajo condiciones cortas de fermentación

IV. Conclusiones

El desarrollo de una bebida fermentada a partir del mesocarpio del copoazú (*Theobroma grandiflorum*) permitió evidenciar el potencial de este subproducto amazónico como materia prima para la elaboración de alimentos funcionales con valor agregado, la fermentación utilizando kéfir de agua demostró ser una alternativa viable para obtener una bebida con características fisicoquímicas y sensoriales favorables, además de aportar microorganismos con potencial probiótico y compuestos bioactivos que pueden contribuir a las propiedades funcionales del producto final. Asimismo, el estudio permitió reconocer la importancia del aprovechamiento integral del copoazú como estrategia de sostenibilidad y valorización de recursos amazónicos.

Las diferentes formulaciones evaluadas presentaron variaciones en atributos como apariencia, aroma, textura y aceptabilidad general durante el proceso fermentativo. La formulación compuesta por la mezcla de mesocarpio y mucílago mostró un mejor equilibrio sensorial y mayor aceptación preliminar frente a los demás tratamientos, convirtiéndose en la alternativa más adecuada para continuar con los análisis posteriores. Finalmente, este proyecto contribuye al fortalecimiento de iniciativas de bioeconomía y desarrollo regional en el departamento del Caquetá, promoviendo el aprovechamiento responsable de materias primas amazónicas en alianza con la asociación AYAKUNÁ.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a la Universidad de la Amazonia por brindarnos los espacios académicos, científicos y formativos necesarios para el desarrollo de este proyecto de investigación, permitiéndonos fortalecer nuestros conocimientos y capacidades investigativas.

Agradecemos especialmente a la Mg. Delia Magaly Bedoya Páez por su apoyo, orientación y acompañamiento constante durante el desarrollo de nuestra investigación. Su disposición, dedicación y seguimiento fueron fundamentales para el cumplimiento de cada una de las etapas del proyecto y para motivarnos a desarrollar este trabajo con compromiso y responsabilidad.

De igual manera, expresamos nuestro agradecimiento al semillero de investigación INTECA por brindarnos la oportunidad de participar en procesos investigativos, fortalecer nuestros conocimientos en el área de fermentaciones y desarrollo de productos innovadores, así como fomentar el trabajo en equipo y el crecimiento académico y profesional.

Referencias

[1] "Copoazú (Theobroma grandiflorum): A brief review on chemical and technological potential of this Amazonian fruit." *Food Chemistry: Molecular Sciences.*

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772753X24001436?via%3Dihub

[2] "Análisis de la actividad antioxidante durante el proceso de producción del néctar de copoazú." Revista Alfa, 9(26):435-449.
https://revistaalfa.org/index.php/revistaalfa/article/view/482

[3] "Theobroma genus: Exploring the therapeutic potential of T. grandiflorum and T. bicolor in biomedicine." Food Bioscience, 61.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429224011854?via%3Dihub

[4] "Caracterización microbiológica y química del kéfir de agua: una fuente innovadora de potenciales probióticos para la nutrición de las abejas." Revista Argentina de Microbiología, 55(2).
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0325754122000839?via%3Dihub

Uso de biomasa residual de café (*Coffea arabica*) proveniente de la Asociación de Mujeres Amucapa (Caquetá) para la obtención de una bebida aromática

Diana Marcela Ballesteros Sánchez
Universidad de la Amazonia
Florencia, Colombia
di.ballesteros@udla.edu.co

Paula Andrea Yoja Barreto
Universidad de la Amazonia
Florencia, Colombia
p.yoja@udla.edu.co

Delia Magaly Bedoya
Universidad de la Amazonia
Florencia, Colombia
d.bedoya@udla.edu.co

Paola Andrea García Rincón
Universidad de la Amazonia
Florencia, Colombia
Pgarcia@uniamazonia.edu.co

***Resumen*— Este estudio se realizó en el departamento de Caquetá con la asociación de mujeres AMUCAPA, con el objetivo de aprovechar la biomasa residual generada por la producción de café, especialmente la pulpa y las cáscaras, que generalmente se desechan y pueden tener impactos ambientales. Como alternativa de valorización, se propuso el desarrollo de una bebida aromática utilizando estos subproductos agroindustriales, combinándolos con cáscara de mango y cáscara de plátano, buscando crear un producto con potencial funcional y valor agregado para la comunidad.**

La metodología empleada tuvo un enfoque experimental e incluyó análisis fisicoquímicos de acidez titulable, sólidos solubles totales (°Brix), actividad de agua y contenido de humedad, así como la determinación de la formulación con la mejor capacidad de extracción y características sensoriales.

Los parámetros fisicoquímicos analizados mostraron que el proceso de secado redujo significativamente la actividad de agua y el contenido de humedad de las muestras, mejorando su estabilidad y conservación. Además, los valores de acidez y sólidos solubles totales (°Brix) mostraron la presencia de compuestos que aportan características sensoriales importantes a la bebida aromática.

En conclusión, el aprovechamiento de los residuos agroindustriales del café representa una alternativa viable para reducir el impacto ambiental y generar nuevas oportunidades de valor añadido en las comunidades rurales.

Palabras clave: pulpa de café, bebida aromática, residuos agroindustriales, valor añadido, análisis fisicoquímico.

I. Introducción

La biomasa residual en la industria agroalimentaria hace referencia a los residuos orgánicos generados durante la producción, procesamiento o transformación de alimentos, que pueden ser aprovechados para fines energéticos, agrícolas o industriales [1]. Anualmente se producen más de tres mil millones de toneladas de residuos, donde aproximadamente 240 mil toneladas se dan por cacao [2] [3] y 50 mil toneladas de café [4]. Dentro de los productos agrícolas de mayor importancia en la bioeconomía circular, se destaca el café por su importancia social y cultural generando valor económico tanto en Colombia como en otros países [5].

En Colombia 22 de los 32 departamentos cultivan café (974 mil hectáreas), con fines comerciales, siendo proporcional la producción de residuos [6], los cuales sin un uso adecuado pueden llegar a contaminar fuentes hídricas e incluso suelos; mediante el cambio del pH y convirtiéndose en sustrato óptimo para microorganismos alterantes o deteriorantes siendo fuentes de contaminación para otros cultivos agrícolas [7]. La baya del café ha sido considerada como alimento funcional dado que contiene componentes bioactivos como polifenoles, ácidos clorogénicos, posee un efecto diurético, y ha mencionado actividades neurológicas [8].

De otro lado, la pulpa es de interés nutricional y funcional por su composición química (3% de cafeína y 1,5 - 4 % de compuestos bioactivos), siendo una materia prima valorada por sus propiedades antioxidantes [9]. Así mismo, la cáscara como biomasa residual conserva muchos componentes funcionales (antioxidantes, fibra dietética, ácido fólico), que se pueden utilizar para el desarrollo de otros productos [10]; producto tales como té, bebidas energizantes, tortas, cerveza, kombucha [11].

En el departamento del Caquetá, se encuentra cultivado 3271 hectáreas de café de café, y existe 16 asociaciones de café según la Gobernación del Caquetá [12]. La asociación de mujeres emprendedoras AMUCAPA han liderado iniciativas dirigidas al aprovechamiento integral del café como fuente de desarrollo económico y social en la región, principalmente con la producción y distribución de café y con otros productos a base de la misma materia prima, elaborados de manera empírica. En relación con lo anterior, la biomasa residual preexiste como un problema ambiental, el cual se ha convertido mediante este proyecto en un reto productivo.

Es así como, surge la idea de apoyar el gremio mediante la propuesta de generación de un producto mediante el residuo del café; el propósito de esta investigación es evaluar el uso de la biomasa residual de café (*Coffea arábica)* que proviene de la asociación AMUCAPA, para la obtención de un producto aromático, identificando las condiciones óptimas del procesamiento en la conservación de las características de mayor relevancia, determinando la capacidad antioxidante, así como la aceptabilidad de los productos aromáticos formulados.

II. METODOLOGÍA

El presente proyecto de investigación es de tipo aplicado, con un enfoque experimental, ya que busca transformar un residuo y generar un valor agregado por medio del desarrollo de un producto aromático a base de la biomasa residual del café *(Coffea arabica)*.

a. Obtención de la materia prima

La biomasa recial de café utilizada en el estudio fue obtenida por la Asociación de mujeres AMUCAPA, ubicada en el departamento del Caquetá. Adicionalmente Se emplearon Cáscara de píldoro (Musa acuminata) y cáscara de mango (Mangifera indica L.). Utilizadas como ingredientes complementarios en la formulación de la bebida aromática.

Las materias primas fueron seleccionadas, limpiadas y clasificadas en muestras frescas y muestras secas para la realización de los análisis fisicoquímicos correspondientes.

b. Formulación de la bebida aromática

Para la elaboración de la bebida aromática se diseñaron 3 formulaciones experimentales, variando proporciones de biomasa residual de café, cáscara de píldoro y cáscara de mango, como se observa en la Tabla 1.

TABLA 1: Formulación para la aromática

	Formulaciones		
Ingredientes	**Formulación 1**	**Formulación 2**	**Formulación 3**
Cáscara de café *(Coffea Arrabica)*	50%	60%	70%
Cáscara de píldoro *(Musa Acuminata)*	25%	20%	15%
Cáscara de mango *(Mangifera indica L.)*	25%	20%	15%
TOTAL	100%	100%	100%

c. Preparación de la muestra

Los ingredientes fueron triturados, homogenizados para obtener mezclas uniformes. Los análisis fisicoquímicos se realizaron tanto en muestras de cáscaras frescas como en muestras de cáscaras secas.

Cada análisis se realizó por triplicado. Para las muestras individuales se utilizó 1 gramo de cada cáscara. En el caso de la mezcla se preparó utilizando proporciones iguales de las 3 cáscaras, empleando 0.33 gramos de cada una hasta completar 1 gramo de muestra.

d. Análisis fisicoquímicos

Determinación de actividad de agua (aw)

Se determina mediante el equipo AQUALAB 4TE, utilizando aproximadamente 1 gramo de muestra homogenizada. Este análisis permitió evaluar la disponibilidad de agua libre y la calidad microbiológica de las muestras frescas y secas.

Determinación del % de humedad

El porcentaje de humedad se determinó mediante una termobalanza, utilizando 1 gramo de muestra. Las muestras fueron sometidas al proceso de secado hasta obtener peso constante y posteriormente se registró el porcentaje de humedad correspondiente.

Determinación de pH

El pH a las muestras se determinó utilizando un potenciómetro previamente calibrado. Se empleó 1 gramo de cáscara, el cual fue diluido en 100 ml de agua estilada y posteriormente homogeneizado. Luego se realizó la medición directa del pH registrando los valores obtenidos para cada tratamiento y cada retención analizada.

Determinación de sólidos solubles totales (ºBrix)

La determinación de sólido solubles totales se realizó mediante un refractómetro de marca MILWAUKEE MA884, expresando los resultados en ºBrix. Para el análisis se tomó 1 gramo de la muestra y si diluyo en 10 ml de agua destilada, obteniendo una mezcla homogénea. Posteriormente, se colocó una pequeña cantidad de la muestra preparada sobre el prisma del refractómetro y se actúa la lectura correspondiente. Este análisis permitió determinar el contenido de azúcares y compuestos solubles presentes en las muestras frescas y secas evaluadas.

Determinación de acidez

La acidez titulable se determinó mediante el método de titulación ácido-base utilizando hidróxido de sodio (NaoH) como solución titulante. Para el análisis, se tomarán 10 ml de la muestra previamente preparada y se colocaron en un Erlenmeyer. Posteriormente se adicionaron dos gotas de fenolftaleína como indicador.

La titulación se realizó con solución de NaoH estándar hasta observar un cambio de cloración ligeramente rosado indicando el punto final de la reacción. El volumen NaoH gastado fue registrado para cada muestra y los resultados obtenidos fueron expresados como porcentajes de acidez. Este procedimiento se realizó por triplicado para garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos.

e. Preparación de la bebida aromática

Para la preparación de la bebida aromática se utilizaron bolsas filtrantes individuales con un contenido total de 1 gramo de mezcla, de acuerdo con las formulaciones establecidas para cada tratamiento. Posteriormente, cada bolsa de aromática fue adicionada en 100 ml de agua caliente a una temperatura de 90º C.

Las infusiones se dejaron en reposo durante 3 minutos Para determinar la extracción de compuestos aromáticos, Sabor y color característicos de las materias primas utilizadas. Finalmente, las formulaciones obtenidas fueron evaluadas con el fin de determinar cuál presentan mejores características para su posible aprovechamiento como bebida aromática.

f. Determinación de compuestos bioactivos

La determinación de compuestos de bioactivos se realizará en las muestras de cáscaras frescas, cáscaras secas y mezclas formuladas para la bebida aromática. Para ello, las muestras serán previamente trituradas y homogeneizadas. Posteriormente, se tomará 1 gramo de la muestra y se efectuará una extracción acuosa utilizando agua estilada.

Los extractos obtenidos serán analizados mediante métodos espectrofotometría empleando un espectrofotómetro, con el fin de evaluar la presencia de compuestos bioactivos y su potencial antioxidante. Cada análisis se realizará por triplicado para garantizar la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados.

III. Resultados Preliminares y Discusión

Los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de café (*Coffea Arabica),* banano píldoro *(Musa Acuminata),* mango *(Mangifera indica L.)* y la mezcla de estos, permitieron determinar propiedades relevantes como actividad de agua (aw), % de humedad, acidez titulable, pH y solidos solubles totales (°Brix).

En la determinación de aw, la muestra de cáscara de mango se obtuvo el valor más alto en muestra fresca (0,980 ± 0,0010), lo que indica que hay mayor cantidad de agua libre. Por otro lado, la cáscara de café resultó siendo el valor más bajo (0,965 ± 0,0007). En las muestras secas estos disminuyeron, también se obtuvo el valor de la cáscara de mango como el más bajo siendo (0,488±0,051), lo que demuestra una reducción significativa de agua después del secado.

En cuanto al valor de humedad, la cáscara de mango reportó un alto contenido con un 80%, seguido por el mix de las cáscaras con un 72%, mientras que la cáscara de café mostró el menor porcentaje de humedad con un 60%, señalando menor retención de agua. [13], la humedad influye directamente con la actividad de agua presente en los subproductos del café. Mientras que [14] reporta que las cáscaras de mango tienen una alta capacidad de retención de agua y de compuestos solubles presentes. [15] hallaron diferencias significativas en los análisis fisicoquímicos de la cáscara del banano píldoro, lo que está relacionado con la humedad y degradación.

En la acidez titulable la cáscara con mayor porcentaje de acidez fue la de café con 0,3456, seguido del mix de cáscaras con 0,2688, luego la cáscara de mango con 0,02133333 y el valor más bajo fue de 0,0128, manteniendo así un equilibrio entre las materias primas implementadas.

En los sólidos solubles totales (°Brix), la cáscara del banano píldoro, señaló el valor más alto con un 17,333 °Brix, seguido de la cáscara del mix formulado con 17°brix. La cáscara de café presentó un menor contenido de sólidos solubles con 11,666°Brix, lo que sugiere diferencias en la concentración de azúcares y compuestos solubles de cada muestra.

Las formulaciones de bebida aromática preparadas en bolsas filtrantes, con 1g de muestra, con 100 ml de agua destilada a 90 °C permitieron una extracción óptima en sabor, color y aroma, pasados 3 minutos en reposo, se observó diferencia de acuerdo con la proporción de cada formulación.

En la formulación de 50% cáscara de café, 25% cáscara de píldoro y 25% cáscara de mango, resultó con mejores características sensoriales, destacando su aroma persistente, sabor agradable y color estable.

Con base en la metodología propuesta, se espera evidenciar una presencia significativa de compuestos bioactivos y actividad antioxidante, en las muestras frescas y secas en la mezcla formulada para el producto aromático. Se proyecta que las cáscaras secas obtengan un mayor contenido de compuestos, por su reducción de actividad de agua, en el secado, lo que contribuye a la concentración de metabolitos antioxidantes.

También se espera obtener un alto contenido de antioxidantes en la cáscara de café, debido a los compuestos fenólicos ácidos clorogénicos reportados en la literatura. Por otro lado, la cáscara de mango y banano píldoro aporten compuestos bioactivos y otros antioxidantes naturales. En el mix formulado se espera observar un balance entre las materias primas, de manera que se contribuya al potencial antioxidante del producto aromático.

A continuación, se presentan los datos agrupados obtenidos previamente para determinar de manera eficaz las características fisicoquímicas de cada materia prima y del mix, lo que demuestra un balance entre ellas, de acuerdo con las propiedades analizadas. La Fig. 1. muestra el diagrama de proceso de la producción.

TABLA 2. DATOS AGRUPADOS

	Cáscara fresca	Cáscara seca	Cáscara fresca	Cáscara seca	Cáscara fresca	Cáscara seca	Cáscara fresca	Cáscara seca
mx	***aw***	***aw***	***%humedad***	***%humedad***	***acidez***	***acidez***	***brix***	***brix***
Cm	0,980 ± 0,0010	0,49±0,051	80	4,14	0,021	0,021	14,333	6,8
Cp	0,975 ± 0,0015	0,662±0,003	75	11,26	0,012	0,008	17,333	6,1
Cc	0,965 ± 0,0007	0,660±0,005	60	9,76	0,345	0,044	11,666	8,4
Mix	0,973 ± 0,0001	0,616±0,001	72	8,16	0,268	0,027	N/A	N/A

*Cm corresponde al promedio de la cáscara de mango, obtenido de las variables analizadas. En la segunda fila de la primera columna Cp es el promedio obtenido de los análisis realizados, cuya fila refleja los datos recopilados. Cc es la cáscara de café y sus respectivos datos, el Mix hace referencia a la mezcla de las tres materias primas descritas previamente, ya que también se analizaron los parámetros evaluados con la mezcla en conjunto. En el encabezado superior de cada columna se encuentra la variable evaluada de cada muestra.



Fig. 1. Diagrama del proceso de obtención del producto aromático.

IV. CONCLUSIONES

Los análisis fisicoquímicos realizados a las cáscaras de mango, banano píldoro, café y el mix formulado a base las cáscaras, permitieron señalar las diferencias significativas en los parámetros evaluados, aw, humedad, acidez titulable y sólidos solubles totales. En donde las cáscaras de mango y banano píldoro mostraron mayor contenido de agua y azucares, mientras que la cáscara de café destacó por su acidez y menor % de humedad, el mix reveló valores intermedios, con un balance entre las materias primas, lo que sugiere una interacción acorde. Por ende, esta alternativa presenta un alto potencial para el aprovechamiento de cáscaras agroindustriales como materias primas en el desarrollo de productos innovadores, contribuyendo a la valorización y aprovechamiento sostenible de los residuos agroindustriales.

V. AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos al programa de Ingeniería de Alimentos, a la Universidad de la Amazonia y a Vicerrectoría de Investigaciones por brindarnos los espacios de laboratorio y los recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación, permitiendo fortalecer nuestros conocimientos y habilidades en el área investigativa.

De igual manera, agradecemos a la Asociación de Mujeres AMUCAPA del Paujil-Caquetá por su colaboración, disposición y aporte la biomasa regresión en el café utilizada en ese proyecto, así como por su compromiso en el aprovechamiento sostenible de los recursos agroindustriales de la región.

REFERENCIAS

[1] Pérez-Rodríguez, C. P., Ríos, L. A., González, C. S. D., Montaña, A., & García-Marroquín, C. (2022). Harnessing Residual Biomass as a Renewable Energy Source in Colombia: A Potential Gasification Scenario. *Sustainability*, *14*(19), 12537.

[2] Castro-Mur, D., Guerrero-Cerón, D., & Yepes-Maya, D. (2023). *Valoración energética de la biomasa residual para una economía circular en sectores agrícolas estratégicos de la región Pacífico colombiana*. Centro de Desarrollo Tecnológico CREATIC; Universidad del Cauca; Universidad Federal de Itajubá.

[3] Cruz Riaño, L. J., Martínez Tejada, H. V., Jaramillo Moreno, J. I., Quintero-Martínez, Y., Castaño, D. A., Cauche Mojica, S., & Rendón, A. (s.f.). *NANOMOF - Colombia. Desarrollo de bioproductos de valor agregado a partir de residuos de biomasa cacaotera*. Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales (GINUMA).

[4] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023). *Con residuos de café se obtiene compuesto clave para obtener biocombustibles*. Agronet.

[5] Rodríguez-Valencia, N. (2023). Aplicación de la bioeconomía circular en el proceso de beneficio de café con cero residuos: Cenicafé cenbook-0032

[6] De la Cruz Tobón Arroyave, N., Cárdenas, A. F. C., & Giraldo, L. F. G. (2015). Análisis y modelamiento de la granulometría en la cáscara del café (Coffea arabica L.) variedad Castillo. Producción + Limpia, 10(2), 80-91.

[7] Fernández-Cortés, Y., Sotto-Rodríguez, K. D., & Vargas-Marín, L. A. (2020). *Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados*. *Producción + Limpia, 15*(1),

[8] Atenas Rodríguez, (2022). Compuestos bioactivos en el café, una razón para seguir consumiéndolo

[9] Murthy, P. S., & Naidu, M. M. (2010). Recovery of Phenolic Antioxidants and Functional Compounds from Coffee Industry By-Products. Food and Biprocess Technology, 5(3), 897–903

[10] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). Encuentran en la cáscara del café compuestos con gran potencial para la industria agroalimentaria. Agronet.

[11] Jiménez Sánchez et al. (2022). Obtención de celulosa bacteriana a base de kombucha por sustitución de té negro por té de cáscara de café. Revista Ingeniería Química y Desarrollo, Vol. 4, Nº 1, pp. 21–32

[12] Gobernación del Caquetá. (2024). Plan departamental de extensión agropecuaria y forestal del Caquetá.

[13] Osorio, V., Pabón, J., & Gómez, C. R. (2024). *Efecto del porcentaje de humedad del café en la actividad de agua*. Revista Cenicafé, 75(1), e75104.

[14] Marsiglia-Fuentes, R., Chiralt, A., & García-Zapateiro, L. A. (2023). Investigating the Water Relations in Aqueous Extract Powders of Mango (Mangifera indica) Peel and Seed Waste for Their Use in Food Matrices as a Value-Added By-Product. Foods, 12(18), 3497.

[15] El Barnossi, A., Moussaid, F., Iraqi Housseini, A., et al. (2023). Physico-chemical characterization of decomposing banana, pomegranate and mandarin peels in water and soil for a sustainable valorization. Industrial Crops and Products, 193, 116207.

Evaluación Multitemporal de la Deforestación y Transición de Uso del Suelo en la Cuenca Quebrada La Zorra, Armero (2015-2024)

Angie Lorena Guerrero Rubio
Universidad del Tolima
Ibagué, Colombia
alguerreror@ut.edu.co

Resumen-La transformación de las coberturas forestales representa uno de los principales desafíos ambientales en regiones tropicales, especialmente en territorios donde la presión antrópica ha intensificado los procesos de deforestación y cambio de uso del suelo. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la dinámica de deforestación, las transiciones de uso del suelo y el estado de fragmentación ecológica en la cuenca de la quebrada La Zorra, ubicada en el municipio de Armero-Guayabal (Tolima, Colombia), durante el periodo 2015–2024, en comparación con la tendencia general observada a escala municipal.

Para ello, se realizó un análisis multitemporal a partir de imágenes satelitales de 10 m de resolución espacial, integrando clasificación binaria de coberturas, matrices de transición, análisis de fragmentación del paisaje y evaluación del vigor de la vegetación mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Los resultados evidenciaron una pérdida de cobertura forestal de 677.88 ha en la cuenca, equivalente al 9.0% de la deforestación total registrada en el municipio de Armero, lo que la posiciona como un foco relevante de presión ambiental. En contraste, la ganancia de bosque fue mínima (0.71 ha), reflejando un marcado desequilibrio entre pérdida y regeneración. La principal transición de uso del suelo correspondió a pastizales (78.72%), seguida por suelo desnudo (20.19%) y, en menor proporción, cobertura urbana, lo que evidencia la fuerte incidencia de actividades agropecuarias sobre el territorio. Asimismo, se identificó una disminución del vigor de la vegetación y un alto grado de fragmentación forestal, caracterizado por remanentes pequeños y aislados.

En conjunto, estos resultados indican que la cuenca presenta un estado avanzado de degradación ambiental, con implicaciones directas sobre la biodiversidad y la regulación hídrica. Se concluye que es prioritario implementar estrategias de restauración ecológica, fortalecimiento de corredores biológicos y manejo sostenible del suelo, acompañadas de monitoreo continuo, con el fin de mitigar la degradación y promover la recuperación funcional del ecosistema.

Palabras clave-deforestación, cambio de uso del suelo, fragmentación forestal, teledetección, NDVI.

I. INTRODUCCIÓN

La transformación de las coberturas forestales constituye uno de los principales problemas ambientales a nivel global, particularmente en regiones tropicales donde la presión antrópica ha intensificado los procesos de deforestación y cambio de uso del suelo. A escala mundial, la pérdida de cobertura forestal ha sido ampliamente documentada, evidenciando impactos significativos sobre la biodiversidad, el clima y el funcionamiento de los ecosistemas [1]. En este contexto, los cambios en el uso del suelo se reconocen como uno de los principales motores de transformación ambiental, asociados principalmente a la expansión de actividades agropecuarias y extractivas [2].

En Colombia, estas dinámicas se encuentran estrechamente relacionadas con la ampliación de la frontera agrícola, la ganadería extensiva y el uso inadecuado del territorio, lo que ha generado una disminución progresiva de la cobertura boscosa y una afectación directa sobre los servicios ecosistémicos [3]-[4]. En el departamento del Tolima, aunque se han reportado reducciones recientes en las tasas de deforestación, persisten procesos de transformación del paisaje asociados a la praderización y al aprovechamiento productivo del suelo, los cuales continúan ejerciendo presión sobre los ecosistemas naturales [4].

Estas dinámicas resultan especialmente críticas en el ecosistema de bosque seco tropical, considerado uno de los más amenazados en Colombia debido a su alto grado de intervención y fragmentación histórica [5]. En el municipio de Armero-Guayabal, diversos estudios han evidenciado que los remanentes de bosque se encuentran altamente fragmentados y, en muchos casos, restringidos a zonas ribereñas, donde cumplen un papel fundamental en la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad [5]-[6].

En este contexto, la cuenca de la quebrada La Zorra representa una unidad de análisis relevante, al integrar relictos de vegetación secundaria inmersos en una matriz dominada por pastizales y otras coberturas transformadas, lo que refleja una fuerte presión antrópica sobre el territorio. La reducción del tamaño de los fragmentos de bosque y su creciente aislamiento incrementan su vulnerabilidad, limitan los procesos de regeneración natural y disminuyen la conectividad

ecológica del paisaje, factores que han sido ampliamente asociados a la degradación de los ecosistemas [7].

Adicionalmente, en el departamento del Tolima se han identificado múltiples conflictos ambientales asociados al uso del suelo, en los cuales las actividades agropecuarias y extractivas han promovido cambios significativos en la estructura del paisaje, contribuyendo a la pérdida de cobertura forestal y a la simplificación de los ecosistemas [8]. En microcuencas como la quebrada La Zorra, estas transformaciones pueden incidir directamente sobre procesos ecológicos clave, como la regulación hídrica, la estabilidad del suelo y la provisión de servicios ecosistémicos.

Frente a este panorama, el uso de herramientas de teledetección y análisis multitemporal se ha consolidado como una metodología robusta para evaluar cambios en la cobertura terrestre, permitiendo identificar patrones espaciales de deforestación, transición de uso del suelo y fragmentación ecológica. Asimismo, la aplicación de índices espectrales como el NDVI permite evaluar el vigor de la vegetación y su respuesta frente a perturbaciones ambientales [9].

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la dinámica de deforestación, las transiciones de uso del suelo y el estado de fragmentación ecológica en la cuenca de la quebrada La Zorra (Armero-Guayabal, Tolima), durante el periodo 2015–2024, comparando su comportamiento con la tendencia general del municipio, con el fin de generar información que contribuya a la gestión ambiental, la planificación territorial y los procesos de restauración ecológica.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca de la quebrada La Zorra, localizada en el municipio de Armero-Guayabal, en el departamento del Tolima (Colombia). Esta cuenca se encuentra dentro del ecosistema de bosque seco tropical, caracterizado por una marcada estacionalidad climática y un alto grado de intervención antrópica.

El paisaje de la zona está dominado por actividades agropecuarias, principalmente ganadería extensiva, en las que los remanentes de vegetación natural se encuentran fragmentados y, en su mayoría, asociados a corredores ribereños. Debido a estas condiciones, la cuenca representa una unidad espacial adecuada para analizar procesos de deforestación, cambio de uso del suelo y fragmentación ecológica a escala local.

B. Datos e insumos

Para el desarrollo del estudio se emplearon imágenes satelitales en formato ráster correspondientes a los años 2015 y 2024, con una resolución espacial de 10 metros. Estas imágenes fueron previamente procesadas para generar una clasificación binaria de cobertura, en la cual el valor 255 corresponde a píxeles clasificados como cobertura forestal y el valor 0 a píxeles sin cobertura boscosa.

Adicionalmente, se utilizaron imágenes multiespectrales en composición de color verdadero (True Color Image, TCI), las cuales permitieron realizar un análisis visual y espectral de las coberturas presentes en el área de estudio, especialmente en las zonas afectadas por procesos de deforestación.

El procesamiento y análisis de la información se llevó a cabo en un entorno de programación en Python, mediante el uso de librerías especializadas para el manejo de datos geoespaciales y el análisis matricial, lo que permitió automatizar el flujo de trabajo y garantizar la reproducibilidad del análisis.

C. Preprocesamiento y validación de datos

Como etapa inicial, se realizó la verificación de la consistencia espacial de los datos ráster, evaluando que las imágenes correspondientes a los años 2015 y 2024 presentaran las mismas dimensiones, sistema de referencia espacial y transformación geográfica.

Este proceso permitió asegurar la correcta correspondencia espacial entre los píxeles de ambas fechas, condición necesaria para realizar comparaciones multitemporales confiables. En los casos en que fue necesario, se realizaron ajustes para garantizar la alineación de los datos antes de proceder con el análisis.

D. Detección de cambios en la cobertura forestal

La identificación de los cambios en la cobertura forestal se realizó mediante un análisis matricial basado en la comparación directa de los valores de cada píxel entre los años 2015 y 2024. A partir de esta comparación se definieron cuatro categorías principales:

- **Bosque persistente**, correspondiente a áreas que mantuvieron cobertura forestal en ambos periodos
- **Deforestación**, definida como áreas que presentaban bosque en 2015 y fueron transformadas a no bosque en 2024
- **Ganancia de bosque**, correspondiente a áreas sin cobertura forestal en 2015 que fueron clasificadas como bosque en 2024
- **Sin bosque persistente**, correspondiente a áreas sin cobertura forestal en ambos periodos

Posteriormente, se realizó la cuantificación del número de píxeles en cada categoría y su conversión a unidades de área (hectáreas), considerando la resolución espacial de las imágenes.

E. Análisis de transición de uso del suelo

Con el fin de identificar las coberturas que reemplazaron al bosque en las áreas deforestadas, se realizó un análisis de transición de uso del suelo basado

en la información espectral de las imágenes en color verdadero correspondientes al año 2024.

A partir de la interpretación de la respuesta espectral en los canales rojo, verde y azul, se establecieron criterios para clasificar las principales coberturas presentes en las zonas de deforestación. Las categorías identificadas fueron:

- **Pastizales**, asociados a una mayor reflectancia en el canal verde
- **Suelo desnudo**, caracterizado por una mayor reflectancia en el canal rojo
- **Cobertura urbana**, identificada por altos valores de reflectancia en los tres canales

Este procedimiento permitió caracterizar las dinámicas de transformación del paisaje y comprender los principales usos del suelo que sustituyeron la cobertura forestal.

F. Evaluación del vigor de la vegetación

El estado de la vegetación fue evaluado mediante el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual se obtuvo a partir de la relación entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo.

Este índice permitió estimar el vigor fotosintético de la vegetación y analizar su variación entre los años 2015 y 2024. A partir de la comparación temporal del NDVI se identificaron zonas con disminución en la salud de la vegetación, asociadas principalmente a procesos de deforestación y degradación del suelo.

G. Análisis de fragmentación del paisaje

La fragmentación forestal se evaluó a partir de la distribución espacial de los remanentes de bosque identificados en el análisis de cobertura. Para ello, se consideraron aspectos como el tamaño de los fragmentos y su grado de aislamiento dentro del paisaje.

Este análisis permitió identificar patrones de fragmentación asociados a la pérdida de cobertura forestal, evidenciando la reducción de áreas continuas de bosque y la conformación de parches pequeños y aislados, lo cual tiene implicaciones directas sobre la conectividad ecológica del sistema.

H. Procesamiento y visualización cartográfica

Finalmente, se generaron mapas temáticos con el fin de representar espacialmente los resultados obtenidos, incluyendo la dinámica de cobertura forestal, las transiciones de uso del suelo y la variación del NDVI.

Estas representaciones cartográficas permitieron visualizar de manera integrada los patrones de cambio en el territorio, facilitando la interpretación de los procesos de transformación del paisaje y su análisis a escala tanto municipal como de cuenca.

III. RESULTADOS

Como aproximación inicial, se realizó un análisis comparativo a partir de imágenes satelitales en color verdadero correspondientes a los años 2015 y 2024. Este análisis permitió identificar cambios generales en la cobertura del suelo y reconocer patrones espaciales de transformación del paisaje. Se evidencian variaciones en la distribución de la vegetación, así como la expansión de áreas intervenidas, principalmente asociadas a actividades agropecuarias. Asimismo, se observa una tendencia hacia la fragmentación de las áreas boscosas y la consolidación de un mosaico de usos del suelo. Estos cambios pueden observarse en la Fig.1, donde se presenta la comparación directa entre ambos periodos.



Fig. 1. Comparación de imágenes satelitales en color verdadero del municipio de Armero para los años 2015 y 2024, evidenciando cambios en la cobertura del suelo y patrones de transformación del paisaje.

El análisis multitemporal evidenció una transformación significativa de la cobertura forestal en el municipio de Armero durante el periodo 2015–2024. La deforestación constituye el proceso dominante en el territorio, con una distribución espacial amplia y continua. En contraste, las áreas de bosque persistente se presentan de manera fragmentada y dispersa, mientras que la ganancia de cobertura forestal es

prácticamente inexistente, lo que evidencia un marcado desequilibrio entre pérdida y regeneración. Como se observa en la Fig. 2, la pérdida de cobertura forestal se distribuye ampliamente en el territorio, consolidándose como el principal proceso de cambio en el paisaje.

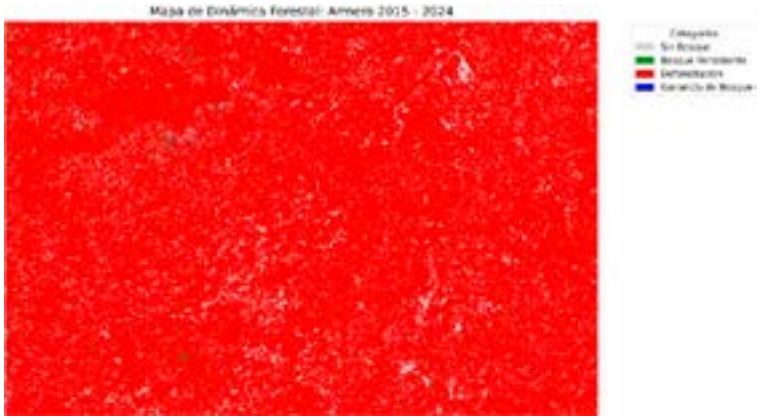


Fig. 2. Dinámica de la cobertura forestal en el municipio de Armero entre 2015 y 2024, mostrando las categorías de bosque persistente, deforestación, ganancia de bosque y áreas sin cobertura boscosa.

A escala comparativa, la cuenca de la quebrada La Zorra representa una proporción relevante de la deforestación total registrada en el municipio de Armero. Aunque la magnitud absoluta de la pérdida de cobertura es mayor a nivel municipal, la cuenca concentra una fracción significativa de este proceso, lo que la posiciona como un área crítica de transformación del paisaje. Asimismo, la presencia de bosque persistente y la ganancia de cobertura forestal son considerablemente menores en la cuenca, lo que refleja un mayor grado de intervención y vulnerabilidad ecológica. Esta relación se evidencia en la Fig. 3, donde se comparan las áreas de cambio forestal entre ambas escalas de análisis.

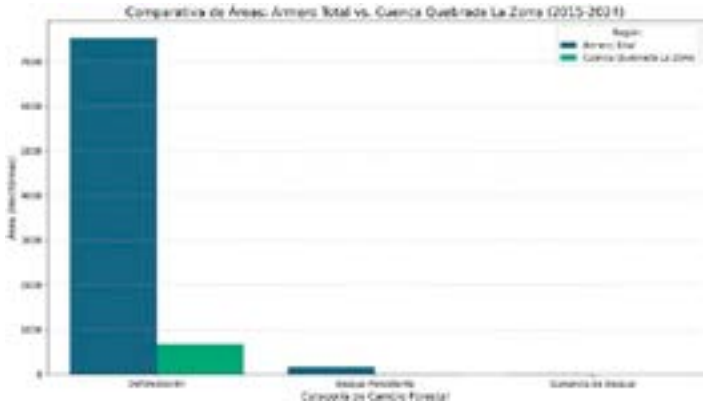


Fig. 3. Comparación de las áreas de cambio forestal entre el municipio de Armero y la cuenca de la quebrada La Zorra para el periodo 2015–2024.

La Tabla 1, presenta la comparación de las principales categorías de cambio de cobertura forestal y transición de uso del suelo entre el municipio de Armero y la cuenca de la quebrada La Zorra durante el periodo 2015–2024.

TABLA 1. Comparación de cambios de cobertura y transiciones de uso del suelo entre el municipio de Armero y la cuenca de la quebrada La Zorra (2015–2024).

Categoría	Armero Total (Ha)	Cuenca Q. La Zorra (Ha)	% de la cuenca respecto a Armero
Bosque persistente	176.36	11.68	6.6%
Deforestación	7522.98	677.88	9.0%

Ganancia de bosque	12.17	0.71	5.8%
Transición a pastizales	5921.77	588.68	9.9%
Transición a suelo desnudo	1519.14	85.78	5.6%
Transición a urbano	13.08	0.03	0.2%

Los resultados presentados en la Tabla 1 evidencian que la cuenca de la quebrada La Zorra, a pesar de su menor extensión territorial, concentra una proporción significativa de los procesos de deforestación registrados en el municipio de Armero, alcanzando el 9.0% del total. Este comportamiento sugiere una intensidad relativa mayor de transformación del paisaje en esta unidad de análisis. Asimismo, la baja proporción de bosque persistente y la limitada ganancia de cobertura forestal reflejan un desequilibrio estructural entre los procesos de pérdida y recuperación, lo cual es indicativo de una capacidad reducida de regeneración ecológica.

En cuanto a las dinámicas de uso del suelo, la predominancia de la transición hacia pastizales, tanto a escala municipal como en la cuenca, confirma la fuerte incidencia de las actividades agropecuarias como principal motor de cambio. De manera complementaria, la presencia de áreas de suelo desnudo evidencia procesos asociados a la degradación del suelo, mientras que la escasa participación de la cobertura urbana sugiere que la transformación observada responde principalmente a dinámicas rurales.

En la cuenca de la quebrada La Zorra, la dinámica de cambio presenta una clara dominancia de la deforestación frente a las demás categorías. La pérdida de cobertura forestal alcanza valores significativamente superiores en comparación con el bosque persistente, mientras que la ganancia de bosque es prácticamente nula, siendo un proceso sostenido de transformación del paisaje, caracterizado por la reducción progresiva de la cobertura forestal y la consolidación de usos antrópicos del suelo. Como se muestra en la Fig. 4, la deforestación representa la categoría predominante dentro de la dinámica de cambio en la cuenca.

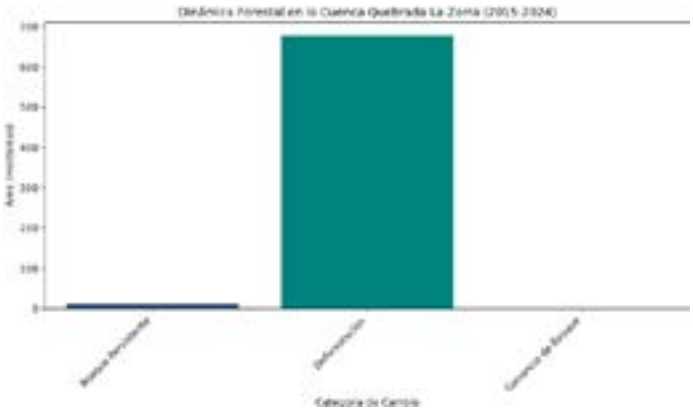


Fig. 4. Distribución de las categorías de cambio forestal en la cuenca de la quebrada La Zorra durante el periodo 2015–2024.

El análisis de transición de uso del suelo permitió identificar las coberturas que reemplazaron al bosque en las áreas deforestadas. Se evidenció que la mayor parte de estas áreas corresponde a pastizales, seguidas por zonas de suelo desnudo y, en menor proporción, cobertura urbana. Este patrón refleja la fuerte incidencia de actividades agropecuarias en la transformación del territorio, particularmente asociadas a la expansión de la ganadería. La distribución espacial de estas coberturas se observa en la Fig. 5, mientras que su cuantificación se presenta en la Fig. 6.

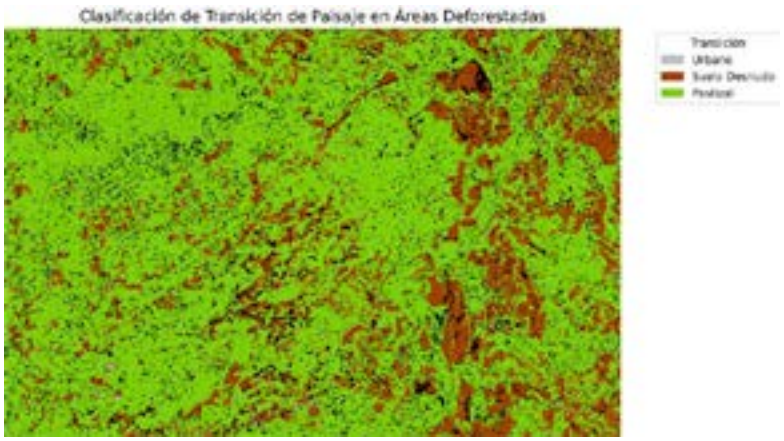


Fig. 5. Clasificación espacial de las coberturas que reemplazaron el bosque en áreas deforestadas, incluyendo pastizales, suelo desnudo y zonas urbanas.



Fig. 6. Desglose de la deforestación por tipo de transición de uso del suelo en la cuenca de la quebrada La Zorra.

El análisis espacial de la cuenca de la quebrada La Zorra permitió evidenciar que los procesos de deforestación presentan una distribución amplia dentro de esta unidad territorial, consolidándola como un foco relevante de transformación del paisaje en el municipio de Armero. Como se observa en la Fig. 7, la cuenca concentra aproximadamente el 9% de la deforestación total registrada en el área de estudio, a pesar de representar una fracción menor del territorio, lo cual evidencia una presión desproporcionada sobre sus ecosistemas y refuerza su importancia como zona prioritaria para la gestión ambiental.

Adicionalmente, la distribución espacial de la deforestación muestra una alta correspondencia con áreas intervenidas para uso agropecuario, lo que coincide con los resultados de transición de uso del suelo, donde los pastizales constituyen la principal cobertura de reemplazo. La presencia de áreas deforestadas en proximidad a la red hídrica sugiere una posible afectación sobre la funcionalidad ecológica de la cuenca, particularmente en términos de regulación hídrica y conservación del suelo. Este patrón, combinado con la baja proporción de bosque persistente y la alta fragmentación observada, evidencia un sistema ambiental bajo condiciones de presión continua.

De manera complementaria, el análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) permitió identificar una tendencia general hacia la reducción del vigor de la cobertura vegetal en las zonas intervenidas. Aunque este análisis no se presenta de forma detallada, los resultados obtenidos son consistentes con los patrones de deforestación identificados, evidenciando una disminución en la actividad fotosintética asociada a la pérdida de cobertura boscosa y a la transformación del suelo.

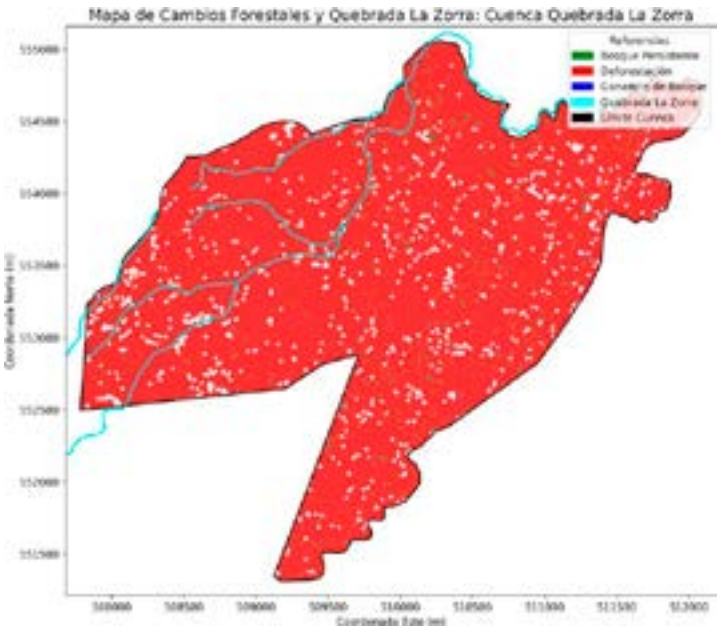


Fig. 7. Distribución espacial de la deforestación y los cambios de cobertura forestal dentro de la cuenca de la quebrada La Zorra, en relación con su red hídrica y límites territoriales.

El análisis de fragmentación forestal permitió evaluar la estructura espacial de los remanentes de bosque persistente en el municipio de Armero. A partir de la identificación de parches mediante algoritmos de conectividad espacial, se evidenció que la cobertura forestal remanente se encuentra altamente fragmentada y distribuida en múltiples unidades aisladas. Como se observa en la Fig. 8, el paisaje está dominado por un alto número de fragmentos de reducido tamaño, lo que indica la pérdida de continuidad de la cobertura boscosa. En particular, la mayoría de los parches presentan áreas inferiores a 1 ha, lo que limita su capacidad para sostener procesos ecológicos clave.

Esta configuración espacial implica una mayor exposición al efecto de borde, caracterizado por cambios en las condiciones microclimáticas y una mayor vulnerabilidad frente a perturbaciones externas. Asimismo, la reducción en el tamaño y conectividad de los parches disminuye la capacidad del ecosistema para mantener la biodiversidad, facilitar el movimiento de especies y sostener funciones ecológicas fundamentales. En conjunto, la fragmentación no solo acompaña los procesos de deforestación, sino que constituye un factor crítico de degradación estructural del paisaje, comprometiendo la resiliencia del ecosistema a largo plazo.

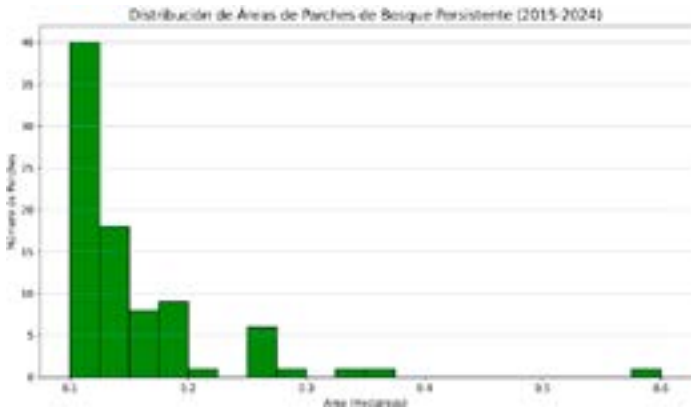


Fig. 8. Distribución espacial de los parches de bosque persistente en el municipio de Armero durante el periodo 2015–2024, evidenciando el grado de fragmentación del paisaje.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la cuenca de la quebrada La Zorra presenta una dinámica de

transformación del paisaje altamente representativa de los procesos observados a escala municipal, aunque con una intensidad proporcionalmente mayor en términos de presión ambiental. A pesar de su menor extensión relativa, la cuenca aporta aproximadamente el 9% de la deforestación total registrada en el municipio de Armero durante el periodo 2015–2024, lo que confirma su relevancia como foco crítico de pérdida de cobertura forestal.

En términos de conservación, la reducida extensión de bosque persistente en la cuenca (11.68 ha) evidencia un estado avanzado de fragmentación. Aunque estos remanentes son limitados en área, cumplen un papel fundamental como refugios de biodiversidad, regulación hídrica y almacenamiento de carbono. Sin embargo, su pequeño tamaño y aislamiento incrementan su vulnerabilidad al efecto de borde, disminuyen la conectividad ecológica y comprometen su resiliencia a largo plazo, tal como ha sido documentado en ecosistemas fragmentados [7].

La magnitud de la deforestación registrada en la cuenca (677.88 ha) implica una pérdida significativa de hábitats y una alteración directa de procesos ecológicos fundamentales. En sistemas de cuenca, este tipo de transformación tiene implicaciones críticas sobre el ciclo hidrológico, incluyendo el aumento de la escorrentía superficial, la reducción de la infiltración de agua y la disminución en la recarga de acuíferos. Asimismo, la eliminación de la cobertura forestal favorece procesos de erosión, pérdida de suelo fértil y sedimentación en los cuerpos de agua, afectando la calidad del recurso hídrico.

En contraste, la ganancia de cobertura forestal es prácticamente insignificante (0.71 ha), lo que indica que los procesos de regeneración natural son limitados o inexistentes en el área de estudio. Este desequilibrio entre pérdida y recuperación sugiere que la cuenca ha superado su capacidad de autorregulación ecológica, consolidando un balance neto negativo en términos de cobertura forestal.

La dinámica de uso del suelo refuerza esta tendencia, evidenciando que la conversión a pastizales constituye el principal motor de cambio, representando cerca del 78% de las áreas deforestadas. Este patrón, más acentuado en la cuenca que a nivel municipal, refleja la fuerte incidencia de la ganadería extensiva en la transformación del paisaje, en concordancia con estudios que identifican la expansión agropecuaria como una de las principales causas de deforestación en regiones tropicales [2].

Adicionalmente, la presencia de suelo desnudo en una proporción considerable evidencia procesos activos de degradación del suelo, lo que incrementa la susceptibilidad a la erosión y reduce la capacidad productiva del territorio. La escasa incidencia de la cobertura urbana confirma que los procesos de transformación observados responden principalmente a dinámicas rurales, más que a expansión urbana.

El análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) evidenció una disminución en el vigor fotosintético de la vegetación en las áreas intervenidas, lo cual es consistente con la pérdida de cobertura forestal y la simplificación estructural del paisaje. Este comportamiento refleja una reducción en la productividad primaria del ecosistema, asociada a la sustitución del bosque por coberturas de menor complejidad ecológica [9].

Finalmente, la combinación de deforestación, fragmentación y cambios en el uso del suelo configura un escenario de alta vulnerabilidad ambiental para la cuenca. La pérdida de conectividad ecológica, junto con la degradación del suelo y la afectación de la red hídrica, compromete la capacidad del ecosistema para sostener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos a largo plazo. En este sentido, la cuenca de la quebrada La Zorra no solo refleja las tendencias observadas en el municipio de Armero, sino que, en algunos aspectos, las intensifica, posicionándose como una unidad prioritaria para la implementación de estrategias de conservación y restauración ecológica.

V. CONCLUSIONES

El análisis realizado permitió evidenciar que la cuenca de la quebrada La Zorra ha experimentado una transformación significativa de su cobertura forestal durante el periodo 2015–2024, caracterizada principalmente por la pérdida sostenida de bosque y una recuperación prácticamente inexistente. A pesar de su escala local, la cuenca concentra una proporción considerable de la deforestación del municipio de Armero, lo que pone en evidencia la intensidad de los procesos de cambio en esta unidad territorial.

Los resultados muestran que la conversión del bosque a pastizales constituye el principal proceso de transformación del paisaje, lo cual refleja el papel predominante de las actividades agropecuarias en la configuración actual del territorio. Este cambio no solo implica una reducción de la cobertura forestal, sino también una simplificación estructural del ecosistema, acompañada por la aparición de áreas de suelo desnudo y un aumento en los niveles de fragmentación.

La distribución espacial de la deforestación, particularmente en zonas cercanas a la red hídrica, sugiere posibles implicaciones sobre la regulación del agua y la estabilidad del suelo, aspectos clave en el funcionamiento ecológico de la cuenca. En este sentido, los cambios observados no deben entenderse

únicamente en términos de pérdida de cobertura, sino como una alteración integral del sistema ambiental.

En conjunto, los hallazgos indican que la cuenca de la quebrada La Zorra se encuentra en una condición de alta vulnerabilidad, donde la continuidad de las dinámicas actuales podría comprometer la provisión de servicios ecosistémicos a largo plazo. Frente a este escenario, resulta necesario orientar acciones de manejo que prioricen la restauración de áreas estratégicas, la recuperación de la conectividad del paisaje y la promoción de prácticas productivas más sostenibles, acordes con las condiciones ecológicas del territorio.

REFERENCIAS

[1] M. C. Hansen et al., "High-resolution global maps of 21st-century forest cover change," Science, vol. 342, no. 6160, pp. 850–853, 2013. doi: 10.1126/science.1244693.

[2] J. A. Foley et al., "Global consequences of land use," Science, vol. 309, no. 5734, pp. 570–574, 2005. doi: 10.1126/science.1111772.

[3] IDEAM, "Monitoreo de la deforestación en Colombia," 2019. [Online]. Available: http://www.ideam.gov.co/web/bosques/deforestacion-colombia

[4] CORTOLIMA, "Tolima reduce la deforestación de una manera significativa según estudio del IDEAM," 2019. [Online]. Available: https://cortolima.gov.co/sala-de-prensa/noticias/457-tolima-reduce-la-deforestacion-de-una-manera-significativa-segun-estudio-del-ideam

[5] CORTOLIMA and Universidad del Tolima, "Informe sobre bosque seco tropical en Armero-Guayabal," 2023. [Online]. Available: https://cortolima.gov.co/images/estudio/bosques/INFORME_FINAL_-_BOSQUE_SECO_-_cortolima_-_UT_1.pdf

[6] L. A. Lozano Botache, "Patrones ecológicos de un relicto de bosque seco tropical ribereño en Armero-Guayabal, Tolima," Tesis de pregrado, Universidad del Tolima, 2005. [Online]. Available: https://repository.ut.edu.co

[7] N. M. Haddad et al., "Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems," Science Advances, vol. 1, no. 2, e1500052, 2015. doi: 10.1126/sciadv.1500052.

[8] J. M. Vera Rodríguez and E. A. Moreno Romero, "Atlas de conflictos ambientales del Tolima: aportes para una lectura territorial del extractivismo," Revista Luna Azul, no. 50, pp. 263–280, 2020. doi: 10.17151/luaz.2020.50.14.

[9] N. Pettorelli et al., "Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change," Trends in Ecology & Evolution, vol. 20, no. 9, pp. 503–510, 2005. doi: 10.1016/j.tree.2005.05.011.

Determination of the Subgrade Reaction Coefficient (Ks) Using the CBR Test: Validation of the Al-Shayea (2025) Method, for Colombian Soils

1st Luna Moreno Melgarejo
dept. Universidad de La Sabana Civil Engineering Student
Chía, Colombia
Lunamome@unisabana.edu.co

2 nd Yoed Sanchez Ariza
dept. Universidad de La Sabana Civil Engineering Student
Chía, Colombia
yoedsaar@unisabana.edu.co

3rd Miguel Enrique Sarmiento Díaz
dept. Universidad de La Sabana
Research Professor Civil Engineering Program
Chía, Colombia
miguel.sarmiento@unisabana.edu.co

***Abstract*— The subgrade reaction modulus (Ks) is a fundamental geotechnical parameter for measuring soil stiffness under a foundation, related to the applied pressure and the resulting deformation, and is used to model soil behavior in shallow foundations and pavements. In Colombia, its field determination is carried out through the Plate Load Test, which represents a significant limitation for small and medium-sized companies due to its high cost and difficult access. The method proposed by Al-Shayea (2025) offers an alternative to obtain Ks directly from the CBR test, widely used in the country for its low cost and availability in civil engineering laboratories; however, this method has not been validated for Colombian tropical soils, representing a knowledge gap that this research seeks to address. This work aims to evaluate and validate the Al-Shayea (2025) method for Colombian soils, specifically silty clay and high plasticity clay (CH), both extracted from the city of Chia, located in the Sabana de Bogotá plateau, specifically in Universidad de La Sabana Campus, a region of lacustrine deposit origin characterized by soft soils. The practical purpose is to replace the Plate Load Test in the determination of the subgrade reaction coefficient (Ks) through the CBR test, offering a more economical and accessible alternative for civil engineering projects in Colombia. Two types of soil extracted from campus were analyzed. The first two samples correspond to the 2024 and 2025 periods, consisting of silty clay obtained at 50 cm depth, where the presence of roots is identified as a key factor in the increase of apparent stiffness, rather than organic matter alone. The third sample, from 2026, corresponds to a high plasticity clay (CH) extracted at 1.80 m depth, which was manually inspected and confirmed to contain no roots, allowing validation of the expected geotechnical behavior according to bibliographic references.**

Each sample underwent complete geotechnical characterization through the following tests under the corresponding INVIAS standards: water content, grain size analysis, Atterberg limits, specific gravity (Gs), Modified Proctor, and CBR. The Ks was determined using the Al-Shayea (2025) method, obtaining the complete secant Ks spectrum from the CBR load-penetration curve. Since the 2024 and 2025 soils presented roots and silty fraction, elements not considered in the original method calibration, the obtained values were corrected for foundation size using the expressions proposed by Terzaghi (1955). The Ks values obtained for the 2024 and 2025 periods were 131,266 kN/m³ and 423,669 kN/m³ respectively, exceeding the reference ranges for cohesive soils established by Terzaghi (1955), attributed to the lateral confinement of the CBR mold and the presence of roots, elements not contemplated in the original method calibration. Applying the foundation size correction by Terzaghi (1955) for B=1.0 m, values were reduced to 21,877 kN/m³ and 70,612 kN/m³, consistent with low to high plasticity clays. The 2026 sample, classified as CH clay with PI=51.7% and γd max=19.15 kN/m³, completed its geotechnical characterization and the CBR test is pending. Results suggest that the integration of the Al-Shayea (2025) method, which enables direct Ks determination from the CBR load-penetration curve, with the size correction proposed by Terzaghi (1955), represents a feasible approach to determine Ks in Colombian soils from the CBR test, offering a technically and economically accessible alternative to the Plate Load Test, with special potential for small and medium-sized civil engineering projects in Colombia.

Keywords—Subgrade reaction modulus; CBR test; soil-structure interaction; Colombian soils; subgrade reaction coefficient.

I. Introduction

The subgrade reaction modulus (Ks) measures the relationship between pressure and deformation of the soil under a foundation and is used to design geotechnical structures such as shallow foundations, slabs, and rigid pavements through the Winkler elastic spring model. In Colombia, the standard method for determining Ks in the field is the Plate Load Test (INV E-168) [1] however, this test represents a significant barrier due to its high cost, specialized equipment, and difficult access in rural

areas, limiting its use for small and medium-sized civil engineering companies. The method proposed by Al-Shayea [2] offers an alternative to obtain Ks directly from the load-penetration curve of the CBR test, which is more economical and widely available in Colombian laboratories. Nevertheless, this method has not yet been validated for Colombian soils. This research evaluates the method on two soil types extracted from Chía, Cundinamarca: a silty clay at 50 cm depth tested in 2024 and 2025, and a high plasticity clay (CH) at 1.80 m depth tested in 2026, applying a foundation size correction proposed by Terzaghi [3]

II. Theoretical Background

The conceptual basis of this research is derived from the work of Terzaghi [1], who established that the modulus of subgrade reaction (Ks) is not an intrinsic soil property, but rather a stiffness measure dependent on the geometry of the loaded area. He derived footing size correction expressions that allow extrapolation of reduced-scale model results to real engineering dimensions.

However, directly applying those expressions requires the Plate Load Test (INV E-168), whose cost and logistical complexity make it inaccessible in many local contexts. In response to this limitation, Al-Shayea [2] recently proposed a methodology to derive the complete spectrum of the secant modulus of subgrade reaction from the load-penetration curve of the CBR test, interpreting the pressure exerted by the piston at each penetration point as a controlled footing up to a limit of 12.5 mm.

Nevertheless, this proposal was developed and validated exclusively for arid soils in Saudi Arabia, without considering the behavior of materials containing silts, high-plasticity clays, and organic matter such as the lacustrine deposits characteristic of the Bogotá Savannah. This research seeks to combine the data obtained through the Al-Shayea method with Terzaghi's geometric corrections, reducing the experimental values to a reference footing width of B = 1.0 m in order to evaluate whether this integration constitutes a technically and economically viable alternative for Colombian tropical soils.

III. METHODOLOGY

For this research, samples were collected in 2024 and 2025 at a depth of 50 cm, where a sandy silt with roots was found. These soils were extracted from the Universidad de La Sabana campus, Chía, Cundinamarca. Additionally, in 2026, a CH clay was extracted at a depth of 1.8 m from the same location.



[a.] Photographic evidence of the excavation of Sample 2026.

Subsequently, the corresponding geotechnical soil classification tests were performed under Colombian INVIAS standards for the three samples and periods. The following laboratory tests were carried out: water content INV E-122, grain size distribution INV E-213-13, liquid limit INV E-125-13, plastic limit and plasticity index INV E-126-13, specific gravity Gs INV E-222, Modified Proctor compaction INV E-142, and CBR tests (3 specimens: 10, 25, and 56 blows) INV E-148-13.

Additionally, a cleaning procedure was applied to the 2026 sample because it presented more suitable characteristics for obtaining representative results. The sample was oven-dried at 50°C to avoid altering its properties. After drying, it was processed through the Los Angeles Abrasion machine and then sieved through a No. 4 sieve to remove roots and organic matter, obtaining a more representative Ks value.



[b.] Photographic evidence of geotechnical soil classification laboratories.

For Ks evaluation using the Al-Shayea method, the parameters established in the original paper and the INVIAS CBR standard were considered. The piston area of 1935 mm² and the complete load (kN) versus axial deformation (mm) curve were required. The secant Ks spectrum was calculated using Equation (2) up to 12.5 mm penetration, after estimating the pressure applied at each point using Equation (1).

Pressure Equation:

$$q = \frac{Load}{CBR\ piston\ area} = \frac{L}{A} \qquad (1)$$

Secant Ks Equation:

$$Ks = \frac{q}{\delta} \qquad (2)$$

Consequently, the design values of δ = 2.5 mm and δ = 5 mm are evaluated, since these values fall within the design range shown in the spectrum graph and also because, using the following equation (3) it is possible to estimate whether the % CBR estimated using the Al-Shayea method is consistent with the estimate, where the reference pressure (kPa) is 6895 kPa for 2.5 mm and 10342 kPa for 5 mm.

CBR Correction Equation:

$$CBR = \frac{q}{reference\ q} \cdot 100 \qquad (3)$$

Once the secant ks value is obtained, the Terzaghi correction is performed using the following equation (4) for these cohesive soils, assuming a typical footing in Colombia with B = 1 m. This correction is applied to the samples from the 2024 and 2025 periods due to the presence of organic matter and roots.

Terzaghi Correction Equation:

$$Ks_{correction} = Ks_{CBR}\left(\frac{0.3}{B}\right) \qquad (4)$$

IV. RESULTS

Table I summarizes the relevant results of the geotechnical characterization of the three samples. These parameters are essential for soil classification and evaluation of the reliability of the estimated Ks values.

TABLE I. GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION

Parameter	2024	2025	2026
Soil classification	CL	CL	CH
Liquid Limit LL (%)	50.13	34.3	70.48
Plastic Limit LP (%)	21.9	11.7	18.77
Plasticity Index IP(%)	28.2	22.6	51.73
GS	2.875	-	2.680
% Passing No.200	53.3	62.0	97.4
Opitmum moisture Wopt (%)	9.3	13.6	11
Max dry density γd (gr/cm³)	1.9498	1.1000	1.88

[c.] Geotechnical characterization results

Table 2 presents the CBR test results for the 2026 sample. As expected for a CH clay, the CBR value decreases as compaction energy increases.

TABLE II. CBR EXPANSION

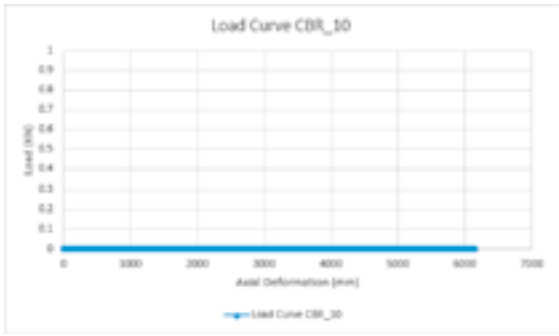
Specimen	Blows	Expation (%)
1	10	8.92
2	25	6.76
3	56	5.85

[d.] CBR expansion results



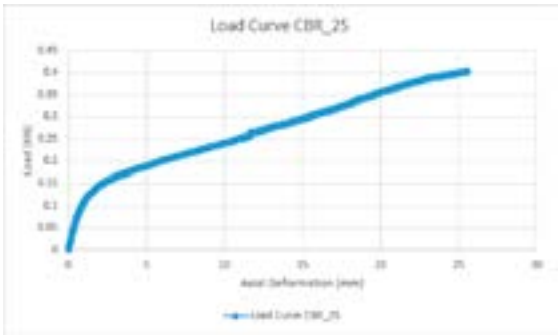
e. Photographic evidence from laboratories using a modified Proctor test to determine the optimal moisture content.

Figures 1, 2, and 3 present the load-axial deformation curves obtained for the 2026 specimens compacted at different energy levels. As compaction energy increases from 10 to 56 blows per layer, the load required to achieve the same penetration increases, confirming the direct relationship between compaction energy and soil stiffness.



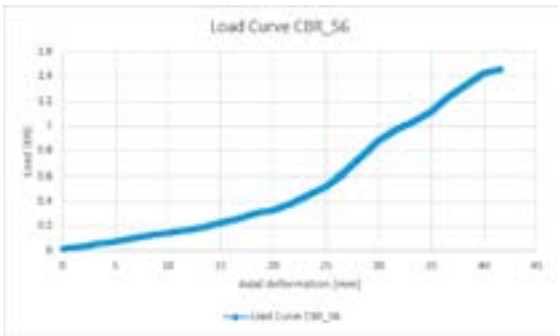
f.

Fig. 1. load-Axial Deformation for CBR_10.



g.

Fig. 2. load-Axial Deformation for CBR_25



h.

Fig. 3. load-Axial Deformation for CBR_56

Table 3 shows the secant Ks spectra for all five specimens superimposed. The 2024 and 2025 samples exhibit significantly higher Ks values across the entire penetration range compared to the 2026 specimens, which is attributed to the presence of roots in the shallow silty clay layer. In contrast, the 2026 CH clay specimens, free of roots and extracted at 1.80 m depth, show Ks values consistent with cohesive soil behavior as described by Terzaghi (1955) [1].

TABLE III. SECANT KS

Sample	Ks – 2.5mm (kN/m³)	Ks – 5mm (kN/m³)	Ks – max (kN/m³)	CBR (%)
2024	131266	130439	137911	6.31
2025	423669	300504	448900	15.36
2026_10	6408.3	4961.2	6408.3	0.232
2026_25	32454.8	19534.9	32454	1.176
2026_56	9385.2	7958.6	9385.2	0.344

i. Secant Ks results

The values for samples 2024 and 2025 are presented. The appropriate correction by Terzagi (1955) [1] was applied due to

the root characteristics of the samples; thus, this correction was applied, with the ks values adjusted for a typical Colombian foundation width of B = 1 m. After the correction, all samples fall within the clay classification ranges, which is consistent with their geotechnical characterization, as shown in Table 4.

TABLE IV. KS CORRECTED

Sample	Ks – 2.5mm (kN/ m³)	Ks – corrected (kN/ m³)	Terzaghi Classification
2024	131266	39380	Very stiff clay
2025	423669	127101	Hard clay

[j.] Ks corrected results

Table 5 shows the reference ranges from Terzaghi (1955) [1] used for soil classification. The corrected Ks values for the 2024 and 2025 samples are classified as very stiff to stiff clay, while the 2026 samples are classified as soft to stiff clay, consistent with the CH classification obtained from the Atterberg limits.

TABLE V. TERZAGHI CLASSIFICATION

Soil type	**State**	**Ks range (kN/m³)**
Clay	Soft	< 15,295
Clay	Stiff	15,295 – 30,590
Clay	Very stiff	30,590 – 61,180
Clay	Hard	> 61,180
Sand	Loose	6,118 – 18,354
Sand	Medium	18,354 – 91,770
Sand	Dense	91,770 – 305,900

[k.] Terzaghi Classification

V. DISCUSSION

The results demonstrate that the direct application of the Al-Shayea (2025) method [2] to the 2024 and 2025 samples yielded Ks values of 131,266 kN/m³ and 423,669 kN/m³ respectively at δ = 2.5 mm, which fall within the dense sand range according to Terzaghi [1] classification inconsistent with their silty clay geotechnical characterization. This overestimation is attributed to two combined factors the lateral confinement of the CBR mold It is one of the characteristics, but not the one that affects it so much, which restricts lateral deformation and artificially increases measured stiffness, and the presence of roots in the shallow soil layer 50 cm depth, which act as a natural reinforcement system increasing apparent rigidity. These elements were not contemplated in the original Al-Shayea calibration, representing a limitation of direct application to Colombian tropical soils, but And thus, with both methods, it is possible to arrive at a real estimate of when the presence of silt or organic matter is found.



[l.] Photographic evidence of failure of CBR_25 2026

After applying the Terzaghi [1] size correction for B = 1.0 m (Equ 4), the corrected values of 39380 kN/m³ (2024) and 127101 kN/m³ (2025) fall within very stiff to hard clay ranges, consistent with the actual soil composition. This confirms that the integration of both methods Al-Shayea [2] for Ks determination from CBR and Terzaghi [1] for geometric correction it is constitutes a technically viable approach for cohesive Colombian soils.

The 2026 CH clay sample, extracted at 1.80 m depth and manually verified to be root-free, yielded Ks values directly within cohesive soil ranges 385 kN/m³ at 56 blows, 32455 kN/m³ at 25 blows, 6408.3 kN/m³ at 10 without requiring significant correction since it falls within the established ranges for clays, consistent for this sample of CH Clay, this validates the Al-Shayea method for well-characterized Colombian clays free of biological disturbances and confirms that root presence is the primary factor driving overestimation in the shallow samples.

The variation in Ks between the 2024 and 2025 samples collected from the same site and soil type highlights the method's sensitivity to the actual soil state at the time of testing, capturing variations in moisture, density, and root content that static Terzaghi reference tables cannot reflect. This dynamic characterization represents a significant advantage of the proposed methodology, thus contributing to the extension of Terzaghi's table for soil classification.

From a practical standpoint, the CBR-to-Ks approach Al-Shayea [2] combined with Terzaghi's size correction offers a cost-effective and technically sound alternative to the Plate Load Test for Colombian lacustrine soils, with direct applicability for small and medium-sized civil engineering companies operating in the Sabana de Bogotá region and similar tropical contexts.

VI. Conclusions

This study confirms that the integration of Al-Shayea's methodology [2] for determining the subgrade reaction modulus from the CBR test, combined with Terzaghi's correction [1] for B = 1.0 m, constitutes a technically and economically viable alternative to the load plate test in Colombian lacustrine soils. In well-characterized CH clays free of organic matter (such as the 2026 samples), the method operates directly without requiring corrections, yielding ks values consistent with their geotechnical classification. In contrast, in shallow soils containing roots or biological debris, direct application overestimates stiffness, placing the results in ranges typical of dense sand. However, when applying Terzaghi's correction [1], the values realign with the clayey nature of the soil, validating the use of this combined approach.

Beyond methodological validation, this research makes two contributions to geotechnical knowledge. First, it identifies the presence of roots as the primary factor leading to an overestimation of Ks in shallow tropical soils, a variable absent from both Al-Shayea's original calibration [2] and Terzaghi's static reference tables [1]. Second, the temporal variation observed between samples from 2024 and 2025, collected at the same site and soil type, demonstrates that the proposed methodology captures the actual state of the soil at the time of testing, reflecting effective changes in moisture, density, and root content that the reference tables cannot represent, thereby expanding its utility for the dynamic characterization of sites in the Bogotá Savanna.

Future work should focus on three areas: conducting load plate tests at the same sampling locations to establish a direct quantitative comparison with the proposed method; develop a correction factor that explicitly accounts for the content of roots and organic matter in surface soils; and extend the validation to other soil types and regions of Colombia, including the Eastern Plains and the Caribbean Coast, to assess the broader applicability of the Al-Shayea–Terzaghi integration in tropical geotechnical practice.

References

[1] K. Terzaghi, "Evaluation of coefficients of subgrade reaction," Geotechnique, vol. 5, no. 4, pp. 297–326, 1955.

[2] N. A. Al-Shayea, "Estimating the coefficient of subgrade reaction in the laboratory using the CBR testing apparatus," Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 50, pp. 2123–2147, 2025, doi: 10.1007/s13369-024-09678-z.

Bibliometric Analysis of Generative Artificial Intelligence in Higher Education Using Automation, Algorithmic Techniques, and Natural Language Processing

Arce Aristizábal, Juan José
Systems and Computer Engineering Program
University of Quindío, Faculty of Engineering
Armenia, Colombia
juanj.arcea@uqvirtual.edu.co

***Abstract*— The rapid advancement of Generative Artificial Intelligence has begun to transform multiple activities in higher education, from the way students learn to how instructors design materials and conduct assessments. As a result, in recent years there has been a significant increase in academic research analyzing the use of these technologies in university contexts.**

The objective of this work is to analyze the main research trends related to Generative Artificial Intelligence in higher education during the period 2016–2026. To achieve this, an own made software tool was developed to automatically collect and analyze more than 4,000 scientific articles from academic databases such as IEEE Xplore and Web of Science. The application provides an integrated management of bibliographic sources and enables different types of bibliometric analysis, allowing the identification of patterns in scientific literature, such as the most frequent concepts, predominant research topics, and the temporal evolution of publications or even deep camparisions between articles using diferent types of algorithms. The system achieves a keyword detection precision of approximately 73%, and generates visualizations that help to clearly understand the distribution of scientific production, the most active countries, and emerging topics in this field.

The results show a substantial growth in research on Generative Artificial Intelligence applied to higher education across the analyzed period, with a sharp increase observed from 2022 onward. The most dominant terms in the literature are *students*, *learning*, and *education*, while the most frequently occurring keywords are *higher education*, *ChatGPT*, and *generative AI*. These findings reflect that current research is strongly centered on the impact of these technologies on teaching and learning processes, as well as on concerns related to academic integrity and ethics. This work provides an overview of the current state of research in this field and offers a tool that can be used to automatically explore scientific trends across different areas of knowledge.

Keywords—Generative Artificial Intelligence, Higher Education, Bibliometric Analysis, Natural Language Processing

I. INTRODUCTION

The rapid development of Generative Artificial Intelligence (GenAI) has significantly transformed multiple domains, with higher education being one of the most impacted. Tools based on large language models, such as ChatGPT, have begun to influence teaching practices, learning processes, assessment methods, and academic content generation [1]. As a result, universities are experiencing a profound shift in how knowledge is created, shared, and evaluated [2].

This transformation has generated a remarkable surge in scientific output. Prior to 2023, academic coverage of this topic was virtually nonexistent, with only one recorded study in 2022, followed by a jump to over 200 studies in 2023 alone — a pattern that reflects how rapidly the field has emerged [3]. More recent analyses confirm this trajectory, with publications experiencing a marked acceleration starting in 2023, reaching into the thousands by 2024 and 2025 [4]. These studies explore diverse topics, including AI-supported learning, human–AI interaction, academic integrity, and ethical challenges. However, the very speed of this growth makes it increasingly difficult to identify clear trends, dominant topics, and emerging research directions.

In this context, bibliometric analysis offers a valuable approach to systematically explore large volumes of scientific literature and uncover patterns within a research field. By combining bibliometric techniques with text analysis, it is possible to identify key themes, measure research growth, and understand the global distribution of scientific production.

The objective of this study is to analyze research trends in Generative Artificial Intelligence applied to higher education through a bibliometric approach supported by automated text processing techniques. Specifically, this work contributes an end-to-end software system — developed in Python — that

integrates data collection, deduplication, keyword analysis, abstract similarity comparison, and hierarchical clustering into a single automated pipeline. This approach allows the identification of patterns that go beyond co-authorship or keyword co-occurrence networks, offering a complementary and reproducible method for exploring the evolution of scientific literature. The system was applied to a corpus of more than 4,000 articles from IEEE Xplore and Web of Science, covering the period 2016–2026.

II. METHODOLOGY

This study is based on a bibliometric analysis of scientific publications related to Generative Artificial Intelligence in higher education. A dataset of more than 4,000 articles was collected from major academic databases, including IEEE Xplore and Web of Science, covering the period between 2016 and 2026. The entire analysis was implemented in Python, making use of specialized libraries including ***bibtexparser*** for reading bibliographic records, ***pandas*** and ***numpy*** for data manipulation, ***NLTK*** for text preprocessing, ***scikit-learn*** for vectorization and clustering, ***sentence-transformers*** for semantic embedding, and ***matplotlib*** and ***seaborn*** for visualization.

The methodology was structured as a sequential pipeline consisting of six stages: data collection, cleaning and deduplication, term and keyword analysis, abstract similarity analysis, hierarchical clustering, and visualization. Each stage builds directly on the output of the previous one, ensuring a reproducible and consistent analytical flow.

Attribute	Description
Data sources	IEEE Xplore, Web of Science
Number of articles	> 4,000
Time range	2016–2026
Data format	BibTeX
Analyzed fields	Abstract, keywords, authors, year, venue

Table. I. Dataset Description and Bibliographic Sources.

Stage 1: Data collection and integration. Bibliographic records were retrieved in BibTeX format from IEEE Xplore and Web of Science using automated queries based on predefined search terms related to Generative AI and higher education. The bibtexparser library was used to parse and load the records into a unified dataset structure.

Stage 2: Cleaning and deduplication. Once collected, the dataset was cleaned to remove duplicate entries based on title and DOI matching. Metadata fields — including abstracts, keywords, publication year, authors, and venue — were standardized and consolidated into a single pandas DataFrame for downstream processing. Stop words and non-informative terms were removed from the text using NLTK.

Stage 3: Term and keyword analysis. Once the dataset was prepared, text analysis techniques were applied to the abstracts of the articles to extract meaningful patterns. The analysis focused on:

a) Identifying the most frequent keywords and concepts
b) Detecting emerging terms using statistical weighting techniques
c) Analyzing thematic relationships between publications

From a mathematical perspective, the analysis relies on representing textual data as numerical vectors, enabling the application of similarity measures and clustering techniques. One of the core approaches used is the Term Frequency–Inverse Document Frequency (TF-IDF) model, which assigns weights to terms based on their importance within the corpus. This allows the identification of relevant concepts by balancing their frequency in individual documents against their distribution across the entire dataset.

	$Abstract_1$	$Abstract_2$	$Abstract_3$	...	$Abstract_n$
t_1	$1 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$	$0 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$	$1 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$	...	$1 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$
t_2	$0 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$	$1 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$	$1 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$	...	$1 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$
t_3	$1 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$	$1 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$	$0 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$	...	$0 * \log_{10}(\frac{n}{3+})$
t_4	$2 * \log_{10}(\frac{n}{4+})$	$1 * \log_{10}(\frac{n}{4+})$	$2 * \log_{10}(\frac{n}{4+})$	...	$2 * \log_{10}(\frac{n}{4+})$
t_5	$0 * \log_{10}(\frac{n}{2+})$	$2 * \log_{10}(\frac{n}{2+})$	$0 * \log_{10}(\frac{n}{2+})$	...	$1 * \log_{10}(\frac{n}{2+})$
...	...	...	...	...	...

Table. II. TF-IDF Representation Matrix for Scientific Abstracts.

In addition, similarity between documents is evaluated using vector-based metrics such as cosine similarity, which measures the angle between document vectors in a multidimensional space. This approach enables the detection of semantic relationships between articles, even when they do not share identical vocabulary.

$$Abstract_i = [0 * \log_{10}(\frac{n}{3+}), 1 * \log_{10}(\frac{n}{3+}), 1 * \log_{10}(\frac{n}{3+}), \ldots, 1 * \log_{10}(\frac{n}{3+})]$$
$$Abstract_j = [1 * \log_{10}(\frac{n}{3+}), 1 * \log_{10}(\frac{n}{2+}), 0 * \log_{10}(\frac{n}{2+}), \ldots, 0 * \log_{10}(\frac{n}{2+})]$$

$$DotProduct = (0 * \log_{10}(\frac{n}{3+}))(1 * \log_{10}(\frac{n}{2+})) + (1 * \log_{10}(\frac{n}{3+}))(1 * \log_{10}(\frac{n}{3+})) + \ldots + (1 * \log_{10}(\frac{n}{3+}))(0 * \log_{10}(\frac{n}{1+}))$$

$$\|Abstract_i\| = \sqrt{(0 * \log_{10}(\frac{n}{3+}))^2 + (1 * \log_{10}(\frac{n}{3+}))^2 + (1 * \log_{10}(\frac{n}{3+}))^2 + \ldots + (1 * \log_{10}(\frac{n}{3+}))^2}$$
$$\|Abstract_j\| = \sqrt{(1 * \log_{10}(\frac{n}{2+}))^2 + (1 * \log_{10}(\frac{n}{2+}))^2 + (0 * \log_{10}(\frac{n}{2+}))^2 + \ldots + (0 * \log_{10}(\frac{n}{1+}))^2}$$

$$Cos\,\theta = \frac{DotProduct}{\|Abstract_i\| \|Abstract_j\|}$$

Stage 4 — Abstract similarity analysis. To explore relationships between articles beyond shared keywords, the system compares abstracts using four complementary algorithms, each capturing a different dimension of textual similarity.

Method	Type	What it captures
Levenshtein distance	Character-based	Exact character-level differences between texts
Jaccard coefficient	Set-based	Proportion of shared terms between two abstracts
Dice coefficient	Set-based	Term importance weighted by corpus distribution

SBERT	Semantic	Contextual meaning regardless of vocabulary overlap

Table. III. Similarity Methods Used for Abstract Comparison and Semantic Analysis.

Stage 5 — Hierarchical clustering. To further explore the structure of the research field, hierarchical clustering techniques are applied. These methods group documents based on their similarity, generating tree-like structures that reveal thematic relationships and subgroups within the literature. From an algorithmic standpoint, these clustering methods iteratively merge documents or groups of documents according to defined distance criteria, allowing the identification of coherent thematic clusters.

$$d(C_i, C_j) = \frac{|C_i| \cdot |C_j|}{|C_i| + |C_j|} \left\| \overline{X}_i - \overline{X}_j \right\|^2$$

where $\overline{X}_i, \overline{X}_j$ are the centroids of each cluster.

The analysis also includes frequency-based techniques to identify dominant keywords, as well as statistical comparisons to detect emerging terms within the research field. These processes provide insight into how topics evolve over time and which concepts are gaining relevance.

Stage 6 — Visualization. Finally, several visualizations are generated to support the interpretation of results, including temporal trend graphs, geographic distribution maps, keyword frequency charts, and clustering diagrams. These visual tools facilitate the understanding of complex data patterns and make the results accessible to a broader audience.

III. RESULTS

This section presents the results obtained from each stage of the analysis pipeline. The findings are organized according to the four main analytical components of the system: keyword and term analysis, abstract similarity comparison, hierarchical clustering, and general bibliometric analysis of scientific production.

A. Keyword and Abstract Term Analysis

The analysis of keywords and terms extracted from article abstracts provides valuable insights into the dominant themes and emerging research directions within the field of Generative Artificial Intelligence in higher education.

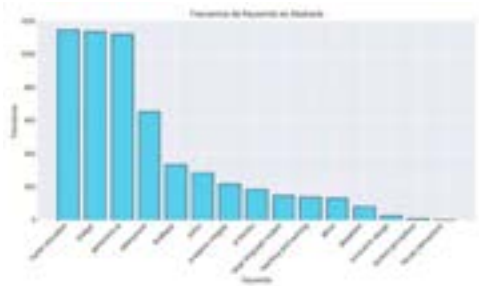


Figure. 1. Frequency of Keywords Identified in Scientific Article Abstracts.

The distribution of keyword frequency reveals that the most dominant terms in the dataset are *higher education*, *ChatGPT*, and *generative AI*. These results confirm that the current research landscape is strongly centered on the integration of generative technologies within academic environments.

The prominence of *assessment* and *feedback* indicates a significant focus on evaluation processes and how artificial intelligence is reshaping traditional assessment methods. This suggests that one of the primary concerns in the academic community is the impact of generative AI on learning evaluation and academic performance.

Additionally, the presence of terms such as *academic integrity*, *AI literacy*, and *ethics* highlights the growing attention to the challenges associated with the use of these technologies. These topics reflect concerns about responsible use, student learning autonomy, and the need to develop new competencies for interacting with AI systems.

Less frequent but still relevant terms, such as *curriculum design*, *student perceptions*, and *faculty perceptions*, suggest that research is beginning to expand beyond technological aspects toward pedagogical and institutional perspectives.

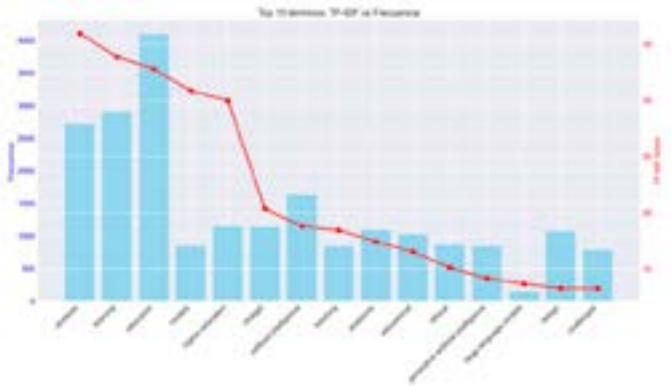


Figure. 2. Top Terms Identified Through TF-IDF Analysis and Their Frequency in the Dataset.

The TF-IDF analysis provides a complementary perspective by identifying terms that are not only frequent but also particularly relevant within the dataset. The results show that terms such as *students*, *learning*, and *education* have the highest importance scores, reinforcing the central role of the educational context in this research field.

Interestingly, while terms like *ChatGPT* and *generative AI* appear frequently, their relative importance in TF-IDF is lower compared to more general educational terms. This indicates that, although generative technologies are the focus of the studies, the discourse is strongly oriented toward their application in teaching and learning processes.

Other relevant terms include *design*, *teaching*, *academic*, and *educational*, which suggest a shift toward practical implementation and integration of AI into academic

environments. The presence of terms such as *ethical* and *challenges* also reinforces the idea that research is not only focused on opportunities but also on the limitations and risks associated with these technologies.

B. Keyword Matching and Analysis Precision

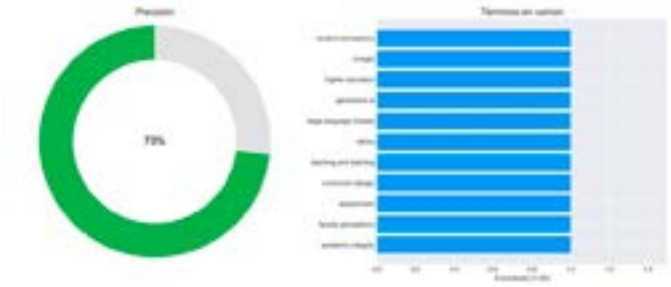


Figure. 3. Precision Evaluation and Common Keyword Matching Across Scientific Abstracts.

To evaluate the performance of the keyword detection process, a precision metric was computed by comparing the terms identified by the system against a predefined reference list of expected keywords associated with each article. The matching process was based on TF-IDF scoring, where the system ranked candidate terms by their weighted relevance within each abstract and compared the top-ranked terms against the reference list. Precision was then calculated as the ratio of correctly matched keywords to the total number of expected keywords in the reference list:

$$Precision = \frac{Matched\ Keywords}{Total\ Expected\ Matched\ Keywords}$$

This approach ensures that the evaluation is not based on simple string matching, but rather on whether the terms the system identified as most relevant — according to their TF-IDF weights — correspond to the keywords that domain experts would expect to find in each article. The system achieved a precision of approximately 73%, indicating that nearly three quarters of the expected domain-relevant terms were successfully identified within the abstracts. This level of accuracy reflects reliable performance given the inherent variability of natural language, where the same concept may be expressed through different terminology across different articles.

The identified terms — such as *ChatGPT*, *higher education*, *generative AI*, *ethics*, *teaching and learning*, and *academic integrity* — show strong consistency with the expected thematic focus of the dataset. This alignment supports the validity of the analysis and confirms that the TF-IDF-based detection approach is appropriate for capturing meaningful patterns across a large and diverse corpus of scientific literature.

C. Abstract Similarity Analysis Using Multiple Comparison Algorithms

In addition to keyword and term analysis, the developed system incorporates a functionality for comparing scientific article abstracts using multiple similarity algorithms. This feature allows the identification of relationships between articles based on textual and semantic similarity, providing a deeper understanding of how research topics are connected.

The comparison process is based on representing each abstract as a structured text unit and applying different similarity measures. These measures include both traditional string-based and vector-based approaches, allowing the analysis to capture different levels of similarity.

Method	Type	Strength
Levenshtein	Character-based	Detects exact textual differences
Jaccard	Set-based	Measures shared terms
TF-IDF + Cosine	Vector-based	Captures term importance
SBERT	Semantic	Captures contextual meaning

Table. IV. Abstract Similarity Techniques Implemented in the Analysis System.

This combination of approaches enables the system to compare abstracts from different perspectives, ranging from surface-level textual similarity to deeper semantic similarity.
The results obtained from these comparisons allow the identification of groups of related articles, even when they do not explicitly share the same keywords. This is particularly useful in the context of Generative Artificial Intelligence in higher education, where similar research topics may be described using different terminology.

Furthermore, this functionality supports the detection of thematic connections across the literature, enabling the exploration of how different research areas intersect. For example, studies focused on *assessment* may be closely related to those addressing *academic integrity* or *AI-supported learning*, even if these connections are not immediately evident through keyword analysis alone.

From an engineering perspective, this component demonstrates the importance of combining multiple algorithms to achieve a more robust and reliable analysis. Each method contributes a different perspective, and their integration allows for a more comprehensive understanding of the relationships between scientific publications.

D. Thematic Clustering and Dendrogram Analysis

To further explore the structure of research in Generative Artificial Intelligence applied to higher education, hierarchical clustering techniques were used to group articles based on the similarity of their abstracts. The results are visualized through dendrograms, which represent how documents are progressively grouped according to their level of similarity.

E. Hierarchical Clustering Using Average Linkage

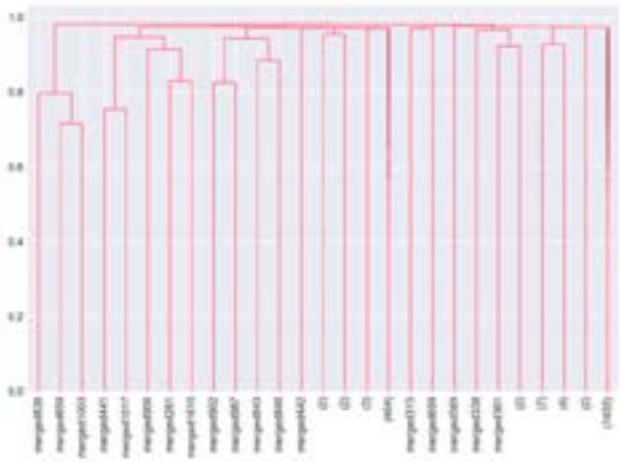


Figure. 4. Dendrogram Generated Using the Average Linkage Clustering Method.

The dendrogram obtained using the average linkage method shows a relatively uniform structure, where most documents are grouped at high similarity levels. The branches appear compressed toward the top of the diagram, indicating that many abstracts share common terms or general thematic similarities.

However, the lack of clearly separated clusters suggests that this method may not effectively distinguish between well-defined thematic groups. Instead, it tends to produce broader and less differentiated groupings, making it more difficult to identify specific research subtopics within the dataset.

F. Hierarchical Clustering Using Complete Linkage

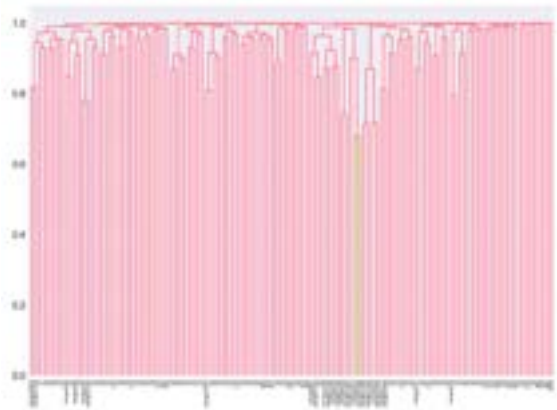


Figure. 5. Dendrogram Generated Using the Complete Linkage Clustering Method.

The complete linkage dendrogram presents a more dispersed structure compared to the average linkage approach. In this case, the distances between clusters are more pronounced, and some branches extend further down the hierarchy, indicating stronger separation between certain groups of documents.

Despite this improvement in separation, the clustering still shows a high degree of fragmentation, with many small clusters and limited cohesion within groups. This suggests that while the method increases sensitivity to differences between abstracts, it may over-separate documents that belong to related research areas.

G. Hierarchical Clustering Using Ward Linkage

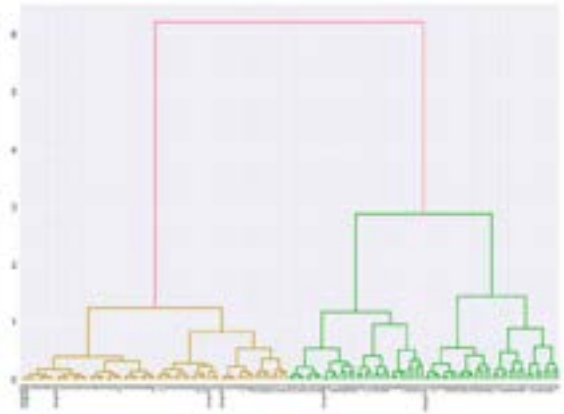


Figure. 6. Dendrogram Generated Using the Ward Linkage Clustering Method.

The dendrogram produced using the Ward linkage method shows a significantly clearer and more structured grouping of documents. In contrast to the previous methods, this approach forms well-defined clusters that merge at lower levels of the hierarchy before joining larger groups.

Two major clusters can be clearly identified, each representing distinct thematic areas within the dataset. This indicates that the Ward method is more effective in capturing coherent groupings of research topics, minimizing internal variance within clusters while maximizing separation between them.

The hierarchical structure observed suggests that the research field is not homogeneous but instead organized into distinct subdomains. These clusters likely correspond to different lines of research, such as pedagogical applications, technological implementations, and ethical considerations in the use of Generative Artificial Intelligence in higher education.

H. General Bibliometric Analysis of Scientific Production

The general bibliometric analysis provides a comprehensive overview of the structure, evolution, and distribution of research on Generative Artificial Intelligence in higher education. This analysis is based on the aggregated information extracted from the abstracts and metadata of the collected scientific articles.

I. *Geographic Distribution of Publications*



Figure. 7. Geographic Distribution of Scientific Publications Based on the Country of the First Author.

The geographic distribution of scientific production reveals a strong concentration of research activity in a limited number of countries. The highest levels of publication are observed in regions such as North America, East Asia, and parts of Europe.

Countries such as the United States and China show a significantly higher number of publications compared to other regions, indicating their leading role in the development of research on Generative Artificial Intelligence in higher education. Other countries, including Australia and several European nations, also contribute notably to the field, although to a lesser extent.

In contrast, large portions of Africa, South America, and some regions of Asia present relatively low levels of scientific production. This uneven distribution suggests the existence of a global research gap, where access to technological resources and research infrastructure may influence the level of participation in this emerging field.

J. *Temporal Evolution and Research Consolidation*

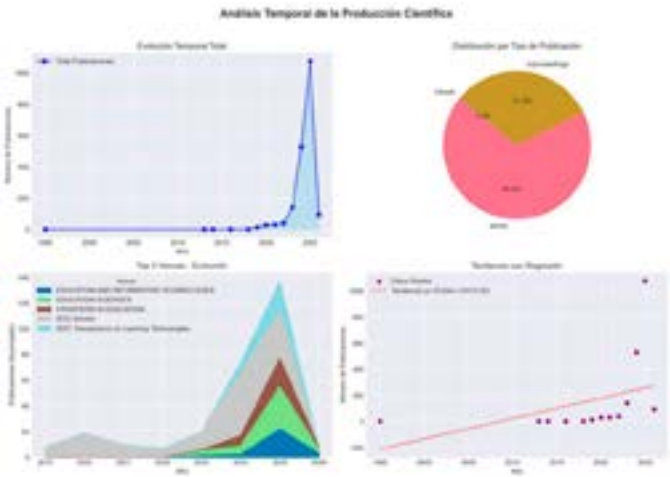


Figure. 8. Temporal Evolution of Scientific Production, Publication Types, Top Venues, and Regression Trend Analysis.

The temporal analysis of scientific production reveals a clear growth pattern in research related to Generative Artificial Intelligence in higher education. For several years, the number of publications remained relatively low and stable; however, a significant increase is observed in recent years, with a sharp peak around the most current period. This indicates that the field is rapidly expanding and gaining increasing attention within the academic community.

The distribution by type of publication shows that journal articles constitute the majority of contributions, followed by conference proceedings, while other formats such as book chapters represent a minimal proportion. This suggests that the research field is not only active but also progressively consolidating through formal academic dissemination channels.

The analysis of top publication venues further supports this trend. A small group of journals and conferences concentrates a significant portion of the scientific output, particularly in areas related to education, information technologies, and interdisciplinary research. The evolution of these venues shows a notable increase in recent years, indicating that the research community is beginning to converge around specialized platforms for publishing work on Generative Artificial Intelligence in higher education.

K. *Word Frequency and Conceptual Overview*

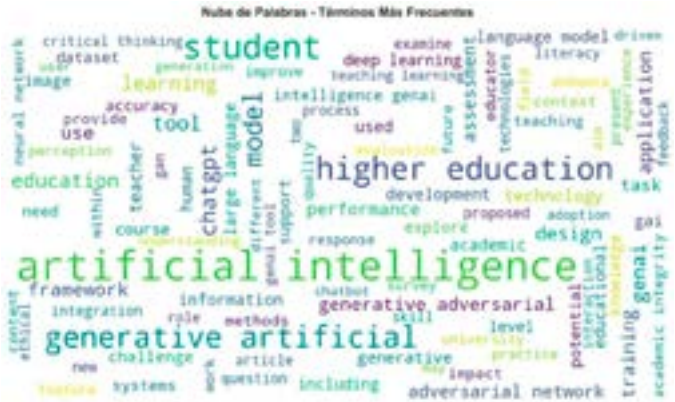


Figure. 9. Word Cloud Representing the Most Frequent Terms Extracted from Scientific Article Abstracts.

The word cloud provides a high-level visualization of the most common terms found in the abstracts. Terms such as *artificial intelligence*, *generative*, *student*, *learning*, and *higher education* appear prominently, indicating their central role in the research field.

The presence of words such as *model*, *performance*, *design*, and *application* suggests a strong focus on the development and implementation of AI-based solutions. At the same time, terms like *teaching*, *assessment*, and *interaction* highlight the educational dimension of the research.

Additionally, the appearance of terms related to *ethics*, *academic integrity*, and *critical thinking* reflects an increasing awareness of the broader implications of integrating Generative Artificial Intelligence into higher education.

IV. DISCUSSION

The keyword and term analysis revealed that the literature is strongly centered on educational processes rather than only on the technological dimension of Generative AI. Terms such as *higher education*, *ChatGPT*, *generative AI*, *assessment*, *feedback*, and *academic integrity* show that current research is focused on understanding how these technologies affect teaching, learning, and evaluation practices in universities. This finding is consistent with what has been reported in recent bibliometric work — a study drawing on 3,808 peer-reviewed articles identified six major thematic clusters including ethics, writing support, and assessment, and noted a transition from tool-based inquiry toward learner-centered concerns [5] — suggesting that the shift toward pedagogical and ethical dimensions is a broad and consolidated trend in the field.

The clustering analysis also showed that scientific production is organized into groups. Among the evaluated approaches, the Ward linkage method provided the clearest structure, suggesting that research in this field can be interpreted through different subdomains, including pedagogical applications, technological implementation, and ethical challenges. A systematic review on GenAI and academic integrity found that while these technologies can enhance educational engagement and efficiency, they also pose significant risks of academic dishonesty [3]. A tension that is directly reflected in the clustering results of this study, where academic integrity consistently emerges as a distinct and growing subgroup within the literature.

The general bibliometric results indicate a strong increase in publications in recent years, as well as a concentration of scientific production in countries with greater technological and academic capacity. This suggests that, although Generative AI in higher education is a global topic of interest, there are still important gaps in participation among regions. This geographic concentration has been confirmed by other analyses, which found that contributions are led by the United States, China, and the United Kingdom, with rising but still unequal participation from non-Western institutions. The growth pattern is equally striking, recent work reported a 67% annual growth rate in this research area, with output tripling from 353 articles in 2023 to 927 in 2024, coinciding directly with the release of ChatGPT [4]. The temporal trends identified in the present study align with this trajectory, reinforcing that 2022 represents a clear inflection point in research activity in this field.

A key distinguishing aspect of this work is the automated and reproducible pipeline used to generate these findings. Unlike studies that rely primarily on manual curation or visualization platforms such as VOSviewer, the system developed here integrates data collection, deduplication, TF-IDF-based keyword detection, multi-algorithm abstract similarity comparison, and hierarchical clustering into a single end-to-end Python application. This approach enables the simultaneous application of five distinct similarity measures — from character-level Levenshtein distance to semantic SBERT embeddings — providing a richer characterization of relationships between articles than keyword co-occurrence networks alone can offer. The full source code is openly available at https://github.com/juanjarce/biblometric_app/tree/article, allowing other researchers to apply the same pipeline to different domains or extend the analysis with new data sources.

V. CONCLUSION

This study presented a bibliometric analysis of research on Generative Artificial Intelligence in higher education, supported by an automated software tool for collecting, processing, and analyzing scientific literature. The results show that this field has experienced rapid growth in recent years, especially in topics related to AI-supported learning, assessment, academic integrity, ethics, and human–AI interaction.

This work contributes not only by mapping the current state of research on Generative AI in higher education, but also by demonstrating the value of engineering, automation, algorithms, and natural language processing as tools for understanding scientific trends. Future work may include expanding the databases analyzed, incorporating additional languages, and applying more advanced topic modeling techniques to improve the identification of emerging research lines.

REFERENCES

[1] E. Kasneci, K. Seßler, S. Küchemann, M. Bannert, D. Dementieva, F. Fischer, U. Gasser, G. Groh, S. Günnemann, E. Hüllermeier, S. Krusche, G. Kutyniok, T. Michaeli, C. Nerdel, J. Pfeffer, O. Poquet, M. Sailer, A. Schmidt, T. Seidel, M. Stadler, J. Weller, J. Kuhn, and G. Kasneci, "ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education," *Learning and Individual Differences*, vol. 103, p. 102274, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.lindif.2023.102274.

[2] O. Zawacki-Richter, V. I. Marín, M. Bond, and F. Gouverneur, "Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators?" *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, vol. 16, Art. no. 39, Oct. 2019, doi: 10.1186/s41239-019-0171-0.

[3] H. Imran and N. Almusharraf, "A bibliometric analysis of research on ChatGPT in education," *International Journal of Technology in Education*, vol. 7, no. 1, pp. 1–20, 2024. [Online]. Available: https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1415052.pdf

[4] A. Al-Khateeb, "Generative AI in education: Mapping the research landscape through bibliometric analysis," *Information*, vol. 16, no. 8, p. 657, Jul. 2025, doi: 10.3390/info16080657R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," J. Name Stand. Abbrev., in press.

[5] K. Dai, Y. Liu, and X. Zhang, "Generative AI in higher education: A bibliometric review of emerging trends, power dynamics, and global research landscapes," *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 2026, doi: 10.1016/j.caeai.2026.100544.

Evaluación experimental de la energía vibratoria en suelos intervenidos con zanjas ante una detonación

Gina Marcela Vivas Lòpez
Facultad de Ingenierìa Civil Escuela Militar de Cadeted General Jose Maria Cordova
Bogotà,Colombia line 5: ginamarcelavivaslopez@gmail.com

Andrés Gutiérrez Fernández
Facultad de Ingenierìa Civil Escuela Militar de Cadeted General Jose Maria Cordova
Bogotà,Colombia line 5: Pipeafgf@gmail.com

León Bolívar Héctor Stiven
Facultad de Ingenierìa Civil Escuela Militar de Cadeted General Jose Maria Cordova
Bogotà, Colombia
hectorestivenleon@gmail.com
line 5: hectorestivenleon@gmail.com

Velandia Mesa Eduardo
Facultad de Ingenierìa Civil Escuela Militar de Cadeted General Jose Maria Cordova
Bogotà, Colombia
line 5: velandiaestiven5@gmail.com

Resumen**—***Este proyecto estudió el comportamiento de un terreno intervenido con zanjas a diferentes profundidades, expuesto a vibraciones generadas por energías derivadas de una explosión controlada. Lo anterior permitió realizar avances en el estado del arte de las energías de trabajo y desperdicio resultantes de una detonación, con el fin de establecer criterios de diseño y análisis que permitan lograr un menor impacto o determinarlo en las construcciones adyacentes cuando se liberen este tipo de energías. Para el desarrollo de este trabajo de investigación se aplicaron competencias propias de la formación del ingeniero civil, aplicación de principios de física representada en las vibraciones como un fenómeno de transmisión de energía, evidenciado en la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio – suelo con zanjas con diferentes profundidades; adicionalmente se desarrollaron competencias para la experimentación en campo, tratamiento y análisis de datos, cálculo de materiales de ingeniería – ej. Cálculo de carga explosiva con ANFO con base en sistemas de iniciación y las características técnicas del material. Por otro lado, se propició la investigación formativa indagando por la normatividad nacional e internacional. Para el monitoreo, la medición y registro de las vibraciones en el terreno circundante, se realizó por medio de un sismógrafo de sistema de captación triortogonal con tres geófonos, que permitieron medir la velocidad en las tres direcciones que conforman los componentes de onda (longitudinal, vertical y transversal). Los resultados generaron conocimiento y contribuyeron a la obtención de la data experimental en materia de vibraciones producto de detonaciones, se analizó el comportamiento del suelo, las vibraciones generadas por explosivos a través de los parámetros básicos para el análisis de onda como la amplitud, magnitud o valor de la velocidad de pico de partícula (VPP), aceleración, frecuencias y el desplazamiento. Se realizó una evaluación en términos de cumplimiento de la normatividad internacional, que permitió formular recomendaciones para el diseño y construcción de estructuras complementarias para los lugares de almacenamiento de explosivos, mitigando el impacto de las ondas después de una detonación; lo que permitió hacer una transferencia de conocimiento desde la academia a la institucionalidad – Fuerzas Militares-, hacía la industria - empresas mineras - y a la propia comunidad académica*

Palabras Clave— *(Vibraciones, detonaciones, explosivos, energias de trabajo, terreno circundante)*

I. Introduction

En Colombia es habitual el uso y almacenamiento de explosivos tanto en unidades militares como en empresas vinculadas al sector de la minería (carbón, oro, esmeraldas) y al sector de la construcción (empresas de materiales, obras de infraestructura), por lo cual los accidentes por explosivos constituyen una amenaza latente. Esto obliga a evaluar los riesgos asociados con fallas en los protocolos de manipulación, transporte y almacenamiento de explosivos.

Por mandato constitucional artículo 223 [1] señala que la importación y fabricación del material explosivo es exclusivamente del estado y la autoridad competente son las

fuerzas militares, por lo tanto en las diferentes unidades militares del Ejército Nacional, se encuentran estructuras de almacenamiento de explosivos expuestas a posibles detonaciones, como los son depósito de explosivos, polvorines, depósitos de armamento, bases fijas entre otras, para las cuales se deben construir con diseños adecuados que garanticen un mejor desempeño estructural ante una explosión, generando un menor impacto ante las energías de trabajo y desperdicio producto de la detonación, en las construcciones adyacentes, pero sobre todo salvaguardar vidas humanas que se encuentran cerca de estas construcciones.

Un ejemplo ilustrativo ocurrió el 30 de diciembre de 2007 en Medellín, en el depósito de armamento de la Brigada Móvil 11, donde una explosión provocó la desaparición de seis militares y dejó ocho heridos. Casos como este evidencian la necesidad de analizar e instrumentar los impactos de una detonación, no solo desde la perspectiva de la destrucción, sino también de los efectos colaterales.

Estas situaciones han motivado la revisión de los criterios de seguridad en normativas de diseño de instalaciones sensibles, tales como polvorines y depósitos de armamento. Sin embargo, mientras que los estudios se han concentrado principalmente en la resistencia del concreto y otros materiales frente a explosiones, se dispone de menor información sobre las energías de desperdicio generadas, como ondas sonoras, proyección de ondas transversales, radiales, verticales y, especialmente las vibraciones en el terreno circundante.

Entre las energías de desperdicio, las más críticas son las vibraciones, la onda aérea y el ruido, pues determinan las afectaciones sobre estructuras vecinas y comunidades aledañas, Su intensidad varía de acuerdo con el tipo y la carga de explosivo detonado y por supuesto, la distancia del punto al lugar de ejecución de la voladura

En el tema de normatividad al realizar una revisión se pudo evidenciar que las regulaciones sobre vibraciones generadas por voladuras son elementales para garantizar la seguridad y el bienestar de la comunidad y del medio ambiente. En Colombia, la normativa sobre seguridad en almacenamiento de explosivos está representada por documentos como la Ficha Técnica IM FE GIN IF 021 de INDUMIL (2016) [2], que regula la construcción de polvorines. No obstante, esta normativa carece de actualizaciones que incluyan criterios relacionados con el impacto de vibraciones en estructuras y suelos adyacentes. Esta ausencia de lineamientos técnicos ha contribuido a que persista la vulnerabilidad de las instalaciones militares y civiles, en las que no solo están en riesgo bienes materiales, sino también vidas humanas. [2]

Este estudio se centró en establecer si dichas energías producidas por una detonación pueden mitigarse mediante la construcción de zanjas perimetrales, midiendo su efectividad con geófonos de equipos sismográficos a diferentes profundidades, medidas por la velocidad pico de partículas (VPP); los resultados obtenidos de la propagación de la onda, fueron comparados con la disipación de energía. aportando datos experimentales y verificables para mejorar los diseños de estructuras destinadas al almacenamiento y manejo de explosivos.

Finalmente, se busca comprobar si la implementación de zanjas funciona como un medio disipador de ondas, planteando ello una alternativa técnica y económica que reduzca la propagación de energía generada a causa de una detonación. El estudio de la velocidad de partícula, permitirá contribuir al desarrollo e implementación de medidas qué mitigan los efectos causados por la vibración en el terreno, siendo aplicables en diferentes ámbitos de la ingeniería, como proyectos de minería, construcción y desarrollo de obras civiles; aportando así, no solo al conocimiento técnico si no a la implementación de prácticas seguras, sostenibles y económicas que mitiguen daños estructurales en el sector circundante a las detonaciones, impactos negativos que generen molestias a la población civil que habita en áreas aledañas al sector en cuestión

II. Marco Normativo

El control de vibraciones generadas por explosivos en actividades como la minería o construcción está regulado internacionalmente por diversas normas que establecen límites para proteger estructuras y personas. Para el desarrollo de esta investigaciòn se tomo como referencia la norma americana USBM RI 8507, elaborada por el U.S. Bureau of Mines. Esta norma presenta un espectro basado en la combinación de velocidad y desplazamiento de partículas, definiendo niveles seguros de vibración para diferentes tipos de estructuras. Es utilizada frecuentemente en estudios técnicos debido a su enfoque práctico y su amplio respaldo investigativo. [3]

Otra norma de referencia es la alemana DIN 4150, revisada en el año 2001, es considerada una de las más estrictas a nivel internacional. Esta norma establece límites máximos de velocidad de vibración de la partícula (PPV) en función del tipo de estructura y la frecuencia de las ondas sísmicas. Por ejemplo, para edificaciones muy delicadas, los valores permitidos van desde 3 mm/s hasta 10 mm/s dependiendo de la frecuencia; para viviendas comunes, de 5 mm/s a 20 mm/s; y para edificaciones industriales, hasta 50 mm/s. En los registros de vibración analizados dentro del documento, las frecuencias y velocidades se mantienen por debajo de los límites de esta norma, lo que sugiere que no se generarán daños estructurales, aunque las vibraciones sí podrían ser perceptibles para las personas. Es importante destacar que esta norma también tiene secciones que abordan los efectos sobre personas y las condiciones de medición. [4]

Dentro de los referentes internacionales la ISO 4866:2010 eestablece las pautas para realizar mediciones y evaluaciones de vibraciones en estructuras fijas como túneles, edificios, puentes entre otros. Examina métodos de medición como explosiones, terremotos, huracanes, ruido aéreo, maquinaria interna. No aplica a estructuras nucleares o presas. Esta norma puede servir para la evaluación y el control de las vibraciones generadas por voladuras porque proporciona directrices para la medición, el procesamiento y la evaluación de los efectos que pueden tener;

también proporciona pautas para seleccionar los métodos para registrar las mediciones y evaluar los efectos determinando valores y frecuencias límites. [5]

Una de las mas especificas en el tema de voladuras es la Norma Española UNE-22-381-93:"Control de vibraciones producidas por voladuras" tiene como finalidad establecer un procedimiento y control a las voladoras producidas en trabajos de explotación, demoliciones, minas y otras técnicas en las que se requiera el uso de explosivos. Distingue tres grupos de estructuras: Los edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas (Grupo I); los Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa legal vigente. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presente especial sensibilidad a las vibraciones (Grupo II); y, las estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener (Grupo III). [6]

La Norma Técnica Colombiana, NTC 4079 – (ICONTEC) trata lo relacionado con las vibraciones aspectos como los efectos en la salud, las medidas de seguridad (tiempos de exposición), clasifica las vibraciones y los medios o elementos que se deben tener en cuenta para medir y evaluar las vibraciones. Esta norma, permite tener criterios para la evaluación y control de las vibraciones generadas por voladuras, estableciendo límites de seguridad para la prevención de daños. [8]

La NTMD-249 es una Norma Técnica Militar del Ministerio de Defensa de Colombia que establece los requisitos y procedimientos para el almacenamiento seguro de armas, municiones y explosivos, incluyendo definiciones, clasificación de materiales, criterios constructivos para depósitos (polvorines), medidas de seguridad activas y pasivas, señalización, control de acceso, separación y compatibilidad de productos, y procedimientos operativos y de inspección para minimizar riesgos de detonación, robo o incidentes durante el almacenamiento y manejo. Esta norma sirve como referencia técnica para la construcción y adecuación de almacenes militares y civiles que manipulen materiales explosivos, y complementa otras guías y decretos nacionales sobre explosivos y municiones. [7]

III. FUNDAMENTACION TEORICA

Para el desarrollo de este proyecto se estudiaron conceptos teóricos que permitieron el desarrollo esta investigación, estos conceptos están relacionados con detonaciones por explosivos, los impactos generados por estos, instrumentación y medición entre otros.

El decreto ley 2535 de 1993 en el título IV capitulo II en el **artículo 50.-** *Define.* "Explosivo como todo cuerpo o mezcla que en determinadas condiciones puede producir rápidamente una gran cantidad de gases con violentos efectos mecánicos o térmicos" [9]. las explosiones se clasifican según su origen en físicas, químicas y nucleares, después de una detonación por explosivos se generan unas energías de trabajo que generan fragmentación por la energía y energías de desperdicio como son la temperatura, presión, proyección de material y la vibración que es la que se estudiara en esta investigación.

La capacidad que tienen los explosivos para fragmentar y desplazar un material se conoce como potencia, esto se refiere al trabajo energético resultante de la explosión. Esta energía resultante total, se clasifica en dos tipos, la energía de choque que fractura la roca y la energía de gases que fragmenta más el material y lo proyecta. [9]

Para la selección del explosivo a utilizar en este trabajo se realizó un estudio que permitió identificar la clasificación de estos así:

Los explosivos de alto régimen ~~se~~ clasifican en primarios y secundarios, dependiente de su aplicación. Los primeros, se caracterizan por su sensibilidad y el manejan altas energías y se utilizan para iniciar a los explosivos secundarios. Entre ellos se encuentran los compuestos o sustancias químicas presente en los detonadores. Los explosivos secundarios son aquellos que se utilizan para el arranque y rotura de las rocas, se caracterizan por ser menos sensibles que los primarios, y se utilizan tanto en proyectos de obras civiles como mineros e industriales como en proyectos militares, los explosivos secundarios son menos sensibles al maltrato, más caros y más estables, pero por su bajo volumen de gases teniendo algunos no aplicación práctica en voladura de rocas en minería, ver figura 1. [10].



Figura 1. Clasificación de los explosivos

Otra forma práctica de clasificarlos es por sensibilidad y función en el sistema de iniciación: los explosivos primarios (muy sensibles) se usan en iniciadores y detonadores porque reaccionan con impacto, fricción o calor; los explosivos secundarios son menos sensibles y constituyen las cargas principales que requieren un iniciador para detonar; y los blasting agents o agentes de voladura (p. ej. ANFO sin sensibilizar) son materiales relativamente insensibles que, si se les provee la iniciación adecuada (booster), realizan el trabajo de voladura.

La detonación de explosivos en operaciones mineras o de construcción genera ondas sísmicas que se propagan a través del terreno. Este fenómeno, conocido como vibración, se produce por la liberación instantánea de una gran cantidad de energía que comprime el medio circundante. Las características de estas ondas, como su amplitud y frecuencia, dependen de factores como la cantidad de explosivo utilizado, la distancia al punto de detonación, las propiedades geológicas del terreno y la geometría de la carga explosiva. La propagación de estas ondas se ve influenciada por la presencia de discontinuidades en el medio, como fracturas o estratos rocosos, que pueden dispersar o reflejar la energía. Es fundamental comprender estos mecanismos para evaluar el impacto ambiental de las voladuras, diseñar planes de disparo que minimicen las vibraciones y garantizar la seguridad de las personas y estructuras cercanas.

Para el desarrollo de este trabajo se eligió el ANFO teniendo en cuenta que es un explosivo tipo agente de voladura, lo cual es intermedio en energía desperdicio (vibraciones) y energía de trabajo como son las energías de choque y de burbuja. El ANFO, está compuesto por una mezcla de nitrato de amonio, biodiesel o mezclas de hidrocarburos, sensible a la iniciación por un multiplicador – Pentofex, con poca resistencia a la humedad e inadecuado para operaciones subterráneas. Es muy seguro durante su manipulación y uso. Permite ser cargado en forma manual o neumática en los barrenos. Es empleado en voladuras a campo abierto tales como: minería o explotación de rocas blandas o semiduras en canteras y en obras civiles. Se emplea como explosivo carga de columna.

El ANFO como agente de voladura presenta una densidad de 0,85 ± 0,05 g/cm³, sin resistencia a la humedad, y un diámetro crítico de 75 mm; en balística su velocidad de detonación es 3.000 ± 300 m/s (medida en tubo de PVC de 43" iniciado con multiplicador Pentofex de 337,5 g), su potencia absoluta en volumen (ABS, teórico) es 3 169,41 J/cm³ y su potencia absoluta en peso (AWS, teórico) es 3 726,25 J/g. [11]

Vibración

Se conoce como vibración al fenómeno por el cual se trasmite energía, esto es producto de la propagación de un movimiento ondulatorio, pudiendo abarcar grandes distancias. [12] Al producirse una detonación en el terreno, son generadas ondas de diferentes características las cuales son propagadas en muchas direcciones. Esta liberación genera una propagación de ondas de esfuerzo de múltiples tipos [12]

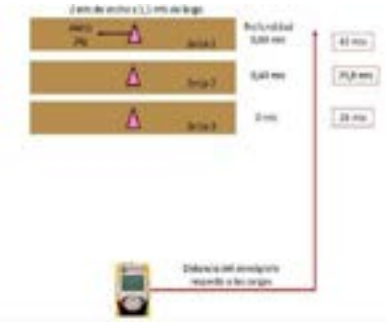
Las ondas de choque se generan por una onda de presión en el aire, estas ondas son fluctuantes y por esta frecuencia se produce ruido, éste podrá determinarse si se calcula la sobrepresión que lo genera. Los parámetros que se consideran principalmente para estos cálculos son la amplitud (incremento o disminución de la presión del aire, expresado en unidades de presión, es muy usual recurrir a los dB lineales), frecuencia (Hz, cantidad de vibraciones por segundo, duración (s), impactando en la energía total absorbida por la estructura.

IV. METODOLOGÌA

El desarrollo del trabajo de campo, se inicia con la ubicación del área de trabajo en el sector de Mondoñedo, con la planificación logística y técnica, en la cual se verificaron las condiciones de seguridad establecidas en el Manual de normas de seguridad contra accidentes, ejército nacional. EJC 1-22004, los permisos requeridos, En el sitio, figura 2, se efectuó un reconocimiento directo del área de intervención, para identificar las características topográficas, condiciones del terreno y posibles zonas de riesgo, para la construcción de las diferentes zanjas de 0,8 y 0,4 metros.



Figura 2. Zona de pruebas Mondoñedo



Posteriormente, se realizó un esquema, representando de manera inicial la disposición del terreno y planificar la ubicación de los puntos de prueba, marcando las áreas específicas donde se ejecutarían las actividades experimentales y se verifico que cumplieran los parámetros de seguridad requeridos. Figura 3.

Figura 3. Zona de pruebas Mondoñedo



Se utilizaron 3 bolsas de 2 kilogramos de ANFO a nivel del suelo, empleando como sistema de iniciación un booster para

intensificar la detonación. Se realizó el alistamiento del material explosivo. Se verificó la instalación de las cargas de ANFO para realizar la ejecución de la detonación; bajo supervisión técnica y cumpliendo los protocolos de seguridad, se ejecutó la detonación controlada en el área.

Las 3 cargas de explosivos para realizar las pruebas se ubicaron de la siguiente manera, ver figura 4, cada carga se puso sobre la zanja el primero se puso en una zanja de 2 metros de ancho, por 1 metro de largo y 0,80 metros de profundidad, el segundo explosivo se puso a 13,20 metros del primer explosivo, en una zanja de 2 metros de ancho, por 1 metro de largo y 0,40 metros de profundidad y el tercer explosivo se puso a una distancia de 15 metros del segundo explosivo a nivel de la superficie suelo, después de haber puesto las cargas explosivas, se procedió a poner el sismógrafo, este mismo fue ubicado a una distancia de 43 metros del primer explosivo, 29,8 metros del segundo explosivo y 28 metros del tercer explosivo, con la ayuda de la cinta métrica se hizo la medición, y verificación dos veces, después de terminar la instalación de los sensores del sismógrafo, se retiró el personal del área de detonación y se trasladó a un área segura, verificando que todo estuviera acorde para realizar la detonación, activándose el sismógrafo y el sistema de iniciación a base de mecha de seguridad para detonar el explosivo. La detonación se desarrolló en un tiempo de 2 minutos y 44 segundos, la activación de las otras detonaciones tuvo una secuencia conforme a lo diseñado: la primera carga detonó inicialmente, la segunda carga tuvo una demora de 40 segundos y la tercera carga demoro 50 segundos respecto a la primera detonación. Finalizadas las detonaciones, se realizó la verificación de la zona de impacto para constatar los resultados y las condiciones de seguridad del lugar.



Figura 5 Carga estándar de 2 kilogramos

Finalmente, se retiró el sismógrafo, se verifico que estuviera en buenas condiciones sin daño alguno, se verifico que hubieran quedado cargadas las pruebas y se procedió a descargar las lecturas.



Figura 6. Sismogramo triaxial MINI –SEIS Pro, OPERATING MANUAL

INSTRUMENTACION Y MEDICIÓN

Durante la prueba de campo realizada, se utilizó un sismógrafo MINI-SEIS III PRO para medir las vibraciones instaló el sismógrafo Mini-Seis III, calibrando su orientación conforme al manual técnico; posteriormente, se verifico el estado de las baterías y la conectividad para su uso, Procesador de 32 bits y convertidor analógico-digital (A/D) de 16 bits,Memoria interna superior a 3,5 GB, con capacidad para almacenar hasta 4096 registros de onda (waveform) y registros, Batería sellada recargable de plomo-ácido, Rango sísmico máximo: 10.24 in/sec, Rango acústico máximo: 149 dB, Modo forma de Onda (Waveform), Modo histograma, Modo histograma / forma de Onda, Modo manual [13]

V. ANALISIS DE RESULTADOS

Durante estas pruebas se registraron tres sismogramas. Dos de las tres pruebas se realizaron en zanjas de 2 metros de ancho por 1,5 metros de largo, se modificó la profundidad para poder evaluar la influencia en cada propagación de las vibraciones. La primera zanja tuvo una profundidad de 0,8 metros, la segunda de 0,4 metros y la tercera correspondió a una detonación a nivel del suelo.

Figura 7. Lectura nivel de terreno

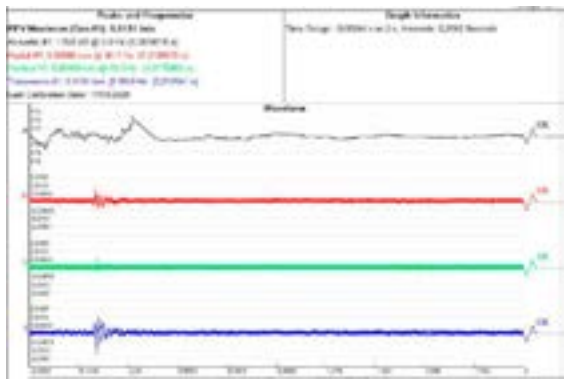


Figura 8. Lectura con 1,2m de profundidad

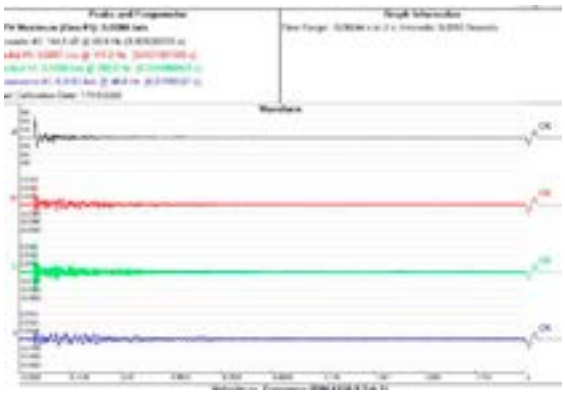


Figura 9 Lectura con 2,1m de profundidad

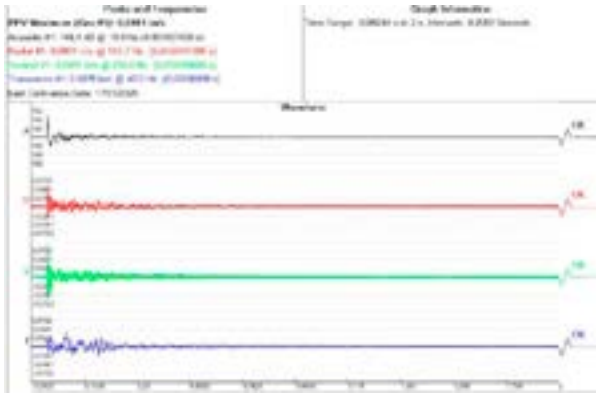
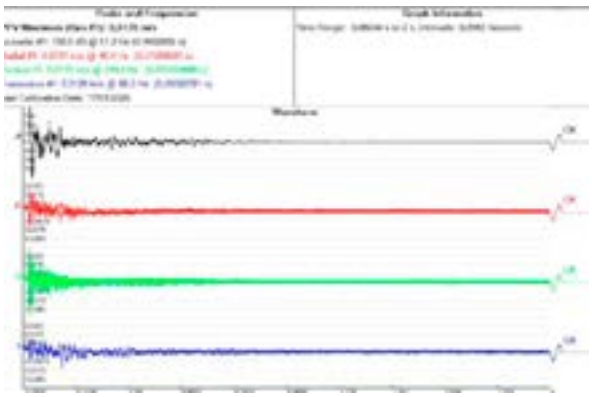


Figura10. Lectura nivel de terreno



Después de las lecturas se evidencio un determinado valor de velocidad pico de partículas (PPV) correspondientes a cada prueba; obteniéndose las velocidades de pico partícula para las vibraciones en los componentes, vertical, transversal y radial. Lo anterior, es debido al empleo de un sismógrafo triaxial. La tabla sismogramas, presenta los resultados de velocidad de pico de partícula de las vibraciones obtenidos en los sismogramas para cada uno de los componentes de las vibraciones a nivel vertical, transversal y radial.

con el objetivo de comparar los datos anteriormente mencionados se realizó una tabulación en Excel para posteriormente compararlos con la ayuda de graficas principalmente se realizó la comparación ente las 3 pruebas de la velocidad pico de partículas (PPV)

Se observó una disminución progresiva de la PPV conforme aumenta la profundidad, indicando que cuando el explosivo se encuentra confinado va tener una atenuación en la vibración vertical y la acompaña el desplazamiento del espectro hacia las frecuencias más elevadas mientras la zanja es más profunda.

Figura 11. Lectura nivel de terreno

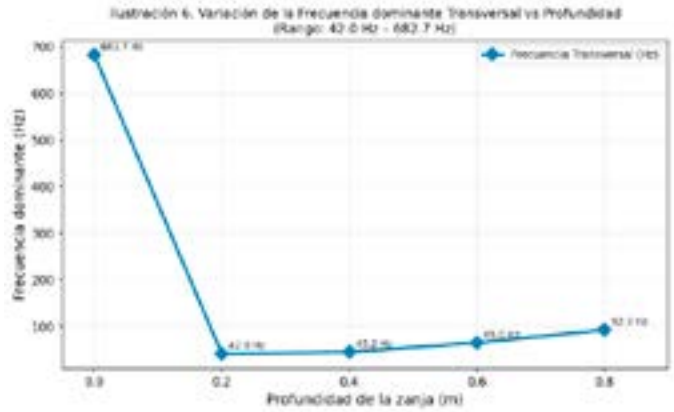


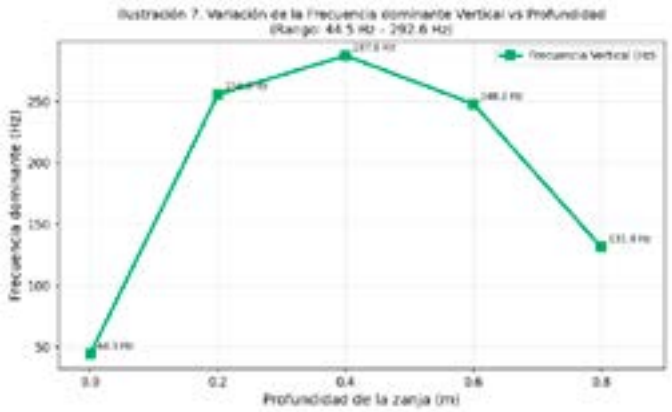
Figura 12. Lectura con 1,2m de profundidad



Figura 13. Lectura con 2,1m de profundidad



Figura 14. Lectura nivel de terreno



Debido a que el sismógrafo es un instrumento triaxial, tuvo lecturas de lo que paso en estos 3 campos, como se puede observar en las imágenes anteriores, al colocar en una gráfica y comparar los resultados obtenidos en las pruebas de campo realizadas se evidencia que se presentó un comportamiento totalmente similar a los valores de la gráfica descendente de la velocidad pico de partículas. esto sucede debido a que al momento de la explosión se generan ondas cortas (alta frecuencia) tienen longitudes de onda pequeñas, muchas veces del mismo orden o incluso menores que el ancho o la profundidad de la zanja. Debido a esto, pueden bordear el obstáculo o refractarse a través de él con menos pérdida de energía, ya que el cambio de medio no representa una discontinuidad tan grande en comparación con su tamaño de onda. Dejando como resultado que al pasar por las zanjas los componentes de alta frecuencia se vuelvan dominantes aumentando así su contenido de alta frecuencia, siendo esto representado como un incremento de HZ en los registros sísmicos.

Las mediciones obtenidas evidencian que la **velocidad pico de partículas (PPV)** cambia significativamente dependiendo de la profundidad de la zanja. La prueba realizada con el explosivo ubicado directamente a nivel del suelo arrojó un valor de PPV de 0.123 in/s, mientras que la carga situada a 0.4 metros de profundidad por dentro de la zanja presentó una PPV de 0.0275 in/s, y la más profunda, ubicada a 0.8 metros dentro de la zanja, registró una PPV de apenas 0.0156 in/s. Esta diferencia marca una clara tendencia: a mayor profundidad, menor es la transmisión de energía vibratoria hacia la superficie. Esto demuestra que, al contener mejor la explosión, se reduce la energía desperdiciada y se controla mejor el impacto en el entorno.

Además, se observó que las frecuencias registradas (en Hz) se comportaron de manera inversa a la PPV. Es decir, a medida que las zanjas fueron más profundas, las frecuencias medidas en las componentes vertical, radial y transversal aumentaron. Este fenómeno se debe a que las explosiones generan ondas de alta frecuencia (ondas cortas) que, al interactuar con zanjas más profundas cuyas dimensiones son del mismo orden o menores que la longitud de ondas pueden refractarse o bordear los obstáculos sin perder mucha energía. Esto hace que el contenido de alta frecuencia se incremente en el registro del sismógrafo. Así, mientras las vibraciones fueron menores en intensidad, presentaron mayor cantidad de frecuencias altas.

Para la norma alemana DIN 4150, los valores de PPV por debajo de 0,20 in/s son considerados completamente seguros en estructuras livianas, donde no genera ningún tipo de daño estructural, en este caso, las mediciones obtenidas se encuentran por debajo de dicho parámetro, concluyendo así que no existe riesgo de afectación estructural en edificaciones cercanas bajo las condiciones que fueron ensayadas.

La norma americana USBM RI 8507 establece los límites de PPV en función de la frecuencia de vibración, en este ensayo se registraron frecuencias superiores a 40 Hz, donde el valor limite es aproximadamente de 0.75 in/s, así que con los valores obtenidos en el trabajo decampo, se indica quelas detonaciones que fueron realizadas se encuentran dentro de un rango completamente seguro, inclusive dentro de los criterios más exigentes de esta misma norma.

Los resultados obtenidos de las pruebas están por debajo de los umbrales críticos de la norma suiza SN 640 ya que esta norma propone limites más estrictos para edificaciones sensibles, donde tienen valores máximos de PPV de entre 0.1 y 0.2 in/s, así que se evidencia que las vibraciones generadas no alcanzan a producir daños perceptibles en personas o edificaciones cerca.

VI. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se demostró que la implementación de zanjas como medio disipador de energía, va a tener un efecto directo y favorable en cuanto a la reducción de la velocidad pico de partículas (PPV) que son generadas por una detonación, se pudo comprobar que a mayor profundidad de la zanja, va a ser menor la transmisión de las energías vibratorias, entonces esto va a contribuir plenamente en disminuir el impacto de las ondas sobre las estructuras cercanas. Así que por esta razón, se recomienda tener en cuenta la inclusión de estos métodos estudiados para la actualización para la construcción de polvorines". Para promover su aplicación en proyectos donde se pueda requerir mitigar los efectos que producen las vibraciones.

Se logró identificar de forma clara las dos principales formas de energía generadas durante la detonación: la energía de trabajo y la energía de desperdicio. La energía de trabajo es la que efectivamente se utiliza para fragmentar y mover el material del terreno, mientras que la energía de desperdicio se

manifiesta en forma de ruido, proyecciones no deseadas y vibraciones excesivas. En este caso, se notó que cuando la carga estaba a nivel superficial, gran parte de la energía se desperdiciaba, ya que no había un medio que la contuviera. En cambio, cuando las cargas estaban dentro de las zanjas en las profundidades de 0,4 y 0,8 metros respectivamente, se aprovechó más eficientemente la energía liberada.

Los resultados obtenidos durante la prueba de campo permitieron comprobar que la profundidad de la carga explosiva tiene una influencia directa sobre las vibraciones generadas en el terreno. A medida que la carga se ubica a mayor profundidad, se reduce significativamente la velocidad pico de partículas (PPV), lo que demuestra que el terreno absorbe mejor la energía liberada, minimizando así el impacto en estructuras cercanas y, por ende, una reducción significativa de las ondas, lo que confirma la efectividad de las zanjas como medio disipador de energía y mecanismo de control de vibraciones en entornos sensibles y urbanos.

Por otro lado, se observó un comportamiento inverso en cuanto a la PPV y las frecuencias registradas en los tres componentes vertical, radial y transversal. A pesar de que la PPV disminuyó con la profundidad, las frecuencias aumentaron. Esto se debe a que, al confinar la carga en zanjas más profundas, las ondas generadas tienden a presentar longitudes de onda más cortas y frecuencias más altas, producto del confinamiento del explosivo. Esta información resulta valiosa para comprender el tipo de onda que predomina en cada configuración y para predecir cómo se comportarán las vibraciones en diferentes entornos y aportando información para diseños de medidas de control y seguridad.

Asimismo, fue posible identificar claramente la diferencia entre la energía útil y la energía de desperdicio generada por las detonaciones. En las cargas superficiales, una mayor proporción de la energía se pierde en forma de ruido, proyección de partículas y vibraciones no deseadas. En cambio, cuando las cargas son confinadas a mayor profundidad, la energía se aprovecha de forma más controlada y eficiente, lo que resulta más favorable para el objetivo de la voladura y más seguro para el entorno.

El análisis realizado con las normas y los resultados nos permite concluir que las vibraciones que son generadas por detonaciones controladas con cargas de ANFO en distintas profundidades de zanjas no va a representar ningún riesgo estructural ni ambiental. Ya que la tendencia nos dice que al aumentarla profundidad del confinamiento se va a reducir la velocidad pico de particular (PPV) y estos resultados se basan con los criterios de seguridad de las normas internacionales usadas.

Finalmente, se recomiendan unas pruebas de campo lejano para determinar con exactitud una distancia recomendada para la construcción de estructuras desde el punto de la explosión para así evitar afectaciones a estructuras cercanas ya que con los resultados obtenidos se puede determinar que el uso de una zanja disminuye la afectación cuando se habla de campo cercano y por esto también es recomendable la construcción de zanjas en los polvorines para prevenir y mitigar afectaciones causadas por explosiones.

BIBLIOGRAFIA

[1] Constituciòn Politica de Colombia, «articulo 223,» [En línea].

[2] INDUMIL, «Ficha Técnica IM FE GIN IF 021. Normas de seguridad para la construcción de polvorines. Industria Militar de Colombia.,» 2016. [En línea].

[3] USA: United States Bureau of Mines, «Report of Investigations 8507 (USBM RI 8507),» United States Bureau of Mines. [En línea].

[4] Deutsches Institut für Normung (DIN), «DIN 4150-3: Vibrations in buildings - Part 3: Influence on human perception. Editorial en formato PDF,» 1999. [En línea].

[5] Organización Internacional de Normalización (ISO), «Vibration of fixed structures (ISO 4866:2010). ISO,» 2010. [En línea].

[6] Unión Española de Explosivos, «Norma Española UNE-22-381-93,» 1993. [En línea].

[7] E. Nacional, «REGLAMENTO DE DOCTRINA Y PUBLICACIONES MILITARES DEL EJERCITO NACIONAL,» JUNIO 2017. [En línea].

[8] ICONTEC, «Norma Técnica Colombiana NTC 4079,» [En línea].

[9] G. normativo, «DECRETO 2535 DE 1993,» 17 diciembre 1993. [En línea]. Available: https://www.funcionpublica.gov.co/.

[10] C. O. S. J. A. R. O. Daniel Ruiz Valencia, «core,» 01 07 2007. [En línea]. Available: https://core.ac.uk/.

[11] INDUMIL, «ANFO agente de voladura,» [En línea]. Available: https://www.indumil.gov.co/producto/anfo- agente-de-voladura/.

[12] J. A. P. d. Blas, «PROBLEMÁTICA DE LAS VIBRACIONES EN LAS VOLADURAS,» 2002. [En línea]. Available:/VIBRACIONES_POR_VOLADURAS.pdf.

[13] I. SEISMOLOGY, «MINI-SEIS III Pro™,» [En línea].

[14] INDUMIL, «Ficha Técnica IM FE GIN IF 021. Normas de seguridad para la construcción de polvorines. Industria Militar de Colombia.,» 2016. [En línea].

Analysis of the Presence of Emerging Micropollutants in Domestic Wastewater from Cúcuta and Strategies for Treatment Using Advanced Oxidation Processes

[1] Daniela Valentina Machuca Durán
Department of the Environment, Biotechnology Engineering Program, Environmental Engineering
Francisco de Paula Santander University
Cúcuta, Colombia
danielavalentinamadu@ufps.edu.co

[2] Valentina Carrillo Blanco
Department of the Environment, Biotechnology Engineering Program, Environmental Engineering e
Francisco de Paula Santander University
Cúcuta, Colombia
valentinacabl@ufps.edu.co

[3] Dorancé Becerra Moreno
Department of the Environment, Biotechnology Engineering Program, Environmental Engineering
Francisco de Paula Santander University
Cúcuta, Colombia
dorancebm@ufps.edu.co

[4.] Nestor Andrés Urbina Suárez
Department of the Environment, Biotechnology Engineering Program, Environmental Engineering
Francisco de Paula Santander University
Cúcuta, Colombia
nestorandresus@ufps.edu.co

***Abstract* – The purpose of this research was to analyze the presence of emerging micropollutants in the wastewater of the city of Cúcuta, with a special emphasis on pharmaceutical compounds, given their relevance to public health and aquatic ecosystems. To this end, sampling was conducted at Caño Picho, the point where wastewater is discharged into the Pamplonita River. The wastewater was characterized at the water laboratory of the University of Francisco de Paula Santander. Subsequently, the physicochemical characterization of the wastewater was carried out, with the determination of the following parameters: COD, BOD, nitrogen compounds, phosphates, hydrocarbons, iron, and total suspended solids. Forty-three drugs from the groups of NSAIDs, antibiotics, antidepressants, lipid-lowering agents, gastrointestinal agents, antivirals, antidiabetics, anesthetics, and psychostimulants were identified using HPLC coupled with mass spectrometry. Based on the results obtained, carbamazepine was selected as the compound of interest for evaluation of its removal via an advanced oxidation process, specifically catalytic ozonation with magnetite. To this end, an optimal central response surface experimental design was employed, considering ozone concentration, magnetite concentration, and pH as variables to optimize the treatment's operating conditions and maximize contaminant removal efficiency. The physicochemical characterization revealed a high pollutant load, with COD and BOD concentrations of 963.7 mg/L and 596 mg/L, respectively. As for hydrocarbons, N-NH_4, P-PO_4, and Fe, the concentrations were 65.4 mg/L, 53.25 mg/L, 0.91 mg/L, and 1.23 mg/L, respectively. Regarding the determination of pharmaceuticals, 17 of the 43 evaluated compounds were identified, with carbamazepine being the most prevalent. The PAOx-catalyzed ozone treatment demonstrated efficient degradation of carbamazepine and a 82% reduction in COD. The experimental design enabled the determination of optimal values, which are currently being validated. Carbamazepine, meanwhile, is notable for its high environmental persistence and resistance to conventional treatments, which poses an ecotoxicological risk and raises concerns about chronic exposure in humans. This is why catalytic ozone with magnetite appears to be an interesting strategy for removing pharmaceuticals, primarily carbamazepine, thereby reducing the pollutant load and offering the potential for integration with a biological process capable of removing 100% of the pollutant load.*

***Keywords* - Pharmaceutical micropollutants, advanced oxidation processes, and catalytic ozone**

I. Introduction

Micropollutants are organic substances that include a broad spectrum of chemicals derived from common use [1]; their presence currently represents an emerging environmental concern because they enter water bodies through wastewater discharges, affecting ecosystem resources—primarily water resources and all surrounding biota and microbiota—as well as human [2], [3], [4]. International organizations such as the WHO (World Health Organization) and the EEA (European Environment Agency) have emphasized the importance of controlling these pollutants, encouraging countries to adopt environmental management policies and advanced technologies to mitigate their impacts and protect water resources globally [5].

In Colombia, however, there are no specific regulations for pharmaceutical compounds or endocrine disruptors in aquatic systems; however, paragraph 5 of Article 12 of Resolution 4143 of 2012 issued by the Ministry of Health and Social Protection prohibits the use of plastic materials containing bisphenol A (BPA) in contact with food or beverages intended for human consumption, as it is a common endocrine disruptor and is associated with various types of cancer despite its presence in low doses [6]. This provision demonstrates official recognition of BPA risks and seeks to prevent its indirect consumption. Furthermore, Resolution 0631 of 2015 establishes discharge parameters for certain chemical compounds in wastewater; however, it does not include pharmaceuticals, nor does it specifically regulate endocrine disruptors [7].

In Colombia, studies conducted in cities such as Bogotá, Tumaco, and Córdoba have found pharmaceutical micropollutants in wastewater. However, in Cúcuta, a border city in the eastern part of the country, there is still limited information on the occurrence of micropollutants in urban water systems. In particular, the Pamplonita River and the urban canals associated with Cúcuta's drainage system continuously receive domestic discharges that progressively degrade water quality [8].

TABLE I. CONCENTRATIONS OF VARIOUS PHARMACEUTICALS REPORTED IN COLOMBIA.

Drug	***City***	***Maximum concentration (ug/L)***	***Reference.***
Acetaminophen	Tumaco	293.8	[9]
Carbamazepine	Bogotá	1.515.000	[10]
Diclofenac	Pereira	78.7	[11]
Ibuprofen	Córdoba	10.21	[12]
Azithromycin	Tumaco	27.9	[9]

In this context, carbamazepine has been widely recognized as one of the pharmaceutical contaminants of greatest environmental concern due to its high chemical stability, low biodegradability, and limited removal by conventional treatments [13]. This compound is an antiepileptic and antidepressant drug with anticonvulsant and analgesic properties. It can be used for psychiatric disorders, to relieve trigeminal neuralgia, or for partial seizures [14]. It exhibits high persistence in aquatic environments and has been used as an anthropogenic marker in wastewater. Studies have shown that carbamazepine can have toxic effects on aquatic organisms, even at low concentrations, and can persist for long periods in surface and wastewater [15].

Due to the limitations of conventional treatments, advanced oxidation processes have emerged as an efficient alternative for the degradation of persistent pharmaceutical contaminants. Among these, heterogeneous catalytic ozonation has shown promising results due to its ability to generate highly oxidizing species, particularly hydroxyl radicals (•OH), which can transform recalcitrant organic compounds. The use of magnetite (Fe_3O_4) as a catalyst offers additional advantages, including its low cost, ease of magnetic recovery, and ability to enhance the formation of reactive oxygen species during the oxidative process [16].

In this context, the present study aimed to analyze the presence of pharmaceutical micropollutants in domestic wastewater from the Caño Picho sector (Cúcuta, Colombia) and to evaluate the removal of carbamazepine through a heterogeneous catalytic ozonation process assisted by magnetite (Fe_3O_4). To this end, the physicochemical and microbiological characterization of the wastewater was performed, pharmaceutical compounds were identified using HPLC-MS, and the treatment was optimized using response surface methodology to evaluate the effects of pH, ozone dose, and magnetite concentration on contaminant degradation efficiency.

II. METHODOLOGY

A. *Study area and sampling*

The study was conducted in the city of Cúcuta, in northeastern Colombia, on the border with Venezuela. Geographically, the city lies within the Pamplonita River basin, which serves as the primary receiving body for wastewater from the municipalities in the catchment area. For sampling, the Caño Picho sector was selected as the sampling point; this is the city's domestic wastewater discharge channel that flows into the Pamplonita River. This point was considered representative due to the influence of domestic discharges from different urban sectors of the city. The point was located at the geographic coordinates 7.931807°N, 72.488985°W

Sampling was conducted at specific times, with samples collected in containers that had been prepared for analysis. The samples were stored at 4°C during transport to the water laboratory at Francisco de Paula Santander University for physicochemical characterization and the determination of pharmaceutical compounds.

B. *Identification of pharmaceutical compounds*

High-performance liquid chromatography coupled with mass spectrometry (HPLC-MS) was used to identify and quantify emerging micropollutants. The Bioanalytics laboratory conducted the analytical screening at the Universidad del Valle.

Sample preparation began with a clarification step via filtration, followed by preconcentration and clean-up using solid-phase extraction (SPE), in accordance with EPA Method 1694. Subsequently, chromatographic analysis was performed using an ExionLC liquid chromatography system with a gradient mobile phase consisting of acetonitrile in 5 mM formic acid and 0.1% (v/v) formic acid, on a Synergy C18 column.

The analytical determination of the target compounds was performed using high-resolution mass spectrometry with an X500R quadrupole time-of-flight (Q-TOF) analyzer. Data acquisition was performed in multiple reaction monitoring (MRM) mode using an electrospray ionization (ESI) source in both positive and negative modes. As part of the quality assurance and quality control (QA/QC) protocol, a spiked blank prepared with distilled water supplemented with the 43 pharmaceutical analytes of interest was analyzed.

The screening identified 43 pharmaceutical compounds across therapeutic groups, including analgesics, antibiotics, antidepressants, lipid-lowering agents, cardiovascular compounds, antidiabetics, anesthetics, and psychostimulants. Among the detected compounds, carbamazepine was selected as a priority contaminant for the treatment stage due to its detection frequency, persistence, and environmental relevance reported in the scientific literature.

C. *Environmental and public health risk assessment*

The environmental risk assessment for carbamazepine was conducted by analyzing persistence, bioaccumulation, and toxicity (PBT) and estimating the hazard quotient (HQ). The

selection of this compound was based on its high environmental persistence, limited biodegradability, and frequent detection in domestic wastewater and receiving water bodies.

The PBT assessment was conducted by considering criteria for persistence, bioaccumulation potential, and toxicity reported in the scientific literature and databases. Persistence was evaluated based on the compound's resistance to biological degradation; bioaccumulation was estimated using the octanol/water partition coefficient (log Kow), and toxicity was assessed using ecotoxicological parameters reported for aquatic organisms. The final classification of the compound was determined by summing the scores assigned to each criterion, in accordance with methodologies proposed by international organizations [17].

For the ecological risk assessment, the hazard quotient (HQ) was calculated using the ratio of the measured environmental concentration (MEC) to the predicted no-effect concentration (PNEC), according to the equation:

$$HQ(environmental) = \frac{MEC}{PNEC}$$

The PNEC concentration was determined using chronic toxicity (NOEC) and acute toxicity (EC50) values reported for various aquatic trophic levels, including algae, crustaceans, and fish. Subsequently, a weighting factor (WF) of 10 was applied to reduce uncertainty when extrapolating laboratory data to real-world environmental conditions.

Likewise, the assessment of potential risk to human health was performed by estimating the daily intake dose (DID), considering exposure parameters related to drinking water consumption for different age groups and genders. The DID was calculated using the following equation:

$$DID = \frac{C_w \times IR_w \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

Where C_w corresponds to the concentration of the compound in water, IRw to the water intake rate, EF to the frequency of exposure, ED to the duration of exposure, BW to body weight, and AT to the average exposure time.

Subsequently, the human health hazard quotient (HQ) was estimated using:

$$HQ(public\ health) = \frac{DID}{DR_f}$$

Where DR_f corresponds to the reference dose for chronic exposure, HQ values less than 1 were interpreted as indicating a low non-carcinogenic risk for the exposed population.

Where C_w corresponds to the concentration of the compound in water, IR_w to the water intake rate, EF to the frequency of exposure, ED to the duration of exposure, BW to body weight and AT to the average exposure time.

D. Advanced oxidation process

The removal of the micropollutant was evaluated using catalytic ozonation, employing magnetite (Fe_3O_4) as a catalyst in a laboratory-scale reactor. To this end, synthetic water containing the compound was prepared and treated under different operational conditions of pH, ozone dose, and magnetite dose; all treatments were conducted at the established concentration of 15.15mg/L. The experimental system employed a Pacific Ozone (Lenntech) Model 01 ozone generator, operating at room temperature for 60 minutes.

For analytical validation and monitoring of carbamazepine degradation, the removal of carbamazepine during treatment was evaluated using a previously validated UV-Vis spectrophotometric technique [18], [19]. To this end, a calibration curve was constructed using standard solutions of the compound, yielding a linear equation for determining carbamazepine concentrations during treatment.

The stock solution was prepared from commercial 200 mg carbamazepine tablets. Initially, three tablets were ground into a homogeneous powder, and the average weight of a whole tablet was subsequently determined, yielding an approximate value of 400 mg per unit. Taking into account the presence of pharmaceutical excipients, the equivalent mass required to prepare 1 L of solution with a final concentration of 200 mg/L of carbamazepine was calculated. From this stock solution, the corresponding dilution was performed to obtain a working solution with a concentration of 15.15 mg/L

Before treatment, the initial absorbance of the working solution was determined, and the pH was subsequently adjusted according to the conditions established in the experimental design. Next, magnetite (Fe_2O_4) was added, and the catalytic ozonation process was initiated by injecting ozone into the reactor.

The degradation of the contaminant was monitored by sampling at different reaction times (0, 5, 10, 15, 20, and 60 min). The samples were collected in Falcon tubes and separated from the magnetite, first using a permanent magnet and subsequently by filtration through 0.45 µm membranes, to minimize interference from the catalytic material during spectrophotometric analysis.

Finally, the absorbance of each sample was measured to determine the residual carbamazepine concentration and estimate the percentage of contaminant removal during treatment. As a complementary parameter for assessing degradation, chemical oxygen demand (COD) measurements were also performed using the closed-reflux colorimetric method, in accordance with Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Method 5220 D, to evaluate the reduction in organic load associated with the oxidative process.

E. Experimental design

The optimization of the advanced oxidation process was carried out using response surface methodology with a central composite design implemented in Design-Expert® software.

Three independent variables were evaluated: pH, ozone dose, and magnetite concentration. The experimental ranges evaluated were pH 4.64–11.36, ozone dose 0.636-36 g/H, and magnetite concentration 0.636-7.36 g.

The response variable was the percentage of carbamazepine removal after 60 mi of treatment. The statistical fit of the model was evaluated using analysis of variance (ANOVA), coefficients of determination (R^2, adjusted $R^{2,}$ and predicted R^2), the Lack of Fit test, and response surface analysis.

III. Results and Discussion

A. Characterization of the wastewater

To evaluate the initial conditions of the domestic wastewater from the Caño Picho discharge, a physicochemical and microbiological characterization of the effluent was performed. The results obtained allowed for the identification of the main characteristics of the wastewater and the establishment of a baseline for subsequent analyses of micropollutants and treatment processes.

Initially, the operational and environmental conditions at the sampling point were recorded, including temperature, pH, conductivity, and dissolved oxygen, as these parameters influence the biological and chemical processes in domestic wastewater.

TABLE II. Initial conditions of domestic wastewater from Caño Picho

Parameter	*Unit*	*Result*
Temperature	°C	31.2
pH	-	7.05
Conductivity	mS/cm	1.09
Dissolved Oxygen	mg/L	0
Sulfites	mg/L	2
Iron	mg/L	1
Phosphates	mg/L	>5

The results indicated conditions typical of domestic wastewater with a high organic load and limited aeration. The recorded pH (7.05) indicated conditions near neutrality, a common characteristic of urban wastewater due to the mixture of organic matter, detergents, and domestic waste [20]. Likewise, the temperature of 31.2 °C favors microbial activity and the biological degradation processes present in this type of effluent [21].

Electrical conductivity was 1.09 mS/cm, suggesting a significant presence of dissolved salts and ions from domestic discharges. Likewise, the absence of dissolved oxygen (DO = 0 mg/L) indicates high oxygen demand due to organic matter degradation, a behavior frequently observed in wastewater with high pollutant loads [20].

Regarding nutrients, the phosphate concentration exceeded 5 mg/L, which may be linked to domestic use of detergents and cleaning products. The high levels of phosphorus and nitrogen in wastewater are among the main factors contributing to eutrophication in receiving water bodies [22]

TABLE III. Physicochemical and microbiological parameters analyzed in domestic wastewater

Parameter	*Unit*	*Result*
BOD_5	mg/L O_2	59.0
COD	mg/L O_2	963.2
Nitrites	mg/L NO_2	0.062
Nitrates	mg/L NO_3	22.5
Ammoniacal nitrogen	mg/L N-NH_3	53.25
Phosphates	mg/L PO_4	0.91
Hydrocarbons	mg/L hydrocarbons	65.4
Total iron	mg/L Fe^{+3}	1.23
Total suspended solids (TSS)	mg/L SST	106
Total coliforms	UFC	>1600
Fecal coliforms	UFC	$2.5 * 10^6$

Chemical oxygen demand (COD) reached a value of 963.2 mg/L O_2, while biochemical oxygen demand (BOD_5) had a concentration of 59.0 mg/L O_2. These results indicate a significant organic load in the analyzed effluent, suggesting the presence of biodegradable organic matter and more refractory fractions, a pattern commonly associated with the complex composition of domestic wastewater [23].

Regarding nitrogen compounds, 53.25 mg/L of ammonia nitrogen, 22.5 mg/L of nitrates, and 0.062 mg/L of nitrites were recorded. This pattern is consistent with domestic wastewater, where nitrogen appears in various chemical forms derived from the degradation of organic waste and sanitary waste. The literature on wastewater treatment notes that nitrogen in these systems is typically present as organic nitrogen, ammonium, nitrite, and nitrate, with ammonium being very common in municipal wastewater. Furthermore, during biological treatment, organic nitrogen is typically converted first to ammonium and then to nitrite and nitrate, which helps explain the composition observed in this sample [24].

The presence of high levels of ammonia nitrogen is also relevant from an environmental standpoint, as high concentrations of ammonium can degrade the quality of receiving waters and increase the burden on subsequent treatment processes. In systems with low oxygenation, such as the one observed in this case, the natural transformation of nitrogen is limited, which favors the accumulation of reduced forms [25].

On the other hand, the concentration of hydrocarbons reached 65.4 mg/L, which may be attributable to urban inputs, possibly associated with surface runoff, domestic waste, and the transport of pollutants from human activity in the surrounding area. Some research on urban runoff indicates that this type of input is a significant source of diffuse pollution for surface waters, particularly due to organic compounds associated with transportation, urban surfaces, and atmospheric deposition; therefore, although the sample corresponds to domestic

wastewater, the contribution of urban discharges mixed with other inputs from the drainage system cannot be ruled out [26].

Likewise, total iron had a concentration of 1.23 mg/L Fe^{3+}, possibly associated with corrosion processes in the sanitary infrastructure and the transport of mineral material within the network. Corrosion of metal and sewer pipes is a known source of iron release into water, and the magnitude depends on factors such as the presence of anions, dissolved oxygen, flow, and periods of stagnation. In particular, the technical literature on water and sewer pipes indicates that corrosion promotes the release of iron and can degrade water quality [27].

Total suspended solids (TSS) had a concentration of 106 mg/L, indicating a high presence of particulate matter and suspended organic matter in the effluent. The presence of solids and organic compounds in wastewater can influence the efficiency of advanced oxidation processes, as the physicochemical characteristics of the matrix affect the consumption of oxidizing species and the overall treatment performance [28]

Finally, microbiological analysis revealed concentrations exceeding 1,600 CFU/100 mL for total coliforms and 2.5×10^6 CFU/100 mL for fecal coliforms, confirming significant fecal contamination in the domestic wastewater analyzed. These results pose a potential health and environmental risk, especially when this type of effluent is discharged into receiving water bodies without adequate treatment [29].

Overall, the results obtained show that domestic wastewater from Caño Picho has a high organic, microbiological, and nutritional load, conditions that favor the persistence and transport of emerging micropollutants in urban aquatic systems.

B. *Presence of Micropollutants*

The results of the chromatographic analysis revealed the presence of multiple pharmaceutical compounds and consumer products in the domestic wastewater analyzed, confirming the chemical complexity of this type of urban effluent.

TABLE IV. PHARMACEUTICAL MICROCONTAMINANTS DETECTED IN DOMESTIC WASTEWATER FROM CAÑO PICHO

Compound	*Retention time (RT)*	*Area*
4-Acetaminoantipyrine	3.9	851851
Acetaminophen	3.4	2598497
Naproxen	6.6	2598497
Clarithromycin	4.4	62644
Sulfamethoxazole	5.0	428469
Carbamazepine	5.8	554759
Lidocaine	2.6	362565
Caffeine	3.9	2456310
Ibuprofen	7.49	32716
Diclofenac	7.49	88716
Gemfibrozil	7.92	88716
Losartan	6.53	102525

Among the detected compounds, the largest chromatographic peaks were recorded for acetaminophen, caffeine, and naproxen, suggesting a significant presence of these compounds and consistent with reports from studies on domestic wastewater, where these compounds often appear with high frequency due to their high consumption and continuous discharge into the sewer system [30]. Various studies have indicated that conventional treatment processes have significant limitations in completely removing these substances, resulting in their persistence in urban effluents and receiving bodies. Furthermore, compounds such as caffeine and carbamazepine are frequently used as indicators of anthropogenic contamination and as tracers of domestic wastewater due to their persistence and widespread environmental distribution [31], [32].

In Colombia, various studies have documented the presence of emerging contaminants in urban and hospital wastewater, particularly in cities such as Cali, Medellín, and Bogotá. The exploratory study conducted in Santiago de Cali identified a widespread distribution of pharmaceutical compounds, endocrine disruptors, and personal care products in the urban water cycle, demonstrating that several of these contaminants persist even after conventional treatment [33]. Similarly, Colombian studies have reported the recurrent presence of analgesics, antibiotics, and anti-inflammatory drugs in domestic and hospital effluents, highlighting compounds such as acetaminophen, diclofenac, carbamazepine, and sulfamethoxazole, which were also identified in the present study. Furthermore, it is suggested that the increase in pharmaceutical consumption, coupled with the limitations of conventional treatment plants, has contributed to the dispersion of these compounds in urban aquatic systems [12], [34], [35]. In this context, the results obtained for the Caño Picho sample are consistent with the issues previously reported in different regions of the country.

Furthermore, Latin American studies have also revealed similar patterns of contamination. Research conducted in Chile, Brazil, and Mexico has reported the recurring presence of carbamazepine, diclofenac, sulfamethoxazole, caffeine, and other anti-inflammatory drugs in rivers and urban wastewater, highlighting that these compounds exhibit high chemical stability and resistance to conventional biological treatment [36], [37], [38], [39], [40], [41]. According to recent regional reviews, Latin America currently accounts for a significant portion of research on emerging contaminants due to increasing urbanization and historical deficiencies in sanitation infrastructure [42].

The simultaneous identification of various pharmaceuticals and everyday compounds confirms that domestic wastewater is a major pathway for the entry of microcontaminants into the aquatic environment, especially in urban settings where treatment systems still have limitations in removing these substances.

C. Environmental and Health Risk Assessment

Due to the diversity of pharmaceutical compounds detected in the domestic wastewater sample, carbamazepine was selected as the priority compound for environmental and health risk assessment. This selection was made considering its environmental persistence, chemical stability, and frequent detection in wastewater and receiving water bodies. Furthermore, carbamazepine has been reported as one of the pharmaceutical compounds with the lowest removal rates in conventional treatment processes, which contributes to its persistence in aquatic systems and its frequent use as an indicator of pharmaceutical contamination [43], [44].

Carbamazepine is an antiepileptic drug widely detected in domestic wastewater due to its high chemical stability and limited biodegradability. Its physicochemical properties, particularly its moderate solubility and low adsorption potential, favor its persistence in the aqueous phase and hinder its removal by conventional treatment processes [45].

TABLE V. PROPERTIES OF CARBAMAZEPINE

CAS	298-46-4
Formula	$C_{15}H_{12}N_2O$
Therapeutic use	Antiepileptic
Molar mass	236.269
pKa	13.9
logKow	2.45
Solubility	$1.12 * 10^2$

TABLE VI. PBT ASSESSMENT

Persistence	3
Bioaccumulation	0
Toxicity	3
PBT	6

The PBT assessment for carbamazepine yielded a total score of 6, primarily due to its high persistence and ecological toxicity. Various studies have indicated that this compound exhibits very low biodegradability and is resistant to conventional treatment processes, leading to its persistence in wastewater and receiving water bodies. Furthermore, although carbamazepine has a low tendency to bioaccumulate, its continuous discharge into the aquatic environment and its resistance to biological processes increase its significance as a priority emerging contaminant. PBT assessment of carbamazepine [46], [47], [48].

1) Risk to aquatic ecosystems

To assess the ecological risk associated with carbamazepine, different trophic levels representative of aquatic ecosystems were considered, including primary producers (algae), primary consumers (crustaceans), and secondary consumers (fish).

TABLE VII. TROPHIC LEVELS

	Producers (Algae)
	Primary consumers (Crustaceans)
	Secondary consumers (Fish)

The ecotoxicological parameters used corresponded to NOEC and EC50 values reported in the literature for species frequently used in aquatic toxicity studies. The inclusion of diverse biological groups enabled a more comprehensive assessment of carbamazepine's potential impact on organisms with varying sensitivities within the aquatic ecosystem.

TABLE VIII. ECOTOXICOLOGICAL PARAMETERS USED FOR THE RISK ASSESSMENT OF CARBAMAZEPINE IN AQUATIC ORGANISMS

Species	**Toxicological endpoint**	**Toxicity (mg/L)**	***Reference***
Pseudokirchneriella subcapitata	NOEC	27.4	[49]
Chlorella pyrenoidosa	EC50	49.4	[50]
Ceriodaphnia dubia	NOEC	0.104	[51]
Ceriodaphnia dubia	EC50	0.3162	[51]
Pimephales promelas	NOEC	0.862	[52]
Danio rerio	EC50	66.8	[53]

To estimate the hazard quotient (HQ), ecotoxicological values reported for different aquatic trophic levels were used. Based on the NOEC and EC50 values, the most sensitive organism (Select) was chosen to obtain the predicted no-effect concentration (PNEC). Subsequently, a weighting factor (WF) of 10 was applied, commonly used in ecological risk assessments to reduce the uncertainty associated with extrapolating laboratory ecotoxicological data to real-world environmental conditions [54]

TABLE IX. ASSESSMENT OF THE HAZARD QUOTIENT (HQ) FOR CARBAMAZEPINE IN DOMESTIC WASTEWATER

	Concentration (mg/L)	15.15
ALGAE	**NOEC (mg/L)**	27.4
	EC50 (mg/L)	49.4
CRUSTACEANS	**NOEC (mg/L)**	0.104
	EC50 (mg/L)	0.3162
FISH	**NOEC (mg/L)**	0.862
	EC50 (mg/L)	66.8
	FV	10
	Select	0.104
	PNEC (mg/L)	0.0104
	HQ	1456.73077
	Risk	High

The hazard quotient (HQ) calculated for carbamazepine was 1456.73, indicating a high ecological risk to aquatic organisms. According to various environmental risk assessment methodologies, HQ values greater than 1 indicate the potential for adverse effects on aquatic ecosystems, especially under continuous exposure to pharmaceutical contaminants [55]. The high value obtained in this study is primarily related to the high concentration detected in the domestic wastewater sample and the low predicted no-effect concentration (PNEC) reported for sensitive organisms. Various studies have indicated that carbamazepine can cause physiological alterations and toxic effects on algae, crustaceans, and fish, even at low concentrations, due to its persistence and limited degradation in aquatic environments [56], [57], [58].

2) Potential risk to human health

To assess the potential risk to human health associated with carbamazepine, toxicological parameters reported in experimental studies and reference dose values (DRf) derived from NOAELs were used.

TABLE X. TOXICOLOGICAL PARAMETERS USED FOR THE HUMAN HEALTH RISK ASSESSMENT OF CARBAMAZEPINE

Type	Value (mg/kg·día)	DRf (mg/kg·día)	Reference
NOAEL (Pregnant Wistar rats)	25	$2.5 * 10^5$	[59]

Likewise, to estimate the daily intake dose (DID), various exposure parameters associated with water consumption were considered, including the daily intake rate (IRw), body weight (BW), exposure frequency (EF), exposure duration (ED), and average exposure time (AT) for different age groups. These parameters are commonly used in health risk assessments to estimate potential exposure to contaminants in water and to establish conservative risk scenarios for children and adults [55].

TABLE XI. ESTIMATED DAILY INTAKE (DID) OF CARBAMAZEPINE BY AGE GROUP.

Age group	DID Women	DID Men
0–6 months	1.36	1.275
6–12 months	1.421	1.337
1–2 years	1.50	1.44
2–3 years	1.393	1.345
4–8 years	0.889	0.873
9–13 years	0.594	0.656
14–18 years	0.545	0.682
>18 years	0.484	0.560

DID results showed higher potential exposure values among pediatric age groups, especially for children aged 1 to 2 years. This pattern is primarily related to a higher ratio of water intake to body weight during the early stages of growth. It has been demonstrated that children and infants are more sensitive populations in chemical risk assessments due to their higher relative ingestion rates and the immaturity of certain physiological detoxification mechanisms [60].

TABLE XII. HAZARD QUOTIENT (HQ)

Age group	HQ Women	HQ Men
0–6 months	$5.44 * 10^{-6}$	$5.10 * 10^{-6}$
6–12 months	$5.68 * 10^{-6}$	$5.35 * 10^{-6}$
1–2 years	$6.00 * 10^{-6}$	$5.76 * 10^{-6}$
2–3 years	$5.57 * 10^{-6}$	$5.38 * 10^{-6}$
4–8 years	$3.56 * 10^{-6}$	$3.49 * 10^{-6}$
9–13 years	$2.38 * 10^{-6}$	$2.63 * 10^{-6}$
14–18 years	$2.18 * 10^{-6}$	$2.73 * 10^{-6}$
>18 years	$1.94 * 10^{-6}$	$2.24 * 10^{-6}$

Note. Because the health risk assessment was conducted only for carbamazepine, the hazard index (HI) was set to the same value as HQ.

The HQ values obtained for carbamazepine were less than 1 across all evaluated age groups and for both men and women, indicating a low non-carcinogenic risk under the exposure conditions considered. According to the USEPA, HQ values less than 1 suggest that the estimated exposure has a low probability of causing adverse effects on human health. In this study, the highest values were observed in the pediatric population; however, these remained considerably below the public health concern threshold established for chemical risk assessments [55].

Furthermore, since the assessment was conducted solely for carbamazepine, the hazard index (HI) was the same as that obtained for HQ. It should be noted that, although the results did not indicate a significant health risk under the evaluated conditions, the continued presence of carbamazepine in wastewater and receiving water bodies remains a significant environmental concern due to its persistence and limited removal in conventional treatment processes [61].

D. Evaluation of the advanced oxidation process

1) Experimental design and operating conditions

To evaluate the advanced oxidation process, a response surface experimental design was implemented using a central composite design (CCD) with Design Expert® software. The effects of pH, ozone dose, and magnetite concentration on carbamazepine degradation in domestic wastewater were evaluated. The experimental ranges were defined based on previously reported conditions for heterogeneous catalytic ozonation of persistent pharmaceutical contaminants.

TABLE XIII. VARIABLES AND LEVELS EVALUATED IN THE EXPERIMENTAL DESIGN

Factor	Variable	Minimum	Max
A	pH	4.64	11.36
B	Ozone dose (g/h)	0.636	7.36

C	Magnetite concentration (g)	0.636	7.36

The experimental design consisted of 15 setups in which different operational conditions of pH, ozone dose, and magnetite concentration were combined. During each treatment, temporal monitoring was performed by measuring absorbance at 285 nm and determining the residual carbamazepine concentration.

For each experimental setup, measurements were taken at six reaction times: the initial sample corresponding to the synthetic solution of ultrapure water and carbamazepine before treatment, time zero (T0), corresponding to the moment immediately after the addition of magnetite and the activation of the ozone generator, and subsequently at 5, 10, 15, 20, and 60 minutes of reaction. This monitoring enabled evaluation of the temporal behavior of carbamazepine degradation under different operating conditions. Response surface methodology has been widely used in advanced oxidation processes due to its ability to simultaneously optimize multiple variables and evaluate interactions between operational factors [62].

2) Process optimization using response surface methodology

TABLE XIV. RESULTS OF THE ANOVA ANALYSIS FOR THE QUADRATIC MODEL OF CARBAMAZEPINE REMOVAL

Source	**Sum of Squares**	**df**	**Mean Square**	**F-value**	**p-value**
Model	4105,63	9	456,18	152,51	< 0.0001
A-pH	266,89	1	266,89	89,23	< 0.0001
B-Dósis Ozono	791,56	1	791,56	264,64	< 0.0001
C-Concentración Magnetita	188,96	1	188,96	63,17	< 0.0001
AB	0,6613	1	0,6613	0,2211	0,6483
AC	35,70	1	35,70	11,94	0,0062
BC	8,20	1	8,20	2,74	0,1287
A^2	1005,78	1	1005,78	336,26	< 0.0001
B^2	1906,14	1	1906,14	637,27	< 0.0001
C^2	359,62	1	359,62	120,23	< 0.0001
Residual	29,91	10	2,99		
Lack of Fit	18,70	5	3,74	1,67	0,2942
Pure Error	11,21	5	2,24		
Total	4135,55	19			

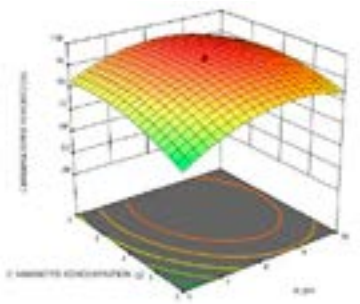


Fig. 1. Response surface for removal: Magnetite concentration vs pH

The statistical analysis using the response surface showed that the quadratic model for carbamazepine removal was highly significant ($p < 0.0001$), with a coefficient of determination (R^2) of 0.9928, indicating an excellent fit between the experimental values and those predicted by the model. Likewise, the adjusted R^2 (0.9863) and the predicted R^2 (0.9592) showed adequate agreement, demonstrating the high predictive capacity of the experimental model. The Adeq Precision value was 37.07, exceeding the recommended minimum of 4, indicating an adequate signal-to-noise ratio and confirming the model's statistical reliability.

The ANOVA indicated that the variables pH (A), ozone dose (B), and magnetite concentration (C) had a significant effect on carbamazepine removal ($p < 0.05$). Furthermore, the quadratic terms A^2, B^2, and C^2 were highly statistically significant, suggesting nonlinear behavior of the experimental system. Among the interactions evaluated, only the interaction between pH and magnetite concentration (AC) was statistically significant, while the AB and BC interactions were not significant. Additionally, the non-significant Lack of Fit value ($p = 0.2942$) indicated that the model fit the experimental data adequately.

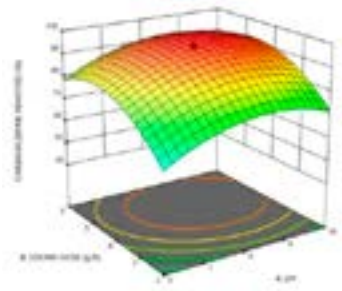


Fig. 2. Ozone removal surface vs pH

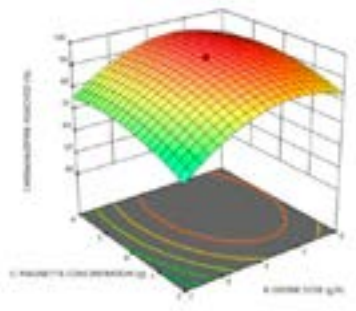


Fig. 3. Response surface magnetite concentration vs dósis de ozono

The response surfaces showed that an increase in pH significantly favored carbamazepine removal, especially under intermediate conditions of ozone dose and magnetite concentration. In general, the highest degradation efficiencies were observed under conditions near alkaline pH, which can be attributed to increased generation of hydroxyl radicals during catalytic ozonation.

Similarly, the response surfaces indicated that the presence of magnetite enhanced degradation, possibly due to the catalytic generation of reactive oxygen species at the solid-liquid interface. However, it was observed that excessively high concentrations of ozone or magnetite did not proportionally increase the removal, indicating behavior typical of heterogeneous catalytic systems, where optimal operating conditions exist.

3) Process optimization

TABLE XV. PREDICTED OPTIMAL CONDITIONS FOR CARBAMAZEPINE REMOVAL

Variable	Optimal value
pH	9.58
Ozone dose	4.68 g/h
Magnetite	4.78 g
Predicted removal	96.95 %
Recoverability	1.000

The optimization process established optimal operating conditions: pH 9.58, an ozone dose of 4.68 g/h, and a magnetite concentration of 4.78 g, yielding a predicted carbamazepine removal of 96.95% and a desirability of 1. These results demonstrate the high efficiency of the evaluated advanced oxidation process in degrading pharmaceutical contaminants in domestic wastewater.

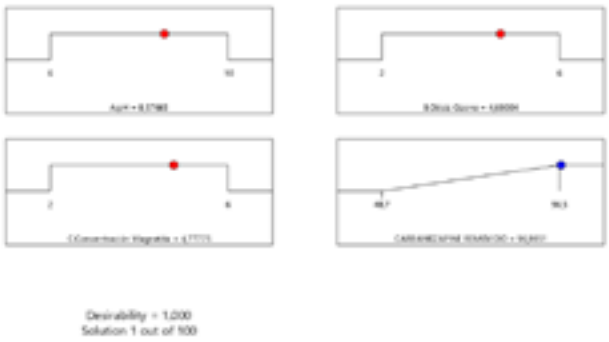


Fig. 4. Optimal model conditions.

IV. CONCLUSIONS

The physicochemical and microbiological characterization of domestic wastewater from the Caño Picho sector revealed a highly contaminated matrix, with high concentrations of organic matter, nutrients, suspended solids, hydrocarbons, and microorganisms indicative of fecal contamination. These conditions reflect a significant deterioration in water quality due to urban and domestic discharges lacking adequate treatment, thereby favoring the persistence, mobility, and dispersion of emerging microcontaminants in the aquatic environment. The results confirm the need to strengthen environmental monitoring of pharmaceutical contaminants in urban receiving bodies, particularly in regions where information on these compounds remains limited.

Chromatographic analysis using HPLC-MS enabled the identification of various pharmaceutical compounds across widely used therapeutic categories, including analgesics, antibiotics, anti-inflammatories, cardiovascular compounds, and psychostimulants. The simultaneous detection of these compounds confirms the chemical complexity of domestic wastewater and highlights the role of urban effluents as a continuous source of emerging contaminants entering the environment. Among the detected compounds, carbamazepine was of particular relevance due to its high environmental persistence, limited biodegradability, and known resistance to conventional treatments—characteristics that supported its selection as a model compound for evaluating the advanced oxidation process.

The environmental risk assessment revealed a high ecotoxicological potential associated with carbamazepine, resulting in hazard quotients (HQ) exceeding the established risk threshold for aquatic organisms. This behavior is primarily related to the compound's high persistence and the reported sensitivity of different trophic levels, particularly crustaceans. Although the health risk assessment showed HQ values below 1 for all age groups analyzed, indicating a low non-carcinogenic risk under the evaluated conditions, continuous and cumulative exposure to this compound represents a significant environmental concern due to its persistence in aquatic systems and its potential chronic effects on recipient organisms and ecosystems.

The heterogeneous catalytic ozonation process using magnetite (Fe_3O_4) demonstrated high efficiency in degrading carbamazepine, achieving removal rates of up to 96% under certain operating conditions. The progressive decrease in absorbance and residual contaminant concentration confirmed the effectiveness of the oxidative process. It demonstrated the significant influence of alkaline pH and the catalyst on treatment performance. These results suggest that the ozone/magnetite combination promotes the generation of reactive oxygen species, particularly hydroxyl radicals (•OH), which are responsible for the degradation of persistent pharmaceutical compounds present in aqueous solution.

The application of response surface methodology enabled the successful optimization of the system's operating conditions, yielding a statistical model with high predictive power and good experimental fit. The determined optimal conditions corresponded to a pH of 9.58, an ozone dose of 4.68 g/h, and a magnetite concentration of 4.78 g, achieving a predicted carbamazepine removal of 96.95%. Likewise, experimental validation via COD determination showed a significant reduction in organic load during treatment, confirming that the process not only promotes degradation of the target micropollutant but also partially oxidizes organic matter present in the system.

Based on the results obtained, it is recommended that further studies be conducted using actual domestic wastewater samples to evaluate the system's performance in the presence of interferences from natural organic matter, suspended solids, and complex contaminant mixtures. Similarly, it is pertinent to

further investigate the identification and toxicological evaluation of transformation byproducts generated during catalytic ozonation, given that some intermediates may exhibit persistence or residual toxicity. Finally, it is recommended to evaluate the stability, recovery, and reuse of magnetite across multiple operational cycles, and to analyze the technical and economic feasibility of the process at pilot scale, with a view to its potential application in urban wastewater treatment systems affected by emerging contaminants.

References

[1] A. F. Toro-Vélez *et al.*, "BPA and NP removal from municipal wastewater by tropical horizontal subsurface constructed wetlands," *Science of The Total Environment*, vol. 542, pp. 93–101, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2015.09.154.

[2] W. Gwenzi and N. Chaukura, "Organic contaminants in African aquatic systems: Current knowledge, health risks, and future research directions," *Science of The Total Environment*, vol. 619–620, pp. 1493–1514, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.11.121.

[3] A. H. A. Khan and R. Barros, "Pharmaceuticals in Water: Risks to Aquatic Life and Remediation Strategies," *Hydrobiology 2023, Vol. 2, Pages 395-409*, vol. 2, no. 2, pp. 395–409, Jun. 2023, doi: 10.3390/HYDROBIOLOGY2020026.

[4] R. P. Schwarzenbach *et al.*, "The challenge of micropollutants in aquatic systems," *Science (1979)*, vol. 313, no. 5790, pp. 1072–1077, Aug. 2006, doi: 10.1126/SCIENCE.1127291; PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER.

[5] H. B. Hawash *et al.*, "Occurrence and spatial distribution of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the aquatic environment, their characteristics, and adopted legislations," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 52, p. 103490, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.JWPE.2023.103490.

[6] S. A. Hafezi and W. M. Abdel-Rahman, "The Endocrine Disruptor Bisphenol A (BPA) Exerts a Wide Range of Effects in Carcinogenesis and Response to Therapy," *Curr. Mol. Pharmacol.*, vol. 12, no. 3, p. 230, Mar. 2019, doi: 10.2174/1874467212666190306164507.

[7] E. M. Jiménez-Bambague, C. A. Madera-Parra, and F. Machuca-Martinez, "The occurrence of emerging compounds in real urban wastewater before and after the COVID-19 pandemic in Cali, Colombia," *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, vol. 33, p. 100457, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.COESH.2023.100457.

[8] Corponor, "Análisis de la calidad biológica del río Pamplonita", 2019.

[9] E. Serna-Galvis, Y. L. Martínez-Mena, J. Porras, and R. A. Torres-Palma, "Antibióticos de alto consumo en Colombia, excreción en orina y presencia en aguas residuales – una revisión bibliográfica," *Ingeniería y competitividad*, vol. 24, no. 1, dic. 2021, doi: 10.25100/IYC.V24I1.11267.

[10] D. F. Bedoya-Ríos, J. A. Lara-Borrero, V. Duque-Pardo, C. A. Madera-Parra, E. M. Jimenez, and A. F. Toro, "Study of the occurrence and ecosystem danger of selected endocrine disruptors in the urban water cycle of the city of Bogotá, Colombia," *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 53, no. 4, pp. 317–325, Mar. 2018, doi: 10.1080/10934529.2017.1401372.

[11] J. P. Arrubla, J. A. Cubillos, C. A. Ramírez, J. A. Arredondo, C. A. Arias, and D. Paredes, "Pharmaceutical and personal care products in domestic wastewater and their removal in anaerobic treatment systems: Septic tank – up flow anaerobic filter." *Ingeniería e Investigación*, vol. 36, no. 1, pp. 70–78, ene. 2016, doi: 10.15446/ing.investig.v36n1.53076.

[12] J. A. Flórez, J. Alean-Flórez, D. Márquez-Méndez, S. Burgos-Núñez, G. Enamorado-Montes, and J. Marrugo-Negrete, "Productos farmacéuticos y de cuidado personal presentes en aguas superficiales, de consumo humano y residuales en el departamento de Córdoba, Colombia," *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 12, no. 2, pp. 179–197, Jun. 2021, doi: 10.22490/21456453.4231.

[13] A. Tejeda *et al.*, "Eficiencia de tres sistemas de humedales híbridos para la remoción de carbamazepina," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 6, no. 6, pp. 19–31, 2015, Accessed: May 09, 2026. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000600019&lng=es&nrm=iso&tlng=es

[14] M. J. Moya-Llamas, A. Trapote, and D. Prats, "Carbamazepine removal from low-strength municipal wastewater using a combined UASB-MBR treatment system," *Water Science and Technology*, vol. 83, no. 8, pp. 1920–1931, Apr. 2021, doi: 10.2166/WST.2021.096.

[15] J. L. Carrasco Torres, "Impacto de la carbamazepina en el desarrollo embrionario del pez cebra," jun. 2024, Accessed: May 09, 2026. [Online]. Available: https://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/4787

[16] B. Wang *et al.*, "Application of Heterogeneous Catalytic Ozonation for Refractory Organics in Wastewater," *Catalysts 2019, Vol. 9, Page 241*, vol. 9, no. 3, p. 241, Mar. 2019, doi: 10.3390/CATAL9030241.

[17] European Chemicals Bureau and Institute for Health and Consumer Protection, "Technical Guidance Document on risk assessment in support of: Commission Directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances, Commission Regulation (EC) No 1488/94 on risk assessment for existing substances, Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market. Part III," Sep. 05, 2008, *Publications Office of the European Union*. Accessed: Sep. 02, 2025. [Online]. Available: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/212940b8-3e55-43f8-8448-ba258d0374bb

[18] M. Ghosh, S. Mondal, S. Chakraborty, and N. Ghosh, "A Stability Indicating Method was Developed and Validated for the Estimation of Carbamazepine in Bulk and Tablet Dosage form by UV-Spectroscopic Techniques," *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, vol. 13, no. 3, pp. 85–104, Mar. 2023, doi: 10.22270/JDDT.V13I3.5987.

[19] I. Bulduk and S. Gungor, "Spectrophotometric and High Performance Liquid Chromatographic Determination of Carbamazepine in Tablets Dosage Form," *J. Pharm. Res. Int.*, pp. 731–741, oct. 2021, doi: 10.9734/JPRI/2021/V33I47A33068.

[20] M. Tanyol and V. Demir, "Correlations between some operation parameters and efficiency evaluation of domestic wastewater treatment plant in Tunceli (Turkey)," *Desalination Water Treat.*, vol. 57, no. 58, pp. 28115–28121, Dec. 2016, doi: 10.1080/19443994.2016.1182082.

[21] L. Delgadillo-Mirquez, F. Lopes, B. Taidi, and D. Pareau, "Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture," *Biotechnology*

Reports, vol. 11, pp. 18–26, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.BTRE.2016.04.003.

[22] M. Gavrilescu, K. Demnerová, J. Aamand, S. Agathos, and F. Fava, "Emerging pollutants in the environment: present and future challenges in biomonitoring, ecological risks and bioremediation," *N. Biotechnol.*, vol. 32, no. 1, pp. 147–156, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.NBT.2014.01.001.

[23] Y. Y. Choi *et al.*, "Characteristics and Biodegradability of Wastewater Organic Matter in Municipal Wastewater Treatment Plants Collecting Domestic Wastewater and Industrial Discharge," *Water 2017, Vol. 9, Page 409*, vol. 9, no. 6, p. 409, Jun. 2017, doi: 10.3390/W9060409.

[24] Y. Zhou, Y. Zhu, J. Zhu, C. Li, and G. Chen, "A Comprehensive Review on Wastewater Nitrogen Removal and Its Recovery Processes," *International Journal of Environmental Research and Public Health 2023, Vol. 20, Page 3429*, vol. 20, no. 4, p. 3429, Feb. 2023, doi: 10.3390/IJERPH20043429.

[25] K. Kosgey, P. V. Zungu, F. Bux, and S. Kumari, "Biological nitrogen removal from low carbon wastewater," *Front. Microbiol.*, vol. 13, p. 968812, Nov. 2022, doi: 10.3389/FMICB.2022.968812/FULL.

[26] A. Müller, H. Österlund, J. Marsalek, and M. Viklander, "The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources," *Science of the Total Environment*, vol. 709, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136125.

[27] E. Stanaszek-Tomal and M. Fiertak, "ScienceDirect Biological Corrosion in The Sewage System and The Sewage Treatment Plant," *Procedia Eng.*, vol. 161, pp. 116–120, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.507.

[28] C. Amor, L. Marchão, M. S. Lucas, and J. A. Peres, "Application of Advanced Oxidation Processes for the Treatment of Recalcitrant Agro-Industrial Wastewater: A Review," *Water 2019, Vol. 11, Page 205*, vol. 11, no. 2, p. 205, Jan. 2019, doi: 10.3390/W11020205.

[29] S. Chen, J. Chen, X. Wang, J. Li, B. Dong, and Z. Xu, "Footprints of total coliforms, fecal coliforms and E. coli in a wastewater treatment plant and the probabilistic assessment and reduction of E. coli infection risks," *Sci. Total Environ.*, vol. 900, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.165845.

[30] A. J. Ebele, M. Abou-Elwafa Abdallah, and S. Harrad, "Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment," *Emerg. Contam.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–16, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.EMCON.2016.12.004.

[31] J. A. Sandoval, M. A. Morales-Granados, and D. Rubio, "Breve revisión del uso de microalgas para la remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales," *Gestión y Ambiente*, vol. 23, no. 1, pp. 127–137, Jan. 2020, doi: 10.15446/ga.v23n1.84034.

[32] S. Ortiz de García, P. A. García-Encina, and R. Irusta-Mata, "The potential ecotoxicological impact of pharmaceutical and personal care products on humans and freshwater, based on USEtox™ characterization factors. A Spanish case study of toxicity impact scores," *Science of The Total Environment*, vol. 609, pp. 429–445, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.07.148.

[33] E. M. Jiménez Bambague, "Estudio de la presencia de microcontaminantes en el ciclo urbano del agua de la ciudad de Santiago de Cali," Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2017.

[34] M. J. Gil, A. M. Soto, J. I. Usma, and O. D. Gutiérrez, "Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos," *Producción + Limpia*, vol. 7, no. 2, pp. 52–73, 2012, Accessed: May 09, 2026. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000200005&lng=en&nrm=iso&tlng=es

[35] A. M. Botero-Coy *et al.*, "'An investigation into the occurrence and removal of pharmaceuticals in Colombian wastewater,'" *Science of The Total Environment*, vol. 642, pp. 842–853, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.06.088.

[36] I. Vera-Puerto *et al.*, "Reclamation of Treated Wastewater for Irrigation in Chile: Perspectives of the Current State and Challenges," *Water 2022, Vol. 14, Page 627*, vol. 14, no. 4, p. 627, Feb. 2022, doi: 10.3390/W14040627.

[37] P. A. Inostroza, S. Elgueta, M. Krauss, W. Brack, and T. Backhaus, "A multi-scenario risk assessment strategy applied to mixtures of chemicals of emerging concern in the River Aconcagua basin in Central Chile," *Science of The Total Environment*, vol. 921, p. 171054, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2024.171054.

[38] M. de J. S. Chaves *et al.*, "Pharmaceuticals and personal care products in a Brazilian wetland of international importance: Occurrence and environmental risk assessment," *Science of The Total Environment*, vol. 734, p. 139374, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.139374.

[39] V. Roveri, L. L. Guimarães, W. Toma, and A. T. Correia, "Occurrence and ecological risk assessment of pharmaceuticals and cocaine in a beach area of Guarujá, São Paulo State, Brazil, under the influence of urban surface runoff," *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 27, no. 36, pp. 45063–45075, Dec. 2020, doi: 10.1007/S11356-020-10316-Y.

[40] I. Vázquez-Tapia *et al.*, "Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico – A review," *Chemosphere*, vol. 308, p. 136285, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.136285.

[41] J. C. Durán-Álvarez, B. Prado, R. Zanella, M. Rodríguez, and S. Díaz, "Wastewater surveillance of pharmaceuticals during the COVID-19 pandemic in Mexico City and the Mezquital Valley: A comprehensive environmental risk assessment," *Science of The Total Environment*, vol. 900, p. 165886, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.165886.

[42] M. A. Sandoval, W. Calzadilla, J. Vidal, E. Brillas, and R. Salazar-González, "Contaminants of emerging concern: Occurrence, analytical techniques, and removal with electrochemical advanced oxidation processes with special emphasis in Latin America," *Environmental Pollution*, vol. 345, p. 123397, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2024.123397.

[43] K. Samal, S. Mahapatra, and M. Hibzur Ali, "Pharmaceutical wastewater as Emerging Contaminants (EC): Treatment technologies, impact on environment and human health," *Energy Nexus*, vol. 6, p. 100076, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.NEXUS.2022.100076.

[44] A. J. Ebele, M. Abou-Elwafa Abdallah, and S. Harrad, "Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment," *Emerg. Contam.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–16, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.EMCON.2016.12.004.

[45] Y. Zhang, S. U. Geißen, and C. Gal, "Carbamazepine and diclofenac: Removal in wastewater treatment plants and occurrence in water bodies," *Chemosphere*, vol. 73, no. 8, pp. 1151–1161, Nov. 2008, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2008.07.086.

[46] M. A. Décima, S. Marzeddu, M. Barchiesi, C. Di Marcantonio, A. Chiavola, and M. R. Boni, "A Review on the

Removal of Carbamazepine from Aqueous Solution by Using Activated Carbon and Biochar," *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 11760*, vol. 13, no. 21, p. 11760, Oct. 2021, doi: 10.3390/SU132111760.

[47] D. P. Mohapatra, S. K. Brar, R. D. Tyagi, P. Picard, and R. Y. Surampalli, "Analysis and advanced oxidation treatment of a persistent pharmaceutical compound in wastewater and wastewater sludge-carbamazepine," *Science of the Total Environment*, vol. 470–471, pp. 58–75, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.09.034.

[48] T. Yehya *et al.*, "Towards a Better Understanding of the Removal of Carbamazepine by Ankistrodesmus braunii: Investigation of Some Key Parameters," *Applied Sciences 2020, Vol. 10, Page 8034*, vol. 10, no. 22, p. 8034, Nov. 2020, doi: 10.3390/APP10228034.

[49] E. Donner *et al.*, "Ecotoxicity of carbamazepine and its UV photolysis transformation products," *Science of the Total Environment*, vol. 443, pp. 870–876, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.11.059.

[50] W. Zhang *et al.*, "Eco-toxicological effect of Carbamazepine on Scenedesmus obliquus and Chlorella pyrenoidosa," *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 33, no. 2, pp. 344–352, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.etap.2011.12.024.

[51] K. Lamichhane, S. N. Garcia, D. B. Huggett, D. L. Deangelis, and T. W. La Point, "Chronic effects of carbamazepine on life-history strategies of Ceriodaphnia dubia in three successive generations," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 64, no. 3, pp. 427–438, Apr. 2013, doi: 10.1007/s00244-012-9845-5.

[52] M. D. Overturf *et al.*, "Early life-stage toxicity of eight pharmaceuticals to the fathead minnow, pimephales promelas," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 62, no. 3, pp. 455–464, Apr. 2012, doi: 10.1007/s00244-011-9723-6.

[53] M. L. da Silva *et al.*, "Multilevel assessment of carbamazepine effects: An integrative approach using zebrafish early-life stages," *Chemosphere*, vol. 355, p. 141772, May 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.141772.

[54] European Chemicals Bureau and Institute for Health and Consumer Protection, "Technical Guidance Document on risk assessment in support of: Commission Directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances, Commission Regulation (EC) No 1488/94 on risk assessment for existing substances, Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market. Part III," Sep. 05, 2008, *Publications Office of the European Union*. Accessed: Sep. 02, 2025. [Online]. Available: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/212940b8-3e55-43f8-8448-ba258d0374bb

[55] "Guía de evaluación de riesgos para el programa Superfund (RAGS): Parte A | Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. UU. UU. UU." Accessed: May 09, 2026. [Online]. Available: https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-rags-part

[56] L. Patrolecco, N. Ademollo, P. Grenni, A. Tolomei, A. Barra Caracciolo, and S. Capri, "Simultaneous determination of human pharmaceuticals in water samples by solid phase extraction and HPLC with UV-fluorescence detection," *Microchemical Journal*, vol. 107, pp. 165–171, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.MICROC.2012.05.035.

[57] H. Chen, X. Gu, Q. Zeng, and Z. Mao, "Acute and Chronic Toxicity of Carbamazepine on the Release of Chitobiase, Molting, and Reproduction in Daphnia similis," *International Journal of Environmental Research and Public Health 2019, Vol. 16, Page 209*, vol. 16, no. 2, p. 209, Jan. 2019, doi: 10.3390/IJERPH16020209.

[58] N. S. P. Batucan, L. A. Tremblay, G. L. Northcott, and C. D. Matthaei, "Medicating the environment? A critical review on the risks of carbamazepine, diclofenac, and ibuprofen to aquatic organisms," *Environmental Advances*, vol. 7, p. 100164, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.ENVADV.2021.100164.

[59] S. K. Panda, N. K. Naveen, and P. Takawale, "Embryo-fetal developmental toxicity of carbamazepine administered orally in Wistar rat," *Reproductive Toxicology*, vol. 129, p. 108665, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.reprotox.2024.108665.

[60] WHO, "Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum. Geneva: World Health Organization. Geneva, Switzerland, *World Health Organization*, 2017, Accessed: May 09, 2026. [Online]. Available: https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950

[61] Y. Zhang, S. U. Geißen, and C. Gal, "Carbamazepine and diclofenac: Removal in wastewater treatment plants and occurrence in water bodies," *Chemosphere*, vol. 73, no. 8, pp. 1151–1161, Nov. 2008, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2008.07.086.

[62] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, and L. A. Escaleira, "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry," *Talanta*, vol. 76, no. 5, pp. 965–977, Sep. 2008, doi: 10.1016/J.TALANTA.2008.05.019.

Proposal for an Indicator to Measure the Adoption of AI in Research: The LATAM Case

1st Diana Catalina Hernández Rojas
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá, Colombia
0009−0003−2399−6576

2nd Ana María Gomez Lamus
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá, Colombia
0000−0002−9714−6780

3rd Wilmer Dario Pineda Ríos
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Bogotá, Colombia
0000−0001−7774−951X

***Abstract*— The expansion of Artificial Intelligence (AI) in Latin America has significantly reshaped the production, circulation, and accessibility of scientific knowledge, albeit with uneven progress across countries. While existing regional indices assess technological and institutional capacities, they do not directly capture the extent to which AI fosters openness, accessibility, and reuse of academic knowledge. To address this gap, this study proposes a composite indicator designed to measure the adoption of AI applied to scientific dissemination, contributing a novel dimension to the analysis of digital ecosystems and open science in the region.**

The methodology integrates bibliometric variables, digital infrastructure, connectivity, and research and development expenditure. It combines logarithmic transformations, Z-score standardization, Principal Component Analysis, and Shannon entropy to ensure robustness and comparability. Additionally, an interactive data visualization tool is developed to explore spatial patterns, identify structural gaps, and enhance interpretability, supporting both analytical depth and decision-making processes.

The results reveal marked regional heterogeneity, with Uruguay showing the strongest performance and Venezuela the lowest. Validation against established indices demonstrates conceptual consistency and moderate statistical associations, confirming that the proposed indicator captures a complementary dimension focused on scientific visibility and impact. Overall, the study provides a novel framework for understanding how AI contributes to the democratization of knowledge in Latin America.

Keywords*— *Artificial Intelligence; Knowledge democratization; Scientific production; Bibliometrics; Latin America.

I. Introduction

Artificial Intelligence (AI) has become an indispensable tool for the production, management, and dissemination of knowledge across multiple sectors. In Latin America, its adoption has grown significantly thanks to the expansion of language models, deep learning techniques, and advanced data management systems, among others. However, these advances are not always accessible, widely disseminated, distributed, or shared openly or completely, creating significant gaps between countries with robust technological ecosystems and others affected by structural limitations such as low connectivity, limited investment in R&D, or insufficient specialized training.

Recent regional indices, such as the Latin American Artificial Intelligence Index (ILIA), clearly illustrate this heterogeneity. Chile, Brazil, and Uruguay lead the region due to sustained policies of digital and scientific strengthening, while countries with fewer capabilities lag considerably behind. Although metrics like this index allow us to identify technological advances and favorable conditions, they do not explicitly show how AI impacts the openness, circulation, and availability of scientific knowledge.

Contemporary discussions on the democratization of knowledge highlight that technological expansion does not, in itself, guarantee greater access, reuse, or generation of knowledge. Factors such as open access policies, publishing ecosystems, regulatory frameworks, and digital infrastructure decisively influence how AI can enhance or limit scientific dissemination. Recent literature warns that, without ethical criteria and transparency standards, these technologies can reproduce existing inequalities or create new barriers.

Despite the growing scientific output on or mediated by AI, there are still no consolidated instruments capable of directly measuring the adoption of these technologies in relation to knowledge dissemination. The available indicators focus on structural capacities, governance, or infrastructure, but do not evaluate the impact of AI on the visibility, citation, or openness of scientific research. This methodological gap limits our understanding of how Latin American scientific ecosystems are incorporating or adopting AI in their dissemination dynamics.

Faced with this gap, the need arises to construct an indicator that articulates bibliometric variables with information on digital infrastructure and research effort. Integrating these dimensions can allow for the evaluation not only of technological presence but also of the capacity of researchers in Latin American countries to generate visible and accessible knowledge in AI-mediated environments.

Designing such an indicator involves significant methodological challenges. The wide diversity in scales, units, and variable distribution requires applying appropriate statistical transformations, such as standardization using Z-scores or PCA, for visualization and exploratory analysis. It also requires incorporating Shannon entropy analysis so that the weighting of variables reflects the informational complexity of the system,

avoiding biases arising from strong correlations between similar indicators.

In addition to its technical value, an indicator aimed at measuring the adoption of AI in the dissemination of general knowledge allows us to approach the connections between technology, academic production, and equity in access. The possibility of knowing which countries manage not only to show that their technological infrastructure has a visible scientific impact, but also how researchers transfer knowledge, opens the door for governments to generate more informed policies and a more complete understanding of the democratization and access to knowledge in Latin America.

II. Content Development

A. Statet of the Art

Over the past few years, Artificial Intelligence (AI) has gone from being a technological promise to becoming an everyday tool for producing, analyzing, and disseminating knowledge. Language models, computer vision, and deep learning are now widely used in universities, governments, and businesses across Latin America. However, this expansion has been uneven: while some countries have managed to consolidate robust policies and advanced technological ecosystems, others still face significant limitations in infrastructure, connectivity, and technical training.

The Latin American Artificial Intelligence Index (ILIA 2024), developed by the Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC) and the National Center for Artificial Intelligence (CENIA, Chile), clearly demonstrates this disparity. Chile, Brazil, and Uruguay lead the region thanks to their sustained investment in science and technology, their open data policies, and their consolidated academic networks (ECLAC & CENIA, 2024). In contrast, countries with lower internet usage (percentage of the population) or lower spending on research and development (percentage of GDP) lag significantly behind. Even so, the index reveals widespread growth; almost all Latin American countries are incorporating AI into their development and science agendas.

The expansion of AI has profoundly transformed how knowledge is produced, circulated, and used worldwide. In Latin America, its adoption has driven the generation of scientific information and the search for new forms of dissemination, but this does not always translate into more accessible, open, or equitable knowledge. Recent literature warns that the relationship between AI and the democratization of knowledge depends largely on countries' structural conditions, information access policies, and the capacity of systems to enable knowledge reuse (Hajkowicz et al., 2023). For example, in the region, digital infrastructure, connectivity, and R&D spending remain significant barriers (OECD, 2020).

Although technological expansion is evident, its impact on the democratization of knowledge remains limited, mainly because robust regulatory frameworks that guide its adoption toward openness and equity are still not readily available. In several countries in the region, the concentration of resources, the digital divide, and the lack of shared standards hinder technological advances from translating into real opportunities for participation and learning (ECLAC, 2025). Democratizing knowledge does not only mean increasing the availability of information, but also ensuring that scientific and technological results can be freely accessed, understood, reused, and disseminated by diverse social actors. In this sense, open science and open access movements play a key role, as they allow studies and data generated with AI or other technologies to avoid being trapped behind paywalls or in exclusionary infrastructures (da Silva, 2023; del Rio Riande, 2022; Alperin, 2021).

In the field of scientific publishing, some international journals have recently incorporated policies regulating the use of Artificial Intelligence, establishing ethical and transparency guidelines in their editorial processes. Examples include PLOS, Frontiers, Elsevier, and MDPI, which have adopted explicit criteria regarding the use of AI tools in the writing, review, or validation of articles (MDPI, 2024; Elsevier, 2024). These practices represent a significant step forward in the democratization of knowledge, as they strengthen trust in scientific production and promote a more responsible and open editorial environment. From this perspective, regulating the use of AI in scientific dissemination is a key component for evaluating how technology can contribute to a more equitable and transparent circulation of knowledge in Latin America.

The adoption of AI in the field of scientific dissemination and development presents a significant opportunity to expand knowledge dissemination channels, optimize information analysis and management processes, and promote the openness of scientific results. However, the benefits of these technologies depend on how they are implemented and regulated. Thus, technological democratization requires not only infrastructure but also evaluation and monitoring mechanisms that guarantee the responsible use of these tools. On this point, UNESCO (2023) warns that without firm and accessible ethical frameworks, AI can reinforce dynamics of exclusion.

In this context, the need arises to develop tools that allow for the analysis of AI adoption in Latin American scientific research, geared towards the democratization of knowledge. One way to do this is through the development of indicators that, in their design, integrate structural variables—such as R&D spending or the percentage of the population that uses the internet—with metrics related to scientific production, access, and dissemination. However, their construction involves the use of methods for selecting, normalizing, and weighting variables that can significantly explain the results.

These complexities have led several authors to emphasize the importance of methodological rigor in the development of indicators. Wehbe and Baroud (2024) point out that methodological transparency and comparative analyses are fundamental to ensuring the validity of these measurements. Nevertheless, this requirement for rigor is not always explicitly stated in existing instruments. A review of available indicators—such as the ILIA—revealed that they focus on technological capabilities and AI governance, without considering the potential impact of AI adoption on the direct circulation and democratization of knowledge (ECLAC & CENIA, 2024; OECD, 2022; Ríos, 2025).

This literature review highlights the lack of indicators that directly link AI adoption to research and knowledge dissemination, revealing more challenges than methodological solutions for their development. In this paper, we present the

design of an indicator that measures AI adoption in research conducted in Latin America and disseminated through publications. This tool aims to demonstrate how Latin American researchers and countries can be represented by their scientific output and results published in AI-mediated environments. Also, the results obtained are compared with the technological capabilities of those countries in order to explain the opportunities to improve access, openness and use of scientific knowledge in LATAM.

III. Methodology

Based on the challenges identified in previous studies, this project proposes to construct an indicator that measures the explainability of AI adoption in the dissemination of knowledge generated by Latin American scientists and academics, or in countries of the region, to expand access, openness, reuse, and circulation of scientific knowledge. The proposed methodology for designing the indicator integrates technological and academic production elements within a single analytical framework to explain the contribution of the generated knowledge to the democratization of knowledge.

In this regard, the first step consists of defining the conceptual and analytical framework that supports the selection of variables and the structure of the indicator. This process involves reviewing the literature on artificial intelligence adoption, explainability, and indicator construction, prioritizing those studies that articulate technical criteria with principles of open access and knowledge democratization. Based on this framework, the project seeks to establish the dimensions of analysis and the relationships between the potential scientific, technological, and social elements that may be involved. Figure 1 shows the final organization of the dimensions and variables resulting from the proposed conceptual framework.



Figure 1 Elements

Subsequently, the second step is to select the representative variables for each identified element. To do this, comparable and up-to-date statistical sources from the World Bank will be used, as well as scientific databases that provide information on the visibility, impact, and openness of academic output. The variables should reflect both the technological infrastructure and research effort, as well as the mechanisms for disseminating and accessing knowledge. The variables defined for this proposal are shown in Table 1.

Variable	*Nature*	*Description*
Scopus_Citations	Quantitative discrete	Number of citations recorded by Scopus for the article.
CrossRef_Citations	Quantitative discrete	Number of citations recorded by CrossRef for the article.
References	Quantitative discrete	Total bibliographic references included in the document.
CiteScore	Quantitative continuous	Value of the CiteScore indicator associated with the journal where it is published.
SNIP	Quantitative continuous	Source Normalized Impact per Paper (SNIP) indicator of the journal where it is published.
SJR	Quantitative continuous	SCImago Journal Rank (SJR) indicator of the journal where it is published.
Number_of_Downloads	Quantitative discrete	Total number of downloads of the article on the hosting platform.
Publication_Country	Qualitative nominal	Nationality of the authors or country of publication, according to the selection criteria.
R&D Expenditure (% of GDP)	Quantitative continuous	Research and development expenditure as a percentage of the Gross Domestic Product (GDP) of the corresponding country.
Internet Access (% of population)	Quantitative continuous	Percentage of the total population using the Internet in the corresponding country.

Table 1 Consolidated Variables

Once the variables are defined, a transformation and normalization process is proposed. First, a logarithmic transformation will be applied to metrics that typically exhibit skewed distributions to stabilize their variability. Subsequently, all variables will be standardized using Z-scores, ensuring comparability across different measurement scales and enabling their integration into a single analytical framework.

The next methodological step involves examining the structure of internal relationships between variables through Principal Component Analysis (PCA), a statistical technique that will synthesize correlation patterns. Based on the results of this analysis, the relative importance of each variable will be calculated to obtain the final weights. Additionally, Shannon's entropy method will be applied to assign weighted values that reflect the amount of information contributed by each component. The sequence of these procedures and their methodological articulation are presented schematically in Figure 2, illustrating the flow of the transformation, analysis, and weighting process.



Figure 2 Information Processing

Subsequently, the indicator will be constructed through linear aggregation of the weighted, normalized values, yielding synthetic values that reflect a degree of AI adoption attributable to knowledge dissemination. This value will be rescaled between 0 and 100 to facilitate interpretation and comparison between countries. The logic of the indicator construction process and the sequence of steps involved are represented in Figure 3.



Figure 3 Process of constructing the proposed indicator

Finally, the indicator is proposed to be evaluated through a methodological comparison with the World Bank's 2022 GovTech Maturity Index (GMTI) and the 2025 Latin American Artificial Intelligence Index (ILIA). This process seeks to establish the indicator's external and convergent validity by examining whether its behavior is consistent with an international benchmark and whether it reflects expected structural patterns among countries in terms of digital maturity and AI development. The indicator's conceptual independence will also be analyzed to verify that it is not redundant but rather provides a complementary dimension. These methodological steps aim to ensure the coherence, relevance, and consistency of the instrument for measuring and understanding the contribution

of artificial intelligence to openness and equity in the region's knowledge systems. The sequence of the validation process and the comparison criteria used are summarized in Figure 4.



Figure 4 Evaluation process of the proposed indicator

IV. Experience Design

In line with the development of the proposed indicator, an empirical framework is proposed that integrates both technological elements and the dynamics of knowledge circulation and access. In this sense, the indicator aims to capture the interaction between three structural dimensions: scientific output, digital infrastructure, and research and development (R&D) efforts. These dimensions are operationalized through observable quantitative variables: $Scopus\_Citation$, $CrossRef\_Citations$, $References$, $CiteScore$, $SNIP$, SJR, $Number\_of\_Downloads$, $Research\ and\ Development\ Expenditure\ (\%\ of\ GDP)$, and $Internet\ Access\ (\%\ of\ population)$. These variables were selected for their capacity to reflect both the quality and impact of scientific output (through bibliometric indicators) and the infrastructure that enables knowledge circulation (digital access and R&D expenditure). Together, they represent the pillars that determine a country's capacity to generate, disseminate, and reuse knowledge in AI-mediated environments.

Based on this conceptual framework, the construction of the indicator begins with a process of refining, transforming, and harmonizing the selected variables. Since metrics such as citations, references, and downloads often exhibit highly skewed distributions, the logarithmic transformation $log(1+x)$ was applied to reduce the influence of extreme values and stabilize variability. Simultaneously, a dichotomous variable was incorporated to identify whether the observation corresponds to a Latin American country, defined as:

$$LATAM_{flag} = \begin{cases} 1, & if\ the\ item\ belongs\ to\ a\ Latin\ American\ country. \\ 0, & otherwise \end{cases} (1)$$

Once these initial transformations were carried out, all variables were standardized using Z-scores to ensure comparability between heterogeneous scales, applying:

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{s} (2)$$

To allow each indicator result to be expressed in terms of standard deviations from its mean.

Using the harmonized dataset, a Principal Component Analysis (PCA) was performed to synthesize the internal structure of correlations between the variables. Each principal component is characterized by an eigenvalue given by:

$$\lambda_j = sdev_j^2 (3)$$

and those components that comply with Kaiser's rule were retained, that is:

$$\lambda_j > 1 (4)$$

Subsequently, the factor loadings $load_{ij}$, representing the weight with which each variable contributes to each component, were examined. From these loadings, the relative importance of each variable was calculated using:

$$Importance_i = \sum_j load_{ij}^2 * \lambda_j (5)$$

and these importances were normalized to obtain the final weights used in the construction of the synthetic score:

$$weight_i = \frac{Importance_i}{\sum_j Importance_i} (6)$$

Additionally, the informational complexity of the system was evaluated using Shannon entropy. To do this, the proportion of variance explained by each retained component was first estimated:

$$p_j = \frac{\lambda_j}{\sum_k \lambda_k} (7)$$

and subsequently the total entropy was calculated:

$$H = -\sum_j p_j log_2(p_j) (8)$$

In turn, the maximum possible entropy for a set of n_{comp} components is defined as:

$$H_{max} = log_2(n_{comp}) (9)$$

which allows us to derive a relative measure of information dispersion:

$$H_{rel} = \frac{H}{H_{max}} (10)$$

This entropic analysis allows us to assess whether the information structure is concentrated in a few dominant factors or, conversely, distributed more evenly among several components.

Once the structural relationships in the data were identified, a specific synthetic score was constructed for the academic impact variables using a PCA restricted to this subset. A base score was then defined using the resulting weights.

$$Score_{impact} = Z_{impact} * w_{impact} (11)$$

which was transformed to a common scale of 0 to 100 by:

$$Score_{impact,0-100} = 100 * \frac{Score_{impact} - min(Score_{impact})}{max(Score_{impact}) - min(Score_{impact})} (12)$$

In order to incorporate the structural dimension that defines a country's capacity to integrate AI into its knowledge production and circulation dynamics, the variables of R&D Expenditure and Internet Access were considered.

These were normalized using the following equation:

$$X_{norm} = \frac{X - min(X)}{max(X) - min(X)} (13)$$

Based on this, a regional factor was defined that integrates the Latin American context and structural capacities, formulated as:

$$RegionalFactor = 1 + 0.25 * LATAM_{flag} + 0.35 * Spent_{norm} + 0.40 * Internet_{norm} (14)$$

Finally, the integration between the impact score and this structural factor gives rise to the indicator: AINL (Adoption of AI in research developed in LATAM).

$$AINL_{index} = Score_{impact} * RegionalFactor (15)$$

and, to facilitate comparative interpretation, it was rescaled again to the 0–100 range:

$$AINL_{index,0-100} = 100 * \frac{AINL_{index} - min(AINL_{index})}{max(AINL_{index}) - min(AINL_{index})} (16)$$

The final interpretation of the indicator was based on country averages, calculated using:

$$\overline{Index}_{country} = \frac{1}{n}\sum index_i (17)$$

Thus, it is possible to identify differences in the relative capacity of each nation to generate, disseminate and take advantage of scientific knowledge in an environment marked by the expansion of Artificial Intelligence.

V. Results

As a starting point, an exploratory data analysis (EDA) was conducted to gain a preliminary, yet robust, understanding of the behavior of the variables included in the study. This step is crucial, as it allows for the identification of the magnitude and direction of differences between countries, the recognition of concentration or dispersion patterns, the assessment of outliers, and the anticipation of potential relationships between indicators before proceeding with more specific analyses or modeling. The EDA also plays a key role in revealing the structural heterogeneity of the data, facilitating the distinction between indicators that behave in a relatively stable manner and others that exhibit extreme variations—aspects that subsequently have a direct impact on the interpretation of comparative results and the selection of appropriate analytical techniques.

Indicador	Promedio	Desv_Estandar	Coef_Variacion	Min_Valor	Max_Valor	Rango
Citas_CrossRef	4,2847826	39,7391988	9,2744959	0	2699	2699
Citas_Scopus	3,3017787	34,817345	10,545027	0	2371	2371
CiteScore	1,6553024	1,9134472	0,5546817	2	18	16
Gasto en I+D (% del PIB)	0,1026339	0,1214016	1,1828605	0	0,31296	0,31296
Acceso a Internet (% de la pob.)	67,7899141	18,3099306	0,2848496	0	80,5867	80,5867
Numero_de_Descargas	681,3106719	974,9175862	0,7658112	100	2997	2897
Referencias	48,7942688	59,2093454	0,8035646	1	479	478
SJR	1,0629506	0,6576393	0,6186922	0,3	3	2,7
SNIP	1,1700632	0,4711913	0,4027058	0,5	2,5	2

Table 2 Initial exploration of the variables

Based on this initial exercise, Table 2 summarizes the main descriptive statistics for each indicator. It shows that metrics such as citations and downloads exhibit high levels of dispersion, evidenced by large standard deviations and very high coefficients of variation. In contrast, indicators associated with quality—such as CiteScore, SJR, and SNIP—show more stable and homogeneous distributions, with lower levels of relative variability. Finally, enabling factors such as R&D spending and internet access also exhibit marked differences. This initial overview confirms the existence of significant gaps in scientific output, quality, and infrastructure among the countries analyzed, laying the groundwork for more in-depth interpretations in later stages of the study.

Geographically, the index values reveal marked and consistent differences between countries. Uruguay stands out with 55.1 points, placing it well above the rest and consolidating its position as the country with the best relative performance in the region. This indicates the greater efficiency of its ecosystem in ensuring that the knowledge generated is visible, cited, and accessible. Argentina (34.4) and Chile (31.2) follow, forming a superior group characterized by relatively consolidated scientific systems. At an intermediate level are Colombia (29.4), Costa Rica (27.4), Peru (27.1), Brazil (26.8), and Mexico (26.4), whose values show a more clustered distribution, suggesting moderate but consistent performance. Finally, Ecuador (22.9) and Venezuela (19.0) register the lowest values in the index, demonstrating greater structural challenges and a less effective link between R&D investment and bibliometric impact. It should be noted that, although in this section the analysis focuses primarily on Latin America, the behavior of China, the United States and the United Kingdom will be examined at the end of the section for comparative purposes based on what is presented in table 3, given that the main interest of the study is concentrated on the Latin American regional dynamics.

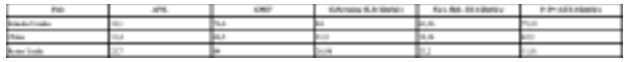


Table 3 INAL, GMTI and synthetic values of the ILIA dimensions in China, the United Kingdom and the United States

This pattern of results has substantial implications that reaffirm regional disparities in scientific production in Latin America. The results highlight profound differences among Latin American countries in the dissemination of visible and high-impact scientific research, reinforcing the need for government evaluation frameworks that measure knowledge dissemination capacities and are not limited solely to the volume of production or available infrastructure. The marked difference between the countries emerging as leaders and those lagging behind emphasizes that structural investment and technological capacity do not automatically translate into more accessible or impactful knowledge.

Specifically, while Uruguay's position exemplifies a case of high efficiency among its researchers in achieving outstanding results, Venezuela's low score reveals significant challenges in the conditions for disseminating scientific output. Meanwhile, the intermediate position of Brazil and Mexico, despite their size and resources, suggests the existence of gaps that limit the international visibility of their scientific production. The United Kingdom also occupies this intermediate level, its moderate performance contrasting with its historical scientific capabilities and demonstrating that even well-established systems face challenges in achieving global visibility. Similarly, the presence of the United States and China within the top group reaffirms the role of highly consolidated scientific systems in the region under comparison and highlights the gap that still separates Latin America from more robust models of dissemination and impact. This presents a key area of opportunity for policies focused on the circulation and impact of knowledge produced in the region, patterns that are illustrated comparatively in Figure 5.

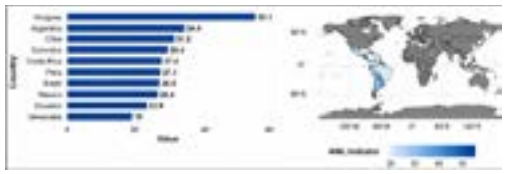


Figure 5 AINL indicator by country

A. Discussion

In order to validate the explainability of the constructed indicator and examine its consistency with established metrics on digital maturity and development in artificial intelligence, a comparative exercise was conducted with two international benchmarks: the Latin American Artificial Intelligence Index (ILIA) and the World Bank's GovTech Maturity Index (GMTI). Both indices were selected considering not only their conceptual relevance but also the availability of their most recent data. The ILIA has information up to 2025, while the GMTI's latest update is from 2022; this temporal proximity allows for reasonably consistent comparisons without incurring lags that could distort the interpretation.

The ILIA is an index developed specifically to capture the capabilities, progress, and challenges in Artificial Intelligence (AI) in Latin America. It is structured in three dimensions: (A) Enabling Factors, which include digital infrastructure, data availability, and specialized human talent; (B) Research, Development, and Adoption, which considers academic output, the entrepreneurial ecosystem, and the incorporation of AI in various sectors; and (C) Governance, which encompasses institutional, regulatory, and management frameworks geared towards responsible and sustainable AI.

However, since the ILIA does not include data for relevant economies such as the United States, China, and the United Kingdom, it was necessary to supplement this information using the 2024 Global AI Vibrancy Ranking, published by Stanford University. To ensure comparability, the categories of this ranking were regrouped according to the ILIA's conceptual structure, assigned to the corresponding dimensions, and the values averaged to obtain an equivalent estimator. This procedure allowed these countries to be integrated into the analysis while maintaining the internal consistency of the set of indicators, a process outlined in Figure 6 using a flowchart.



Figure 6 Conceptual framework for the integration of extra-regional data (USA, China, UK) into the artificial ILIA index

For its part, the GMTI, updated in 2022, assesses the digital maturity of governments based on four key areas: central administrative systems, provision of digital public services, mechanisms for citizen participation, and technological enablers. Built using harmonized data for 198 economies, this index allows for the comparison of institutional capacities and government infrastructures from a global and uniform perspective.

Based on this conceptual explanation, analyses were conducted to examine the direct relationship between the AINL indicator and the values obtained in each of the ILIA dimensions, as well as with the GMTI. The first analysis used thematic maps, which revealed a positive trend: countries with higher levels of digital maturity, AI governance, enabling infrastructure, research development, and technology adoption tend to achieve higher values in the proposed indicator. Although differences exist, the overall behavior of the indicators reflects a real connection between these structural capacities and visible scientific output.

The performance in relation to the GMTI and the ILIA Governance dimension indicates that institutional advances and the digitization of the public sector contribute to improved performance in knowledge generation and dissemination. However, the relatively high dispersion suggests that these conditions alone do not guarantee a high scientific impact, confirming that the AINL indicator captures dynamics inherent to the academic system, such as journal quality, citation levels, and scientific visibility, which do not depend exclusively on advances in government management.

On the other hand, the relationship with Enabling Factors and the R&D&I dimension appears clearer and more consistent, which is expected, since these variables directly reflect digital infrastructure, talent availability, and research effort. Taken together, these results demonstrate that digital and institutional structures that foster AI and technological innovation in general also contribute to the production and dissemination of AI-mediated scientific knowledge, relationships summarized in Figure 7.



Figure 7 Developed for the visualization of the AINL indicator and its comparisons: GMTI and ILIA dimensions (Governance, Enabling Factors and R&D&I) (https://4xscb0-diana0catalina-hernandez0rojas.shinyapps.io/Indicadores/)

To explore the potential relationships between these indicators and the one we present, a heatmap was constructed that combines the AINL indicator, the three dimensions of the ILIA (Enabling Factors, Governance, and R&D&I), and the GMTI index. This matrix visualization allows us to identify groups of countries with parallel trajectories in their digital and technological development, as well as patterns of co-movement among the different indicators. In general, countries with high scores in digital infrastructure, institutional capacities, and maturity in government technologies also tend to show relatively high levels in the AINL indicator, demonstrating the existence of common structural factors that strengthen both scientific development and technological adoption.

When comparing countries, Uruguay, Brazil, Chile, and Colombia stand out, showing intense tones in most columns, reflecting solid and consistent performance across the set of indicators. This suggests that they have more balanced technological ecosystems and institutional foundations that

favor the consolidation of AI in various sectors. In contrast, countries like Venezuela and, in some dimensions, China, show lower values, highlighting significant gaps in enabling factors and governance that limit both technological adoption and visible scientific output.

The AINL indicator exhibits a distinct pattern compared to the other metrics: while it follows the general trend, it does not exactly replicate the values of the structured indices used for comparison. This confirms that it measures components specific to scientific performance—such as citations, editorial quality, and visibility—that are not entirely dependent on institutional maturity or digital infrastructure. The relative consistency between columns, along with these differences, reinforces the validity of the proposed indicator and allows for the clear identification of which countries stand out for their capacity to generate impactful knowledge, aspects that are summarized in Figure 8.

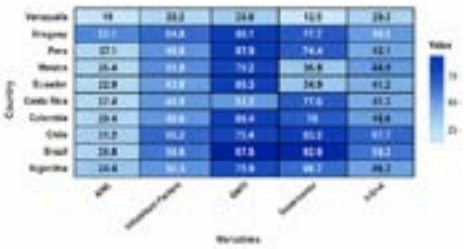


Figure 8 Heatmap of the AINL, ILIA and GMTI indicators

Furthermore, to facilitate direct comparisons, bar charts were developed showing individual country values for each indicator, clearly identifying which countries excel or lag behind across the metrics considered. This visualization allows for the simultaneous observation of enabling capabilities, government digital maturity, AI governance, research development, and the AINL indicator, facilitating the identification of consistent patterns and differences among the metrics. In general, countries with greater institutional and technological development tend to consistently rank higher, while the bars provide a clear and intuitive visualization of the structure of each nation's digital and scientific ecosystem.

Countries such as Brazil, Colombia, and Uruguay stand out for maintaining high values in several of the evaluated dimensions, suggesting they possess solid technological foundations along with institutional and scientific frameworks that favor AI adoption and knowledge production. Conversely, Venezuela, China (in some dimensions), and the United Kingdom (in specific variables) show lower levels, highlighting imbalances between technological capabilities, governance, and scientific output. These internal differences within each country reflect that not all components of the ecosystem are progressing at the same pace and that AI integration depends on multiple factors that may not be aligned.

Regarding the AINL indicator, it is observed that it does not always coincide with the highest values of the other metrics, reaffirming that it captures a distinct aspect: scientific impact measured through visibility, citation, and editorial quality. Although it maintains a general relationship with the other indicators, its independent behavior allows us to identify cases in which a country may have good infrastructure or governance, but not necessarily visible scientific output, or vice versa—patterns that are illustrated comparatively in Figure 9.

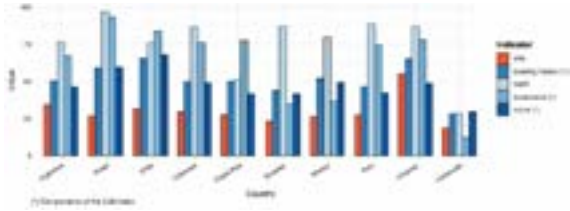


Figure 9 Comparison of Indicators by Country

On the other hand, to quantify the explanatory power and potential of this proposal, a correlation matrix was estimated between the AINL indicator, the ILIA dimensions, and the GMTI. The coefficients obtained show low to moderate positive correlations, which is expected given that these indicators share conceptual foundations related to digital infrastructure, technological development, institutional quality, and the capacity to adopt artificial intelligence.

This visualization allows us to evaluate the statistical consistency between the metrics and verify whether there are common patterns that support the validity of the proposed indicator. In general, the coefficients show positive associations, indicating that countries with better institutional, technological, and research conditions also tend to have a greater scientific impact, although the magnitude of these relationships is moderate.

In this analysis of associations, a correlation of 0.32 is observed between the AINL indicator and the GovTech Maturity Index (GTMI), indicating a strength and nature of relationship very similar to that between the GTMI and the R&D&I component of the ILIA, whose correlation is 0.29. The Enabling Factors and Governance components of the ILIA are also positively and moderately related to the GTMI, and it is observed that these same components of the ILIA are very similarly related to the AINL indicator, relationships that are summarized in the correlation matrix shown in Figure 10.



Figure 10 Correlation matrix between AINL, ILIA and GMTI

In the relationships found between the ILIA and the AINL, the levels of association observed with the Enabling Factors and R&D&I components are consistent with the origin and structure of the proposed indicator. Given its design, the indicator allows for a more detailed comparison with the R&D&I component, which enhances the explanatory power of the AINL.

The ILIA 2025 Report presents eleven main findings and, in point VIII, notes:

"Scarce and concentrated research. Brazil and Mexico account for 68% of active AI researchers and, together with Colombia, Chile, and Argentina, represent 90% of publications. Only seven countries participate in elite international conferences, with Chile and Brazil predominating. The limited presence in high-impact academic forums reduces the visibility and knowledge transfer of AI in the region; academic activity remains lagging and requires greater attention in most countries." (ILIA, 2025, p. 29).

The R&D&I component is comprised of sub-indicators directly related to academic and scientific development in AI: Publications in AI, Active AI Researchers, Productivity of AI Researchers, Impact of AI Research, Presence of AI Research Centers, Proportion of Female AI Authors, Consistent AI Research and Participation in A+ Top Conferences.

Therefore, a more detailed analysis is conducted of the associations between the indicator proposed in this work and the sub-indicators most directly linked to research activity, specifically: Publications in AI, Active AI Researchers, Productivity of AI Research, Impact of AI Research ans Consistent AI Research.

From the comparison with these sub-indicators, the following is obtained:

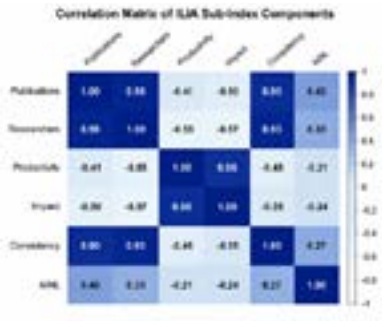


Figure 11 Correlation matrix between AINL and R&D sub-indicators

Based on the correlation matrix presented in Figure 11, a perceptible and moderately strong statistical relationship is identified between the proposed indicator and the sub-indicators AI Publications, Active AI Researchers, and AI-Consistent Research. On the other hand, the proposed indicator shows a weak and inverse association with the other sub-indicators on the list.

The analysis of these associations opens opportunities for more detailed future studies on democratization and equity in AI. In particular, it is observed that the sub-indicators AI-Consistent Research, AI Researcher Productivity, and AI Research Impact exhibit moderately strong negative relationships with each other. Although the relationship of these sub-indicators with the AINL indicator is weak, it allows us to identify the negative direction of these associations.

In general terms, it is reasonable to consider that the proposed indicator reflects, to some extent, the level of AI adoption in the analyzed scientific output. However, some limitations must be considered: the GTMI used corresponds to the latest published in 2022, while the ILIA data is from 2025, and the time frame considered for creating the indicators spans 2022–2025. Next, the performance of the INAL in countries outside of Latin America is analyzed, contrasting it with the GMTI to assess the degree of alignment between the two metrics. The results show that, while the GMTI registers a considerably higher average (75.7) compared to the LATAM Indicator average (29.73), with an average gap of approximately 46 points and an average ratio of 2.55—indicative of structurally higher performance—the strong negative correlation (-0.76) demonstrates an inverse relationship between the two indicators. This suggests that a higher level of development as measured by the GMTI does not necessarily imply better INAL performance in these countries, revealing a structural disconnect between aggregate technological capabilities and the performance captured by the regional indicator.

In contrast, the analysis of the INAL (Latin American Index) against the dimensions of Governance, Enabling Factors, and R&D&I in non-LATAM countries shows greater structural coherence. These dimensions exhibit positive correlations of moderate magnitude with the LATAM Indicator, with Governance showing the highest level of alignment (0.52), followed by Enabling Factors (0.50). Although their average ratios exceed one—indicating higher average levels than the regional indicator—the observed gaps are significantly smaller than those of the GTMI (Latin American Technological Index). This behavior suggests that the INAL's asymmetries in these countries are explained more by institutional factors and enabling conditions than by broad technological indicators, reinforcing the idea of a more organic relationship between these dimensions and regional performance.

Overall, the articulation between the proposed indicator's timeframes is compatible, and the conceptual coherence between AINL (Latin American Index of Technology), ILIA (Latin American Institute of Technology), and GTMI allows for the interpretation of the proposed results. The visual convergence in spatial analyses, the consistency of multidimensional patterns, and the statistical evidence derived from correlations demonstrate that the proposed indicator operates coherently against international benchmarks. This allows us to recognize its usefulness and potential for characterizing the capabilities of the selected countries of interest in the production and dissemination of published scientific knowledge mediated by artificial intelligence, and confirms its relevance as an analytical tool for comparative studies on the democratization and generation of knowledge in AI adoption processes.

VI. Conclusions

The adoption of Artificial Intelligence in Latin American countries continues to be marked by profound asymmetries that are directly reflected in the capacity to produce visible and accessible knowledge. The evidence obtained shows that, although the region has made progress in the use of digital technologies for scientific dissemination, these advances have not reached a level of homogeneity that would allow us to speak of a full democratization of knowledge.

The results obtained demonstrate that some countries have managed to efficiently integrate their digital infrastructure, scientific capabilities, and dissemination mechanisms. However, the gap between these positive cases and the lagging countries remains wide. This suggests that technology alone does not correct pre-existing inequalities and, in some cases, can even exacerbate them.

Uruguay stands out as the most remarkable case in the analysis, achieving the highest values on the indicator and suggesting that it is possible to obtain high levels of visibility and scientific impact with relatively limited resources. Its performance suggests that there are organizational and institutional efficiency factors that allow for maximizing the potential of digital technologies for knowledge dissemination.

At the opposite end of the spectrum, Venezuela has the lowest score, reflecting a combination of structural deterioration, a lack of investment in research, and weak knowledge dissemination mechanisms. Its situation suggests that institutional and economic constraints directly affect the visible scientific impact of academic output, even in the presence of emerging technologies like AI.Countries in intermediate positions, such as Brazil and Mexico, exhibit a pattern that warrants a different interpretation. Despite having more resources, a larger volume of academic output, and more robust research ecosystems, their scores do not reach expected levels. This suggests gaps related to efficiency in scientific visibility, the implementation of open access, or a lack of established practices for the digital dissemination of knowledge.

Comparing this indicator with established metrics such as the ILIA and the GovTech Maturity Index allows us to understand how digital maturity and technological governance relate to visible scientific output. The positive correlations confirm that the availability of infrastructure, the existence of regulatory frameworks, and the public adoption of AI foster more favorable conditions for academic dissemination. However, the moderate magnitude of these correlations also suggests that technological infrastructure, by itself, does not guarantee scientific visibility. This reinforces a relevant conclusion: knowledge dissemination is a complex phenomenon that depends on multiple dimensions and not solely on access to cutting-edge technologies.

Detailed analysis of the correlations with the ILIA subcomponents reveals that the link between AI adoption and scientific output is neither linear nor uniform. While there is a clear association with variables such as publications and active researchers, this pattern is not replicated in dimensions such as scientific productivity or specific impact in AI. This result suggests that the AINL indicator measures a broader phenomenon, linked to editorial quality, digital access, and the effective circulation of knowledge.These findings encourage us to recognize that the scientific ecosystems that successfully translate their digital capabilities into greater visibility are not necessarily those with the highest volume of AI research, but rather those where academic production is adequately integrated with infrastructures and open knowledge policies. Thus, the indicator demonstrates its capacity to capture editorial and dissemination dynamics that are often overlooked by other indices focused exclusively on technological capabilities.

The accumulated evidence demonstrates that the democratization of knowledge requires a comprehensive approach that combines technologies, public policies, publishing capabilities, scientific infrastructure, and open knowledge processes. AI can play a central role in this process by facilitating the visibility, reuse, and analysis of scientific information. However, these benefits only materialize when institutional systems capable of sustaining them exist. Likewise, it is possible to conclude that the region needs not only to invest in digital infrastructure but also to strengthen its open access practices, guarantee editorial quality, and expand participation in international scientific dissemination networks and platforms. These factors largely determine the actual capacity to transform academic production into accessible and visible knowledge.

The AINL indicator allows us to identify and differentiate which countries have better-articulated ecosystems for enhancing scientific visibility and which require more profound interventions. Furthermore, it opens the possibility of conducting detailed analyses that support the design of public policies aimed at equity in access to knowledge.

Taken together, the findings suggest that the adoption of AI in dissemination through scientific publishing represents a strategic opportunity for Latin America, but its realization depends on both technological capabilities and the strength of scientific, publishing, and institutional systems. The region faces a significant challenge, but also a real possibility of moving toward more open, equitable, and democratic knowledge ecosystems. Finally, this work opens up an agenda for future research. The indicator can be expanded by incorporating open science variables, data reuse metrics, participation in public repositories, or features of access to digital journals. It also provides a solid foundation for studying causal relationships between technological investment, scientific output, and knowledge dissemination in the region.

References

[1] CEPAL & CENIA, *Índice latinoamericano de inteligencia artificial 2024*, 2024.

[2] S. Hajkowicz, et al., "Artificial intelligence adoption in the physical sciences, natural sciences, life sciences, social sciences and the arts and humanities: A bibliometric analysis," 2023.

[3] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), *Leveraging the impact of new technologies in Latin America*, 2020.

[4] CEPAL, *Artificial intelligence and sustainable development in Latin America*, 2025.

[5] G. del Rio Riande, "The importance of open access in Latin America," *Aacademica*, 2022; J. P. Alperin, "Open access and scholarly publishing in Latin America," Stanford University, 2021.

[6] UNESCO, *Artificial intelligence and democracy*, 2023.

[7] F. Wehbe and M. Baroud, "Composite indicators and sensitivity analysis in policy evaluation," 2024.

[8] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), *The strategic and responsible use of artificial intelligence in the public sector of Latin America and the Caribbean*, 2022.

[9] Organisation for Economic Co-operation and Development and Joint Research Centre, *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. Paris: OECD Publishing, 2008, ISBN 978-92-64-04345-9.

[10] Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence, *Global AI vibrancy tool*.

Modelo de automatización para la gestión de la infraestructura de TI del Grupo de Investigación GRID de la Universidad del Quindío

1st Juan M. Florez-Vasquez.
Facultad de Ingeniería
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
juanm.florezv@uqvirtual.edu.co

2nd Jose D. Amaya-Restrepo
Facultad de Ingeniería
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
josed.amayar@uqvirtual.edu.co

3rd Luis E. Sepúlveda-Rodríguez
Facultad de Ingeniería
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
lesepulveda@uniquindio.edu.co

***Resumen*— La gestión manual de la infraestructura de Tecnologías de la Información (TI) genera riesgos operativos y dependencia crítica del conocimiento individual, tanto en entornos académicos como organizacionales. Frente a esta problemática, este trabajo presenta el diseño de un modelo arquitectónico de automatización de infraestructura TI, tomando como caso de estudio el Grupo de Investigación GRID de la Universidad del Quindío, donde múltiples tareas se ejecutan de forma manual, contraviniendo buenas prácticas de marcos como ITIL 4 y COBIT 2019. El modelo se fundamenta en Infraestructura como Código (IaC) y *scripts* especializados. La metodología, de carácter híbrido, combina PMBOK y Scrum, soportada por un estudio de mapeo sistemático, y se organiza en cinco fases: identificación de componentes; selección de tecnologías; diseño arquitectónico; implementación del prototipo; y validación. Los resultados en curso incluyen la caracterización de necesidades, problemas y oportunidades del contexto, la definición de criterios funcionales, técnicos y de gobernanza, y una taxonomía para clasificar la literatura recuperada. Más allá de resolver una necesidad específica del GRID, el trabajo busca construir un marco operacional transferible que sirva como referente metodológico para otros grupos u organizaciones que enfrenten desafíos similares. Se espera que el modelo final entregue métricas de reducción de intervención manual, replicabilidad de configuraciones y documentación ejecutable.**

Palabras clave—Automatización, Infraestructura como Código (IaC), Gestión de TI.

I. Introducción

Las infraestructuras de Tecnologías de la Información (TI) en entornos académicos y organizacionales cumplen un papel decisivo en el soporte de procesos críticos como la docencia, la investigación y la prestación de servicios. En el caso particular de los grupos de investigación, estas infraestructuras soportan cargas de trabajo como servidores, hipervisores, contenedores, accesos remotos y tareas programadas, cuya gestión eficiente es fundamental para garantizar la continuidad operativa [1], [2]. En estos entornos, la eficiencia en la administración de recursos no depende únicamente de la disponibilidad de hardware y software, sino también de la existencia de mecanismos de automatización que reduzcan la intervención manual, estandaricen los procesos y documenten las configuraciones de forma ejecutable [3], [4].

En múltiples ámbitos la ausencia de automatización en la gestión de infraestructura TI incide directamente en la dependencia del conocimiento técnico individual, la lentitud en la respuesta ante incidentes y la vulnerabilidad ante la rotación de personal. Por ello, un modelo de automatización adquiere valor no solo como un medio para reducir tareas repetitivas, sino como componente central de una estrategia más amplia de gobernanza de TI, gestión del conocimiento y fortalecimiento de la confiabilidad de los servicios [5], [6]. Marcos como COBIT 2019 e ITIL 4 enfatizan que la estandarización y la automatización de procesos son prácticas esenciales para alinear la tecnología con los objetivos misionales de la organización y mitigar riesgos operativos [1], [2]. Diversos estudios han mostrado que la automatización basada en IaC contribuye además a reducir errores de configuración y mejorar la reproducibilidad operativa [14].

Este trabajo aborda esa problemática en el contexto del Grupo de Investigación en Redes, Información y Distribución (GRID) de la Universidad del Quindío, cuya infraestructura tecnológica presta soporte a procesos de docencia, investigación y extensión. En este caso de aplicación, la ausencia de un modelo de automatización limita la gestión de servidores, hipervisores, contenedores, accesos remotos y tareas programadas, generando una alta dependencia de operadores humanos con conocimientos técnicos específicos y aumentando el riesgo de pérdida de información ante la rotación de integrantes [7].

Frente a esta problemática, el presente trabajo propone el diseño e implementación de un modelo arquitectónico de automatización para la gestión de la infraestructura TI del GRID. Este modelo se fundamenta en el paradigma de Infraestructura como Código (IaC), utilizando herramientas que permitan la automatización de infraestructura TI, complementado con *scripts* especializados en Bash y mecanismos de programación de tareas nativos de sistemas operativos GNU/Linux [8], [9]. El proyecto adopta un enfoque metodológico híbrido, combinando la planificación estructurada de PMBOK con la ejecución iterativa de Scrum, soportada por un estudio de mapeo sistemático [3]. Más allá de resolver una necesidad específica del GRID, el trabajo

busca construir un marco operacional documentado y transferible, que sirva como referente metodológico para otros grupos de investigación y organizaciones que enfrenten desafíos similares en la gestión manual de su infraestructura TI. Se espera que el modelo final entregue métricas de reducción de intervención manual, replicabilidad de configuraciones y documentación ejecutable.

El presente trabajo expone los avances de un trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero de Sistemas y Computación. El contenido se distribuye en cinco secciones que corresponden a las fases metodológicas del proyecto: la Sección II describe el contexto del problema y su pertinencia para la educación en ingeniería; la Sección III detalla la metodología empleada; la Sección IV presenta los resultados parciales obtenidos; la Sección V discute los hallazgos desde tres perspectivas complementarias; y la Sección VI expone las conclusiones y el trabajo futuro.

II. Contexto del Problema y Pertinencia Para la Educación en Ingeniería

En entornos académicos y organizacionales que dependen de servidores, hipervisores, contenedores y servicios digitales especializados, la disponibilidad oportuna de los recursos de TI condiciona la calidad de los servicios. Cuando no existen mecanismos de automatización, estandarización o documentación ejecutable, problemas como la dependencia del conocimiento individual, la lentitud en la respuesta ante incidentes y la vulnerabilidad ante la rotación de personal dejan de ser solo dificultades técnicas y pasan a afectar procesos misionales [5], [7].

El caso del GRID permite observar esta situación en un contexto concreto. El grupo cuenta con una infraestructura conformada por servidores, hipervisores, contenedores, sistemas de respaldo y servicios de TI que apoyan procesos de docencia, investigación y extensión. Sin embargo, la ausencia de un modelo de automatización se traduce en limitaciones operativas que impactan de forma directa el desarrollo de experiencias formativas y de investigación.

En primer lugar, se identificó que la configuración de nuevos servidores, la actualización de contenedores y la gestión de accesos remotos requieren intervención manual, consumiendo tiempo valioso del personal técnico y generando dependencia de individuos específicos. En segundo lugar, la falta de mecanismos de documentación ejecutable implica que el conocimiento técnico no queda registrado de forma reusable, lo que incrementa el riesgo de pérdida de información ante la rotación de integrantes del grupo. Finalmente, la ausencia de procesos estandarizados para el encendido y apagado seguro de la infraestructura, así como para la ejecución de tareas programadas, dificulta la escalabilidad de los servicios y la recuperación ante incidentes [7].

Desde una perspectiva de educación en ingeniería, esta problemática resulta relevante por al menos tres razones. La primera es que la infraestructura del GRID constituye un entorno real de aprendizaje y experimentación para los estudiantes del programa de Ingeniería de Sistemas y Computación, de modo que sus restricciones técnicas repercuten directamente en la calidad de la formación práctica. La segunda es que el problema integra dimensiones tecnológicas, arquitectónicas, operativas y de gestión, lo que lo convierte en un caso de estudio pertinente para un trabajo de aplicación abordable desde múltiples perspectivas. La tercera es que el resultado esperado no se limita a una mejora local, sino que busca producir un marco metodológico y técnico que ayude a estructurar decisiones sobre automatización de infraestructura, gestión del conocimiento y gobierno de TI en escenarios académicos y organizacionales con necesidades afines [1], [2].

De esta manera, el aporte del trabajo no consiste únicamente en implementar herramientas de automatización, sino en estructurar un marco operacional que conecte diagnóstico, identificación de componentes automatizables, selección de tecnologías, diseño arquitectónico y validación progresiva. La evolución hacia paradigmas como DevOps y *Site Reliability Engineering* (SRE) ha transformado la forma en que las organizaciones gestionan infraestructura y confiabilidad operativa [4], [11]. Este cambio también exige que los futuros ingenieros de sistemas no solo comprendan la configuración de hardware y software, sino que desarrollen capacidades para tratar la infraestructura como código ejecutable y gestionable mediante procesos automatizados [4]. Integrar estas prácticas en el GRID transforma su infraestructura en un laboratorio pedagógico de vanguardia, donde los estudiantes se forman en competencias de alta demanda laboral: despliegue automatizado, trazabilidad de cambios mediante control de versiones, orquestación de sistemas complejos y gobierno de TI basado en marcos como COBIT 2019 [1].

III. Metodología

El proyecto se desarrolla como un trabajo de aplicación con una secuencia metodológica alineada con el objetivo general de especificar un modelo de automatización para la gestión de la infraestructura de TI del GRID. Desde el punto de vista de gestión, esta secuencia combina prácticas ágiles con enfoques tradicionales y toma como referentes PMBOK para la planificación estructurada, Scrum para la ejecución iterativa, y los principios de gestión de la configuración y aseguramiento de la calidad inspirados en CMMI [3], [15]. Para efectos del trabajo, la metodología se organiza en cinco fases, cada una correspondiente a un objetivo específico del proyecto: i) identificación de componentes susceptibles a automatización; ii) identificación y selección de tecnologías y referentes metodológicos mediante estudio de mapeo sistemático; iii) diseño del modelo arquitectónico; iv) implementación del prototipo funcional; y v) validación del prototipo.

A. Fase 1: Identificación de componentes susceptibles a automatización

La primera fase metodológica se orientó a comprender el estado actual de la infraestructura de TI del GRID y a delimitar qué procesos de gestión podían ser automatizados. Para ello, se diseñó y aplicó un instrumento de recolección de información mediante entrevista guiada y estructurada,

implementada a través de un formulario digital, a los actores con conocimiento directo de la administración de la infraestructura y de sus dinámicas operativas.

La información recolectada se organizó mediante análisis categorial, distinguiendo necesidades, problemas y oportunidades. A partir de esta caracterización, se desarrolló una segunda actividad dentro de la misma fase, consistente en traducir los hallazgos del diagnóstico en criterios para orientar la evaluación y el diseño del modelo de automatización. Estos criterios se agruparon en dimensiones funcionales, técnicas, de monitoreo y de gobernanza, con el fin de convertir el diagnóstico inicial en un insumo operativo para las fases posteriores.

Metodológicamente, esta fase permitió construir una línea base del problema, delimitar el alcance funcional esperado para el modelo y establecer las condiciones que luego servirán para comparar alternativas tecnológicas, justificar decisiones de diseño y orientar la implementación del prototipo.

B. Fase 2: Identificación y selección de tecnologías y referentes metodológicos

La segunda fase se concibe como un frente de exploración y apoyo a la toma de decisiones tecnológicas. Para ello, el proyecto incorpora un estudio de mapeo sistemático (*Systematic Mapping Study*, SMS) orientado a identificar herramientas, modelos, metodologías y buenas prácticas relacionadas con la automatización de infraestructura TI, el paradigma de Infraestructura como Código (IaC) y la gestión de configuraciones en entornos GNU/Linux [6], [8], [9].

En esta fase se definió un protocolo general de trabajo que incluye la formulación de objetivos y preguntas de investigación, la delimitación de criterios de búsqueda y selección, y el diseño de una taxonomía para clasificar la literatura recuperada. De manera complementaria, esta fase contempla el uso del proceso *Decision Analysis and Resolution* (DAR) de CMMI como mecanismo para apoyar la selección objetiva de herramientas a partir de los criterios definidos en la fase anterior y de la evidencia organizada mediante el SMS [15].

En este sentido, la segunda fase articula exploración y decisión: primero amplía el panorama de alternativas y referentes disponibles; luego proporciona una base estructurada para justificar la selección tecnológica que dará soporte al modelo propuesto.

C. Fase 3: Diseño del modelo arquitectónico

La tercera fase se orienta al diseño del modelo de automatización desde una perspectiva de arquitectura empresarial. Con base en los insumos producidos por el diagnóstico (Fase 1) y la evidencia organizada en la fase anterior (Fase 2), se plantea la especificación del modelo arquitectónico sustentado en los lineamientos de TOGAF (The Open Group *Architecture Framework*). La representación formal de la arquitectura se realizará mediante ArchiMate, un lenguaje de modelado gráfico que permite describir y visualizar las capas, componentes y relaciones de la solución de manera estandarizada [16].

De forma paralela, esta fase contempla la definición de los flujos de trabajo automatizados y la documentación completa del modelo arquitectónico. Así, esta fase no solo estructura la solución tecnológica, sino también la base técnica que servirá como guía para la implementación del prototipo en la etapa siguiente.

D. Fase 4: Implementación del prototipo funcional

La cuarta fase corresponde a la materialización del modelo mediante la implementación de un prototipo funcional en un entorno controlado de la infraestructura del GRID. Esta etapa toma como base las decisiones tecnológicas adoptadas previamente y la arquitectura definida en la tercera fase, con el propósito de construir una versión operativa que permita integrar los componentes principales del modelo.

Metodológicamente, la implementación del prototipo constituye el paso intermedio entre el diseño y la validación. En esta fase se espera concretar la configuración de las herramientas seleccionadas, la articulación de componentes de monitoreo y la preparación del entorno sobre el cual se ejecutarán las pruebas posteriores [17].

E. Fase 5: Validación del prototipo

La quinta fase se centra en la validación del prototipo con base en el plan de pruebas diseñado previamente. Su propósito es obtener métricas de desempeño asociadas a tiempos de ejecución de tareas automatizadas, tasa de error en procedimientos críticos, nivel de documentación ejecutable alcanzado (*scripts*, *playbooks*, configuraciones versionadas), comportamiento de los procesos y monitoreo del estado de la infraestructura, de modo que sea posible valorar el comportamiento del modelo en relación con las necesidades identificadas en el contexto del GRID.

En consecuencia, esta fase proporciona el cierre metodológico del proyecto, ya que permite contrastar la solución implementada con los objetivos definidos, identificar brechas de mejora y formular recomendaciones para trabajo futuro.

IV. Resultados

El proyecto se encuentra en desarrollo, por lo cual los resultados presentados a continuación se organizan de acuerdo con las cinco fases metodológicas descritas. Esta estructura permite diferenciar con claridad qué productos ya fueron obtenidos y cuáles corresponden a resultados en curso o esperados en las fases posteriores, resaltando el valor práctico que ya ofrecen las etapas iniciales del trabajo.

A. Resultados de la Fase 1: Identificación de componentes susceptibles a automatización y definición de criterios

El primer resultado consolidado del proyecto corresponde a la identificación de los componentes de la infraestructura TI del GRID que son susceptibles de automatización. Para ello, se diseñó y aplicó una entrevista semiestructurada a actores con conocimiento directo de la administración tecnológica del grupo, lo que permitió recolectar información sobre procesos críticos, dependencias operativas, niveles de intervención manual y puntos de fallo recurrentes.

A partir del análisis de la información recolectada, se logró caracterizar las necesidades, problemas y oportunidades del contexto. En términos de necesidades, se identificó la conveniencia de automatizar tareas como la gestión de hipervisores, el despliegue y actualización de contenedores, la configuración de accesos remotos seguros, la estandarización de configuraciones de sistemas operativos y la ejecución programada de tareas de infraestructura. En cuanto a los problemas, se evidenció una alta dependencia del conocimiento técnico individual, ausencia de documentación ejecutable y riesgos operativos ante la rotación de integrantes del grupo. Finalmente, como oportunidades, se reconoció la posibilidad de estructurar un modelo de automatización que mitigue estos riesgos y permita escalar los servicios del grupo con menor intervención humana.

Como segundo resultado de esta misma fase, la caracterización obtenida se tradujo en un conjunto de criterios funcionales, técnicos, de monitoreo y de gobernanza. Estos criterios convierten el diagnóstico en un insumo operativo para la toma de decisiones posteriores, permitiendo comparar alternativas tecnológicas y verificar, por ejemplo, si una herramienta soporta IaC, si permite la automatización mediante *scripts*, si se integra con mecanismos de observabilidad, o si facilita la gestión de tareas programadas.

B. Resultados de la fase 2: estructuración del SMS y taxonomía de clasificación

El segundo resultado parcial corresponde al avance de la segunda fase del proyecto, orientada a la identificación de tecnologías y referentes metodológicos para la automatización. Hasta el momento, se cuenta con la estructuración metodológica del estudio de mapeo sistemático (SMS) como frente de apoyo a la toma de decisiones, incluyendo la definición del propósito del mapeo, la formulación de preguntas de investigación y la delimitación de un protocolo general para búsqueda, depuración y clasificación de literatura.

Como parte de esta estructuración, el SMS se organizó siguiendo el enfoque *Goal-Question-Metric* (GQM). Se definieron dos objetivos principales: G1, orientado a clasificar tecnologías, referentes metodológicos y buenas prácticas para la automatización de la gestión de infraestructura de TI; y G2, enfocado en analizar tendencias en el uso de herramientas tecnológicas y soluciones arquitectónicas empleadas en este dominio. A partir de estos objetivos se formularon preguntas de investigación y métricas asociadas para guiar el análisis de la literatura recuperada.

Este avance es relevante porque transforma la exploración bibliográfica en un proceso trazable y justificable. En lugar de depender de una revisión *ad hoc*, el proyecto dispone ya de una ruta metodológica para identificar evidencia útil sobre tecnologías de automatización, marcos de referencia (ITIL 4, DevOps, IaC) y experiencias de implementación aplicables al contexto del GRID.

Como complemento de esta fase, se construyó una taxonomía preliminar que permite organizar los estudios recuperados según su foco temático y el tipo de aporte reportado. La Fig. 1 presenta la propuesta taxonómica, la cual distingue dos grandes grupos: G1, orientado a clasificar tecnologías, referentes metodológicos y buenas prácticas; y G2, enfocado en analizar tendencias en herramientas tecnológicas y soluciones arquitectónicas.

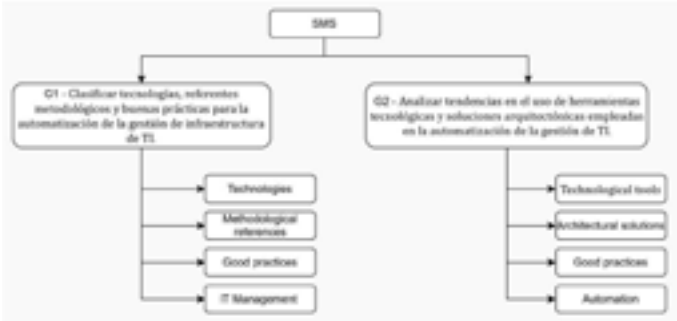


Fig. 1. Taxonomía para la clasificación de estudios del SMS.

La utilidad inmediata de esta taxonomía radica en que facilitará el análisis comparativo de la literatura e identificará qué trabajos aportan herramientas concretas, qué estudios reportan arquitecturas o metodologías, y cuáles documentan buenas prácticas o evaluaciones comparativas útiles para el diseño del modelo de automatización.

C. Resultados en curso y resultados esperados en las fases

Los avances posteriores del proyecto se concentran en la consolidación de las fases metodológicas aún en desarrollo. En primer lugar, se espera culminar el estudio de mapeo sistemático (SMS), completar la clasificación de la literatura recuperada y aplicar un proceso de soporte a la decisión que permita justificar la selección objetiva de las herramientas tecnológicas que integrarán el modelo de automatización. Este proceso busca suministrar bases comparativas que respalden decisiones tecnológicas alineadas con necesidades reales de gestión de infraestructura.

Posteriormente, el proyecto avanzará hacia la especificación y documentación del modelo arquitectónico de automatización, integrando de manera coherente las herramientas y referentes metodológicos seleccionados. El modelo estará fundamentado en el paradigma de Infraestructura como Código (IaC) y soportado por marcos de referencia como ITIL 4 y COBIT 2019.

En una etapa posterior, se contempla la implementación de un prototipo funcional en un entorno de pruebas de la infraestructura del GRID. Esta implementación buscará integrar procesos de automatización relacionados con la gestión de hipervisores, despliegue y actualización de contenedores, configuración de accesos remotos seguros y estandarización de configuraciones de sistemas operativos.

Finalmente, la validación del prototipo se realizará mediante pruebas orientadas a evaluar el cumplimiento de los objetivos definidos para el modelo. Para ello, se proyecta definir indicadores asociados a eficiencia operativa, estandarización de configuraciones y resiliencia de los servicios, permitiendo valorar el comportamiento del modelo frente a las necesidades identificadas en el diagnóstico inicial.

De esta manera, los resultados esperados quedan articulados con la forma en que la metodología plantea su obtención y verificación, y orientan el proyecto hacia resultados con valor demostrable para la gestión de infraestructura TI en entornos académicos. El proyecto aspira a entregar no solo una solución funcional para el GRID, sino también un modelo documentado y transferible que sirva como referente metodológico para otras instituciones que enfrenten desafíos similares.

V. Discusión

Los resultados parciales obtenidos permiten discutir el proyecto desde tres perspectivas complementarias.

La primera perspectiva se relaciona con el valor del diagnóstico contextual. La identificación de necesidades, problemas y oportunidades realizada en la Fase 1 mostró que la problemática abordada no puede reducirse únicamente a una cuestión de eficiencia operativa o de reducción de tiempos de administración. En realidad, el caso del GRID evidencia que la ausencia de un modelo de automatización también afecta dimensiones de gobernanza, transferencia de conocimiento y sostenibilidad operativa. La alta dependencia del conocimiento técnico individual, la falta de documentación ejecutable y la exposición a riesgos ante la rotación de integrantes amplían el alcance del problema y obligan a pensar la solución desde una perspectiva sistémica, donde la automatización no es solo una herramienta de productividad, sino también un mecanismo de gestión del conocimiento y aseguramiento de la continuidad operativa. Asimismo, enfoques DevOps e IaC favorecen la trazabilidad y la integración continua de configuraciones complejas [11].

La segunda perspectiva se relaciona con el papel del estudio de mapeo sistemático (SMS) dentro del proyecto. En muchos trabajos de aplicación en el ámbito académico, la selección tecnológica se realiza de forma intuitiva, basada en familiaridad previa con ciertas herramientas o en la disponibilidad inmediata de recursos. En contraste, este proyecto busca fundamentar dicha selección mediante un proceso de mapeo sistemático, estructurado bajo el enfoque GQM y guiado por criterios definidos explícitamente a partir del diagnóstico contextual. Esta decisión aumenta la trazabilidad metodológica del trabajo y fortalece la calidad del argumento técnico, aunque también introduce retos significativos en términos de tiempo invertido y gestión del volumen de información recuperado, así como la necesidad de mantener actualizada la revisión frente a un campo tecnológico que evoluciona rápidamente.

La tercera perspectiva se asocia con el valor transferible del trabajo. Aunque el proyecto se desarrolla en un contexto específico, los resultados de las fases iniciales muestran que las problemáticas identificadas no son exclusivas de un solo entorno. Estas situaciones son frecuentes en diversos ámbitos donde la gestión de infraestructura TI depende aún de procesos manuales y poco sistematizados, como ha sido reportado en estudios recientes sobre automatización y operación de infraestructura TI [10], [11]. En ese sentido, la principal fortaleza del trabajo radica en convertir una necesidad concreta en una ruta metodológica trazable, con productos parciales verificables y criterios que pueden orientar procesos de decisión sobre automatización de infraestructura en otros contextos con demandas semejantes.

Dado que el proyecto se desarrolla de manera progresiva, los resultados presentados corresponden a productos parciales alineados con las fases metodológicas definidas. Esto implica que, aunque ya existe una base sólida para orientar el diseño del modelo de automatización, la implementación del prototipo y la validación de sus métricas de efectividad aún constituyen etapas clave para confirmar el alcance real de la propuesta. No obstante, el avance logrado permite sostener que el aporte del trabajo no se limita al desarrollo futuro de un artefacto tecnológico, sino también a la construcción de una lógica de intervención útil para abordar problemas de automatización de infraestructura TI en contextos educativos.

Desde el punto de vista de la educación en ingeniería, el proyecto también aporta un caso de aprendizaje situado. Permite integrar gestión de proyectos (PMBOK), metodologías ágiles (Scrum), marcos de gobierno y gestión de servicios (COBIT 2019, ITIL 4), prácticas de Infraestructura como Código (IaC), evaluación de tecnologías mediante mapeos sistemáticos, y diseño de soluciones arquitectónicas en un problema real de infraestructura académica. En ese sentido, el valor del trabajo excede la solución técnica puntual y se ubica también en la formación de capacidades para abordar problemas complejos en entornos institucionales reales [13], preparando a los futuros ingenieros de sistemas para enfrentar escenarios donde la automatización, la estandarización y la gestión del conocimiento son competencias críticas.

VI. Conclusiones

El trabajo presentado avanza hacia la construcción de un modelo de automatización para la gestión de la infraestructura de TI a partir de una problemática que trasciende la eficiencia operativa y compromete dimensiones de gobernanza, transferencia de conocimiento, sostenibilidad operativa y gestión de riesgos. El caso del grupo de investigación GRID muestra que, en infraestructuras que soportan servicios críticos, la ausencia de mecanismos de automatización estandarizados puede afectar de forma directa la continuidad de los procesos misionales, especialmente cuando la operación depende de conocimientos técnicos concentrados en individuos específicos. Esta situación no es exclusiva del ámbito académico, sino que también se presenta en organizaciones de diversa índole donde la gestión de TI aún depende de procesos manuales y poco sistematizados.

Como principales resultados parciales se cuenta con: i) la caracterización de necesidades, problemas y oportunidades del contexto, identificando los procesos de TI susceptibles de automatización; ii) la derivación de criterios funcionales, técnicos y de gobernanza para orientar la selección de tecnologías y el diseño del modelo; iii) la estructuración metodológica del estudio de mapeo sistemático (SMS) bajo el enfoque GQM; y iv) una taxonomía de clasificación que permitirá organizar la literatura recuperada según su foco temático y tipo de aporte. Estos productos ya constituyen un aporte concreto, pues convierten una necesidad amplia de

automatización de infraestructura en un proceso metodológicamente trazable, técnicamente orientado y potencialmente reutilizable en otros contextos con requerimientos semejantes.

Como trabajo futuro inmediato se plantea concluir el SMS, seleccionar las herramientas candidatas, especificar y documentar el modelo arquitectónico de automatización, implementar un prototipo funcional y ejecutar su validación en entorno no productivo. La expectativa es que el resultado final entregue un modelo arquitectónico documentado, un prototipo funcional validado, métricas de efectividad de la automatización y recomendaciones para trabajos futuros orientadas a evaluar la escalabilidad del modelo. De esta forma, el proyecto no solo busca responder a una necesidad operativa concreta del GRID, sino también aportar una ruta metodológica que pueda servir de referencia para otros contextos académicos y organizacionales donde se presenten necesidades de la misma índole.

Referencias

[1] ISACA, COBIT 2019 Framework: Governance and Management Objectives. Schaumburg, IL, USA: ISACA, 2018.

[2] AXELOS, ITIL Foundation: ITIL 4 Edition. London, U.K.: TSO, 2019.

[3] Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), 7th ed. Newtown Square, PA, USA: PMI, 2021.

[4] N. Forsgren, J. Humble, and G. Kim, Accelerate: The Science of Lean Software and DevOps. Portland, OR, USA: IT Revolution, 2018.

[5] G. Kim, J. Humble, P. Debois, and J. Willis, The DevOps Handbook: How to Create World-Class Agility, Reliability, and Security in Technology Organizations. Portland, OR, USA: IT Revolution Press, 2016.

[6] K. Morris, Infrastructure as Code: Managing Servers in the Cloud. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2016.

[7] T. A. Limoncelli, C. J. Hogan, and S. R. Chalup, The Practice of System and Network Administration: DevOps and Other Best Practices for Enterprise IT, 3rd ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Professional, 2017.

[8] L. Hochstein, Ansible: Up and Running: Automating Configuration Management and Deployment the Easy Way, 2nd ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2017.

[9] Y. Brikman, Terraform: Up and Running: Writing Infrastructure as Code, 2nd ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2019.

[10] M. Rahman, T. Zimmermann, and L. Williams, "Characterizing Defective Infrastructure as Code Scripts," in Proc. IEEE/ACM Int. Conf. Automated Software Engineering (ASE), 2019.

[11] E. Wettinger, U. Breitenbücher, and F. Leymann, "Standards-based DevOps Automation and Integration Using TOSCA," Future Generation Computer Systems, vol. 74, pp. 317–332, 2017.

[12] M. Leppänen et al., "The Highways and Country Roads to Continuous Deployment," IEEE Software, vol. 32, no. 2, pp. 64–72, 2015.

[13] S. Pérez, J. Díaz, and L. Garcés, "IT Governance and Infrastructure Automation in Higher Education Environments," IEEE Access, vol. 10, pp. 112345–112359, 2022.

[14] M. Salama, R. Bahsoon, and N. Bencomo, "Managing trade-offs in self-adaptive software architectures: A systematic mapping study," in Managing Trade-offs in Adaptable Software Architectures, I. Mistrik, N. Ali, R. Kazman, J. Grundy, and B. Schmerl, Eds. Cambridge, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2017, pp. 249–297.

[15] W. González Obregón, Y. Cruz Segura, A. Parra Fernández, and Y. Trujillo Casanola, "Buenas prácticas en el empleo de CMMI en empresas desarrolladoras de software," Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas, vol. 14, no. 4, pp. 215–225, 2021.

[16] F. F. Mumtaza, R. Mulyana, and I. Y. Mukti, "Utilizing TOGAF 10 to design an enterprise architecture for BPRBCO SME digital transformation," in Proc. Int. Conf. Advancement in Data Science, E-Learning and Information Systems (ICADEIS), 2025, pp. 1–7.

[17] [17] M. Bega, F. Ercan, and B. Kuhlenkötter, "Implementation of an OPC UA information model for KPI calculations and dashboard reporting based on ISO 22400," in Proc. IEEE 8th Int. Conf. Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), 2025, pp. 1–6.

Análisis del ciclo de vida de baterías para motocicletas eléctricas en Medellín: comparativo ambiental frente a motocicletas de combustión interna.

Juan Pablo Marin Lopez
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas SIV-2R
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
juan.marin539@pascualbravo.edu.co

Álvaro Delgado Mejía .
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas SIV-2R
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
alvaro.delgado@pascualbravo.edu.co

Fredy Jaramillo Ramírez .
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas SIV-2R
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
Fredy.jaramillo@pascualbravo.edu.co

Juan Esteban Madrid
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas SIV-2R *organization*
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
j.madrid804@pascualbravo.edu.co

Santiago Manrique Martínez
Semillero de Investigación Vehículos de dos Ruedas SIV-2R
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
santiago.manrique762@pascualbravo.edu.co

David Castillo Cardona
Semillero de Investigación de Vehículos de dos Ruedas SIV-2R
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
david.castillo741@pascualbravo.edu.co

***Resumen*—En el presente trabajo se evalúa el desempeño ambiental de motocicletas eléctricas en comparación con motocicletas de combustión interna (MCI) bajo condiciones reales de operación en Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). A partir de pruebas experimentales en dinamómetro, realizadas bajo el ciclo de conducción de Medellín y el AMVA, se determinaron el consumo energético y los factores de emisión de contaminantes para ambos sistemas.**

Con base en estos resultados, se efectuó una evaluación ambiental simplificada, inspirada en los lineamientos de las normas ISO 14040 e ISO 14044, utilizando como unidad funcional 1 km recorrido. El análisis se enfocó en la huella de carbono (CO_2) y en contaminantes criterio (CO y HC), incorporando además el impacto asociado a la fabricación de baterías $LiFePO_4$ mediante datos de literatura.

Los resultados muestran que la motocicleta con motor de combustión puede almacenar mucha más energía en el tanque de combustible, comparada con la que puede almacenar la moto eléctrica en sus baterías. Además, la motocicleta de combustión requiere aproximadamente un 11% de esta energía para recorrer el ciclo AMVA, mientras que la operación en modo eléctrico demanda el 75% de la energía almacenada. Sin embargo, en materia de impacto ambiental, en las emisiones de CO_2 por km, la moto eléctrica tiene una ventaja significativa. Asimismo, en las motocicletas eléctricas se evidencia la eliminación de emisiones locales de CO y HC durante la fase de uso y la mayor vida útil de las baterías ($\geqslant$ 3000 ciclos) permite diluir su impacto de fabricación, resultando en una contribución marginal por kilómetro recorrido.

Este trabajo aporta evidencia experimental contextualizada al entorno local de Medellín y el AMVA, destacando el potencial de la electrificación del parque motociclista como estrategia efectiva para la reducción de emisiones y mejora de la calidad del aire urbano.

Palabras claves—análisis de ciclo de vida; motocicleta eléctrica; baterías; movilidad urbana; Medellín; emisiones contaminantes.

I. Introduccion

El rápido y creciente aumento del parque automotor de motocicletas en el AMVA, constituye uno de los principales factores de deterioro de la calidad del aire en la región. De acuerdo al último inventario de emisiones atmosféricas del AMVA de 2022 [1], el sector transporte es el principal responsable de las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos sin quemar (HC) y material particulado ($PM_{2.5}$), siendo las motocicletas de combustión interna una fuente relevante dentro de dicho sector. Al cierre de 2025, el parque vehicular del Valle de Aburrá ascendía a 2.6 millones de unidades, de las cuales el 60% correspondía a motocicletas; el 72% de estas son de cilindrada media y apenas el 0.3% eran eléctricas [2]. El aumento ha sido tan pronunciado, que entre 2010 y 2024 el número de motocicletas aumentó 400%, o en términos más generales, en los últimos 20 años la cantidad de vehículos que circulan por las vías del Valle de Aburrá, aumentó en 1.8 millones de vehículos, tanto carros como motos.

En este contexto, mediante investigaciones previas llevadas a cabo en el semillero de investigación en vehículos de 2 ruedas,

de la Institución Universitaria Pascual Bravo, han permitido construir una base de conocimiento articulada sobre el impacto ambiental, causado por este segmento del parque automotor local. A nivel de antecedentes, se puede mencionar que primeramente, se llevó a cabo la conversión de una motocicleta de dos tiempos a operación 100% eléctrica (VEB), evaluando su desempeño en términos de potencia, torque, autonomía y emisiones antes y después de la conversión mediante pruebas en el dinamómetro de rodillos Mustang MD-150 del Laboratorio de Investigación y Diagnóstico Automotriz (LIDA); los resultados demostraron que, aunque la operación en modo combustión exhibe mayor potencia y velocidad máxima, el desempeño de la versión eléctrica es menor, pero adecuado para las condiciones de tránsito urbano predominantes en Colombia [3]. Complementariamente, se profundizó en las políticas públicas, tecnologías de baterías, barreras técnicas y oportunidades para la conversión de motocicletas en el contexto colombiano, aportando el marco conceptual que sustenta el presente estudio [4]. Posteriormente, se cuantificaron experimentalmente las emisiones contaminantes causadas por el parque de motos, mediante la aplicación del modelo International Vehicle Emissions (IVE), evidenciando que los periodos de mayor congestión vehicular coinciden con picos de emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero en los principales corredores urbanos de Medellín [5].

Sin embargo, a pesar de la evidencia acumulada sobre los beneficios operativos de las motocicletas eléctricas, localmente existe una brecha de conocimiento respecto al impacto ambiental total asociado al ciclo de vida de las baterías usualmente usadas en automoción, que abarque desde la extracción de materiales críticos y la manufactura de las celdas, hasta la fase de uso, la segunda vida y el fin de vida. Esta perspectiva integral resulta indispensable al evaluar rigurosamente la sostenibilidad de la movilidad eléctrica y evitar una transferencia de impactos entre etapas del sistema. Así pues, el objetivo de este trabajo fue realizar un Análisis simple de Ciclo de Vida (ACV) de las baterías utilizadas en motocicletas eléctricas operadas en Medellín, integrando los resultados experimentales del semillero, los perfiles reales de conducción obtenidos mediante modelación IVE y literatura técnica especializada, con miras a determinar el kilometraje de amortización ambiental frente a motocicletas MCI equivalentes.

II. Antecedentes y Marco Conceptual

A. *Transición energética, movilidad urbana y el contexto de Medellín*

Fi En la actualidad, la movilidad eléctrica se reconoce ampliamente como una estrategia para la transición energética y la descarbonización del sector transporte. En Colombia, el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia Potencia de Vida” contempla la meta de mitigar 2.14 millones de toneladas de CO_2 en el sector transporte frente a 2021, impulsando la electrificación de la movilidad como estrategia central [6]. En el mismo sentido, Medellín y el AMVA no son ajenas a esta iniciativa, considerando que el sector transporte y el industrial concentran prácticamente el 100% de las emisiones de CO, NOx y COV registradas en la ciudad, y la alta densidad del parque automotor de motocicletas, que en su conjunto, tiene una demanda energética anual de 7 710 TJ, equivalente al 16% de la demanda total del sector transporte, lo cual las convierte en un foco prioritario de intervención [1].

La modelación efectuada con el modelo IVE, aplicada al parque automotor oficialmente registrado en el AMVA, bajo un recorrido estandarizado, confirmó que las emisiones gaseosas contaminantes alcanzan sus valores máximos durante las horas pico de movilidad, coincidiendo con velocidades bajas y aceleraciones y desaceleraciones frecuentes, por lo que la sustitución de motocicletas de combustión por eléctricas, representaría una reducción significativa de los contaminantes criterio emitidos a nivel local.

B. *Tecnologías de baterías y consideraciones operativas*

Las principales familias de baterías empleadas en motocicletas eléctricas son las de iones de litio (Li-Ion), en sus variantes de cátodo de fosfato de hierro y litio (LFP) y de óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC). Estas ofrecen mayor densidad energética (150-220 Wh/kg), lo que favorece la autonomía, pero implican cadenas de suministro de materiales críticos, como el cobalto y el níquel, con impactos ambientales y sociales significativos en la fase de extracción [7],[8]. Las baterías LFP, aunque comparativamente tienen menor densidad energética (90-120 Wh/kg), prescinden del cobalto, y además presentan una vida útil más prolongada, en términos de los ciclos de carga (usualmente mayores a 3 000 ciclos) y presentan un perfil de impacto ambiental más bajo en la fase extractiva. No obstante, para el caso específico de motocicletas, donde el factor peso y tamaño son cruciales, ambas tecnologías condicionan la viabilidad de las motocicletas eléctricas para trayectos extraurbanos, pero resultan adecuadas para las condiciones actuales de movilidad urbana, caracterizadas por velocidades bajas, que son las predominante en los principales corredores viales de Medellín y el AMVA.

C. *Desempeño real y patrones de uso en Medellín*

Las pruebas en dinamómetro [3] mostraron que la motocicleta convertida a funcionamiento eléctrico, destaca por una entrega inicial de torque superior al modo combustión, una velocidad máxima moderada (coherente con las restricciones de tránsito urbano) y una autonomía limitada por la capacidad del paquete de baterías instalado. Estos parámetros son consistentes con los patrones de conducción identificados mediante la modelación IVE: velocidades promedio bajas, eventos frecuentes de aceleración y frenado, y tiempos de ralentí prolongados en horas pico. Adicionalmente, con los datos experimentales del semillero se pudo establecer la base para parametrizar la fase de uso dentro del ACV con valores representativos del contexto local.

D. *Brecha de conocimiento*

A pesar de los avances descritos, a la fecha no se encontraron estudios locales que cuantifiquen de manera integral el impacto ambiental del ciclo de vida completo de las baterías para motocicletas eléctricas en el AMVA, ni que determinen el kilometraje de amortización ambiental frente a motocicletas de combustión equivalentes bajo las condiciones específicas de uso en Medellín. Es así como este trabajo aborda esta brecha con un enfoque contextualizado al AMVA, apoyado en datos

experimentales propios y en una base de inventario consistente con la realidad local.

III. Problema de Investigación

A pesar del crecimiento sostenido del mercado de motocicletas eléctricas en Colombia, se tiene un problema grave de cifras, pues de las 167 mil motos eléctricas que habían sido importadas hasta marzo de 2026, solo el 10% aparecen oficialmente registradas en el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT), sin embargo, aún persiste incertidumbre respecto al impacto ambiental neto derivado del ciclo de vida de sus baterías. Se desconoce la magnitud del impacto asociado a la extracción de materiales críticos y a la manufactura de las celdas, así como los beneficios ambientales reales derivados de su operación en contextos urbano. Además, no se han cuantificado escenarios de segunda vida y reciclaje en el contexto nacional, ni se ha determinado el kilometraje necesario para que la motocicleta eléctrica amortice ambientalmente su mayor huella de producción frente a una motocicleta MCI. Esta incertidumbre limita la toma de decisiones informadas en materia de política pública y planeación de la transición energética del sector movilidad en la región.

IV. Metodología

El estudio se estructuró siguiendo los principios generales de las normas ISO 14040 [9] e ISO 14044 [10], adaptados a un análisis simplificado orientado a datos experimentales obtenidos previamente.

A. Objetivo, alcance y unidad funcional

La unidad funcional definida fue 1 km recorrido bajo condiciones representativas del ciclo de conducción del AMVA. A su vez, el sistema evaluado incluyó:

- Para motocicleta eléctrica: consumo energético en uso (kWh/km), emisiones indirectas por generación eléctrica e impacto de fabricación de la batería.
- Para motocicleta de combustión interna: emisiones directas en el escape (CO_2, CO, HC)

En el estudio se excluye la fabricación del chasis y componentes comunes a ambas tecnologías.

B. Datos experimentales

El consumo energético de la motocicleta eléctrica y las emisiones de la motocicleta de combustión fueron obtenidos mediante ensayos en dinamómetro bajo el ciclo de conducción para Medellín y el AMVA. Los resultados más significativos incluyen:

- Consumo energético eléctrico: 9720 kJ/ciclo
- Autonomía: 56 km/ciclo
- Emisiones en operación con combustión: 183 g CO_2/km, 11.9 g CO/km, 8.4 g HC/km

C. Modelo de evaluación ambiental

Se implementó un modelo de cálculo sencillo que permitió estimar: emisiones de CO_2 en fase de uso, impacto de fabricación de batería (kg CO_2/kWh), vida útil basada en número de ciclos, emisiones totales por km recorrido y el kilometraje de amortización ambiental.

Para las baterías $LiFePO_4$ se consideró un impacto de 70 kg CO_2/kWh y una vida útil superior a 3000 ciclos. [11]. Aunque las baterías de Fosfato de Hierro y Litio ($LiFePO_4$ o LFP) son actualmente la opción predilecta para el almacenamiento de energía estacionaria y vehículos eléctricos de rango estándar, en gran parte debido a su perfil de sostenibilidad, también están las baterías de Niquel, Manganeso y Cobalto (MNC) que han venido ganando presencia y poularidad, aunque el impacto de la minería de metales específicos como el cobalto y el níquel es el factor determinante que eleva su huella de carbono. En la tabla siguiente se hace un comparativo de las características de ambas.

1. Tabla 1: Comparación de parámetros funcionales de las baterías LFP y las MNC [11]

Aspecto	LFP	MNC
Densidad Energía	Menor (140-170 Wh/kg). Requiere más volumen para la misma autonomía.	Mayor (200-260 Wh/kg). Ideal para vehículos de alto rendimiento.
Ciclo de Vida	Excelente (3 000-6 000 ciclos). Duran más que la vida útil del vehículo.	Moderado (1 000-2 000$ ciclos). Degradación más rápida.
Seguridad	Muy alta. Gran estabilidad térmica; menor riesgo de incendio.	Moderada. Propensa a "fuga térmica" en caso de perforación o sobrecalentamiento.
Costo	Más económica. No usa metales caros. Materias	Más costosa. Depende de la volatilidad de precios del cobalto y níquel.

Aspecto	LFP	MNC
	primas abundantes.	
Reciclaje	Bajo valor de reventa de materiales (hierro), pero proceso más simple.	Alto valor de recuperación por los metales preciosos (Co, Ni).
Huella CO_2	Baja (60-110 kg CO2/kWh).	Alta (80-150 kg CO2/kWh).
Minería	Impacto menor. El hierro y fosfato son abundantes y menos tóxicos.	Impacto alto. Minería de cobalto asociada a problemas éticos y alta toxicidad.

V. Resultados

A. *Disponibilidad energética*

La disponibilidad energético de la motocicleta en modo combustión se calcula así, teniendo en cuenta la capacidad del tanque de gasolina y asumiendo que estaba lleno durante la prueba:

energía disponible combustión=Vgasolina*gasolina*Pci

$$\text{energía disponible combustión} = 5.5\,\text{l} * 0.78\frac{Kg}{l} * 42000\frac{Kj}{Kg} = 180.2\ \text{MJ}$$

Y para el caso de la motocicleta eléctrica es:

energía disponible eléctrica = #baterías * Vnominal * Amperios-hora

$$\text{energía disponible eléctrica} = 4 * 12\,\text{V} * 75\,\text{Ah} * \frac{3600\,\text{s}}{1\,h} * \frac{J}{S*V*A} * \frac{kJ}{1000\,\text{J}}$$

Potencial energético eléctrico=12.96 MJ

Puede verse entonces como la motocicleta en modo combustión tiene casi 14 veces más energía disponible que la motocicleta en modo eléctrico, lo cual significa que la autonomía será mucho mayor en modo combustión, debido a que en un kg de gasolina se puede almacenar mucha más energía que en una batería de 12 voltios con capacidad de entregar 75 amperios en una hora.

Para recorrer el ciclo de conducción del AMVA, la motocicleta de combustión consumió cerca del 11% (cerca de 20 MJ), mientras que la moto eléctrica consumió casi el 75% inicial (unos 9.7 MJ). Es decir, la motocicleta eléctrica gasta menos energía, pero esa menos energía significa la mayor parte de la que tiene disponible, lo cual simplemente significa que la moto eléctrica solo podría recorrer un solo ciclo de conducción, antes de tener que recargar las baterías

B. *Consumo energética*

El consumo energético de la motocicleta eléctrica fue estimado con base en la capacidad nominal de almacenamiento de energía de las baterías (3.6 kWh) y la distancia del ciclo de conducción (14 km)

$$\text{Consumo moto elec} = \frac{2.7\ \text{kWh}}{14\ \text{km}} = 0.19\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Para la operación en modo combustión, se parte del consumo de energía para recorrer el ciclo (5.6 kWh) y la distancia del ciclo de conducción (14 km)

Consumo moto comb=5.6 kWh14 km=0.4kWhkm

Este resultado indica que hay una reducción de casi el 50% en la energía requerida para realizar el mismo ciclo frente a la motocicleta de combustión. Sin embargo, debe aclararse que con las diferencias de autonomías entre ambas motocicletas, la motocicleta de combustión podrá recorrer mucha más distancia que la eléctrica.

C. *Emisiones de CO2*

Con datos de las baterías LiFePo, como 3000 ciclos de carga, capacidad teórica de almacenamiento de energía de 3.6 kWh, impacto como huella de carbono de 70 kgCO2/kWh [11] y una autonomía de la motocicleta eléctrica de 56 km, se obtiene:

$$\text{vida útil batería elec} = 3000\ \text{ciclos} * 56\frac{\text{km}}{ciclo} = 168\,000\ \text{km}$$

El impacto ambiental por producción de las baterías se estimó así: Impacto por producción = Capacidad de almacenamiento * huella de carbono

$$\text{Impacto por producción} = 3.6\ \text{kWh} * 70\frac{\text{kgCO2}}{kWh} = 252\ \text{kg CO2}$$

Y el impacto ambiental por cada km recorrido, se estimó así:

$$\text{Impacto por km} = \frac{\text{impacto por producción}}{Vida\ util} = \frac{252\ \text{kg CO2}}{168.000Km} = 1.5\frac{\text{g CO2}}{Km}$$

Y el impacto por uso del vehículo se estimó así:

$$\text{Impacto por uso} = \frac{\text{consumo energético} * \text{factor emisión de electricida}}{1000}$$

$$\text{Impacto por uso} = \frac{0.048\frac{Kwh}{Km} * 120\frac{gCO2}{Kwh}}{1000} = 5.8\frac{g\ \text{CO2}}{Km}$$

Finalmente, el impacto ambiental total es:

Impacto total = (1.5+5.8) $\frac{g\ CO2}{Km}$ = 7.3 $\frac{g\ CO2}{Km}$

A partir de estos resultados, la motocicleta de combustión presentó emisiones de 183 g CO_2/km, mientras que la motocicleta eléctrica registró aproximadamente 6 – 8 g CO_2/km, incluyendo tanto la fase de uso como el impacto de la batería. Esto representa una reducción superior al 90% en emisiones de gases de efecto invernadero.

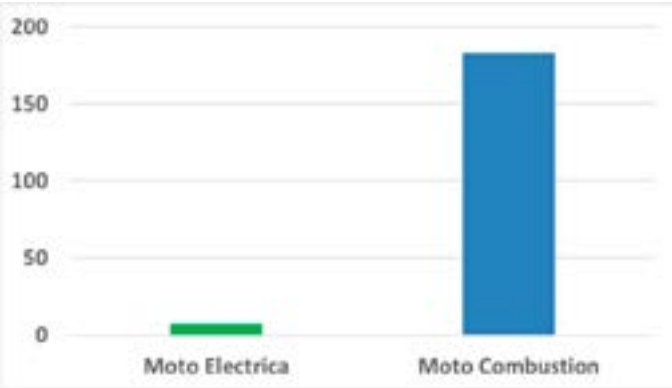


Ilustración 1 Resultados

D. Contaminantes locales

En términos de contaminantes criterio, la motocicleta eléctrica elimina completamente las emisiones locales de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC), en contraste con los valores registrados para la motocicleta con motor de combustión (11.9 g/km y 8.4 g/km respectivamente).

E. Impacto de la batería

Considerando una vida útil de 3000 ciclos y una autonomía de 56 km/ciclo, la vida útil estimada de la batería supera los 160 000 km. Esto permite reducir significativamente su impacto por kilómetro, el cual resulta marginal frente a las emisiones evitadas en la fase de uso.

F. Kilometraje de amortización ambiental

Este parámetro se estimó, con base en el impacto ambiental por producción y la emisión en modo combustión, así:

Brake even = $\frac{252000\ g\ CO2}{183\frac{gCO2}{Km}-5.8\frac{gCO2}{Km}}$ = 1400 km

Los resultados indican que el punto de equilibrio ambiental se alcanza en un kilometraje bajo, debido a la gran diferencia en emisiones entre ambas tecnologías y a la alta durabilidad de las baterías $LiFePO_4$.

VI. Discusión

Los resultados indican que la ventaja ambiental de las motocicletas eléctricas en el contexto del AMVA está fuertemente influenciada por tres factores clave: la alta eficiencia energética del sistema eléctrico, el bajo factor de emisión de la red eléctrica colombiana y la elevada vida útil de las baterías $LiFePO_4$. A diferencia de estudios que destacan la manufactura de baterías como el principal impacto, los resultados obtenidos en este trabajo muestran que, bajo condiciones reales de operación y altas vidas útiles, dicho impacto puede ser diluido significativamente.

Adicionalmente, la eliminación de contaminantes locales como CO y HC resalta el potencial de la motocicleta eléctrica como estrategia de mejora de la calidad del aire urbano, especialmente en ciudades con alta densidad de motocicletas como Medellín. Sin embargo, a pesar de contar con algunos beneficios legales, factores como la autonomía y el tiempo de carga, se convierten en los principales motivos para que los usuarios de motocicletas convencionales, se cambien a movilidad eléctrica

Finalmente, se resalta que el enfoque experimental adoptado en este estudio permite reducir la incertidumbre asociada a modelos basados exclusivamente en literatura, aportando resultados más representativos del contexto local.

VII. Conclusiones

Los parámetros de desempeño de las motocicletas eléctricas, como torque, potencia, consumo energético, las hacen ideales para recorridos urbanos en las condiciones actuales de tráfico que se viven en Medellín y en ciudades con altos índices de intensidad vehicular.

A partir de los resultados obtenidos, se observa una reducción superior al 90% en emisiones de CO_2 por km recorrido. Así mismo, las emisiones locales de CO y HC son eliminadas completamente en la fase de uso de las baterías eléctricas, lo cual mitigaría en parte el complejo problema de contaminación ambiental que ya se vive en la región.

La alta vida útil de las baterías $LiFePO_4$ (>3000 ciclos) reduce su impacto por km a valores marginales.

La electrificación del parque motociclista representa una estrategia altamente efectiva para la reducción de emisiones en el AMVA.

VIII. Referencias

[1] Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). (2022). Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá – fuentes móviles, año 2022. AMVA.

[2] Inventario de emisiones atmosféricas que contiene las fuentes de área, las fuentes fijas y las fuentes móviles para la cuenca atmosférica del Valle de Aburrá. Convenio Especial de Cooperación Ciencia y Tecnología N° 272 DE 2024. Disponible en https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Inventario-de-emisiones/Informe-Integrado-Urbano-Rural-2022.pdf

[3] Salcedo Jiménez, C., Delgado Mejía, Á., & Álvarez Arboleda, B. (2021). Determinación del desempeño energético y ambiental de una motocicleta dos tiempos convertida a eléctrica. Memorias EIEI ACOFI 2021.

[4] Delgado Mejía, Á., Álvarez Arboleda, B., & Hincapié Montoya, J. F. (2024). Conversión de motos convencionales a

eléctricas como estrategia para la transición energética. En Innovación en la transición energética: conversión, simulación y diagnóstico. Fondo Editorial Pascual Bravo.

[5] Delgado Mejía, Á., Álvarez Arboleda, B., Vanegas Metaute, D., Delgado Mejía, A., Gómez Rueda, J., & Estrada, R. S. (2025). Optimización del uso de la energía en el transporte y su impacto en la calidad del aire: estimación de emisiones en el parque automotor de Medellín. Memorias EIEI ACOFI 2025.

[6] Departamento Nacional de Planeación (DNP). Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026. Disponible en https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/plan-nacional-de-desarrollo-2022-2026-colombia-potencia-mundial-de-la-vida.pdf

[7] Peters, J. F., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J., & Weil, M. (2017). The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67, 491–506.

[8] Richa, K., Babbitt, C. W., Gaustad, G., & Wang, X. (2014). A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles. Resources, Conservation and Recycling, 83, 63–76.

[9] International Organization for Standardization. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO Standard No. 14040:2006)

[10] International Organization for Standardization. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ISO Standard No. 14044:2006

[11] Zhang, H.; Wei, Z.; Zhen, H. Carbon Footprint Comparison and Environmental Impact Analysis of Ternary Lithium-Ion and Lithium Iron Phosphate Power Batteries. Energies 2025, 18, 4914. https://doi.org/10.3390/en18184914

[12] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2023). Factor de emisión de CO_2 de la red eléctrica colombiana. UPME.

Análisis Bibliométrico Enfocado en Pensamiento Computacional

María Paula Quintín Blandón
Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
mariap.quintinb@uqvirtual.edu.co

Julián David Cruz Cancimance
Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
juliand.cruzc@uqvirtual.edu.co

Yhonatan Steven Gómez Valencia
Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
yhonatans.gomezv@uqvirtual.edu.co

***Abstract*—El propósito de este estudio bibliométrico es analizar la evolución de la producción académica relacionada con el pensamiento computacional (PC), considerando su relación con otras formas de pensamiento creativo, algorítmico, lógico-matemático y científico, así como sus vínculos con diversas disciplinas y áreas del conocimiento. Para ello, se aplican técnicas matemáticas y estadísticas que permiten describir, inferir y representar la información recopilada de revistas, artículos y publicaciones científicas, sobre un corpus de 2.117 registros extraídos automáticamente de IEEE Xplore y ScienceDirect (2020 – mayo de 2026) mediante un sistema desarrollado con Playwright.**

Este trabajo emplea metodologías como el análisis de desempeño y el mapeo científico para construir indicadores de productividad y colaboración en el área del pensamiento computacional. Los resultados muestran un notable incremento en la cantidad de publicaciones durante los años 2023, 2024 y 2025, destacando autores como Weipeng Yang, Siu-Cheung Kong y Zhang Shuhan. El análisis de palabras clave, representado mediante nubes de palabras, gráficas de frecuencia y de co-ocurrencia, así como el análisis de similitud de abstracts representado por dendrogramas, revela dos vertientes principales: una de carácter técnico relacionada con informática, computación, programación y desarrollo de software, y otra vinculada al ámbito educativo, que aborda aspectos como evaluación, creatividad, niveles de educación, pensamiento crítico y la integración del PC en diversas disciplinas.

Lo obtenido evidencia que el pensamiento computacional es un tema de creciente interés que se interrelaciona con diferentes formas de pensamiento y con diversas competencias disciplinares, confirmando su relevancia tanto en la educación formal como en la investigación académica. Este estudio aporta evidencia sólida sobre la evolución de la temática y su relevancia en el contexto educativo y científico, consolidando al PC como eje articulador de otras formas de pensamiento y disciplinas, y como elemento clave para el desarrollo social y tecnológico actual.

***Index Terms*—Pensamiento Computacional, Análisis Bibliométrico, Producción Académica, Indicadores, Visualización de Datos, Tendencias de Investigación, Análisis de Desempeño, Mapeo Científico.**

I. Introducción

La bibliometría, entendida como la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos para analizar la producción científica [1], [2], se ha consolidado como herramienta clave para explorar las dinámicas de generación y difusión del conocimiento en distintas disciplinas. En el caso del pensamiento computacional (PC), este enfoque resulta especialmente pertinente dado el notable crecimiento que ha experimentado este campo en los últimos años. Según Aria y Cuccurullo [3], el análisis bibliométrico permite identificar patrones de publicación, redes de colaboración y temáticas emergentes, aportando una visión holística de la evolución investigativa.

El PC, definido por Wing [4] como la capacidad de formular problemas y sus soluciones de manera que puedan ser ejecutados por un agente de procesamiento de información, ha captado la atención de investigadores, educadores y responsables de políticas educativas a nivel global [5]. Su carácter interdisciplinar y su potencial para articular diversas formas de pensamiento —creativo, algorítmico, lógico-matemático y científico— lo convierten en un objeto de estudio relevante para comprender las transformaciones educativas y tecnológicas de la sociedad contemporánea.

El uso de indicadores bibliométricos y herramientas de análisis de redes posibilita examinar la evolución de la literatura sobre PC, destacando autores, revistas y líneas de investigación con mayor producción científica [6]. Este tipo de análisis no solo facilita el reconocimiento de tendencias y vacíos en la literatura, sino que también ofrece información valiosa para la toma de decisiones estratégicas en la producción y difusión del conocimiento [7], [8].

Este trabajo plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿Cuál es la estructura temática y la evolución de la producción académica sobre pensamiento computacional en el período 2020 – mayo de 2026, y qué patrones emergen del análisis automatizado de su literatura científica?*

Para responderla, se desarrolló un sistema automatizado de extracción bibliográfica con Playwright que accedió a IEEE Xplore y ScienceDirect, complementado con análisis de palabras clave por categorías, redes de co-ocurrencia y clustering jerárquico con representaciones TF-IDF y BERT. Esta combinación de métodos bibliométricos tradicionales con técnicas de procesamiento de lenguaje natural constituye el principal aporte metodológico del estudio.

II. Trabajos Relacionados

Diversos estudios han abordado el PC mediante análisis bibliométricos, aunque con alcances y métodos distintos. Lye y Koh [9] realizaron una revisión sistemática sobre la enseñanza del PC en educación primaria y secundaria, identificando

una predominancia de enfoques basados en programación. Su trabajo, sin embargo, se limita a un período anterior a 2014 y no emplea técnicas cuantitativas de mapeo científico.

Desde la perspectiva bibliométrica, Moreno-León et al. [10] analizaron la producción científica sobre Scratch como herramienta para el desarrollo del PC, concluyendo que la investigación se concentra en los niveles de educación básica. Este estudio utiliza indicadores de frecuencia, pero no incorpora análisis de similitud textual ni representaciones semánticas.

García-Peñalvo et al. [11] ofrecen una panorámica de los recursos disponibles para introducir la programación en la escuela, destacando la diversidad de herramientas y metodologías. Su análisis es de tipo narrativo y no emplea corpus automatizados. Cobo et al. [8] proponen un marco comparativo para herramientas de mapeo científico, incluyendo análisis de redes de co-ocurrencia, que sirve como referente metodológico al presente trabajo.

A diferencia de estos antecedentes, el presente estudio integra la extracción automatizada de datos mediante Playwright con análisis semántico profundo basado en BERT, cubriendo el período 2020 – mayo de 2026 —los años más recientes de producción científica, incluyendo el año en curso—, lo que permite capturar las tendencias actuales y la expansión curricular del PC a nivel global.

III. Materiales y Métodos

A. Recolección Automatizada de Datos

La recolección del corpus bibliográfico se realizó mediante un sistema de automatización desarrollado en Python con Playwright, que accedió de forma autónoma a las bases de datos IEEE Xplore y ScienceDirect a través del acceso institucional del CRAI de la Universidad del Quindío. Se eligió el período comprendido entre 2020 y mayo de 2026 por corresponder a los años más recientes de producción científica, incluyendo el año en curso hasta la fecha de corte de la extracción (mayo de 2026), lo que permite capturar las tendencias actuales del campo. El sistema gestionó la autenticación, la ejecución de búsquedas con la cadena "Computational Thinking", la paginación automática de resultados y la descarga de referencias en formato BibTeX con reintentos ante fallos. Los registros obtenidos fueron posteriormente unificados y depurados eliminando entradas duplicadas mediante una clave compuesta por título, DOI, autor y año de publicación. El corpus resultante comprende 2.117 registros, como se presenta en la Tabla I.

TABLE I: Resultados Obtenidos por Base de Datos

Idioma	Base de Datos	Registros
Español e Inglés	IEEE Xplore	1.099
	ScienceDirect	1.199
Total (tras depuración)		**2.117**

Cabe señalar que la restricción a dos bases de datos representa un sesgo de selección que debe considerarse al generalizar los resultados; fuentes como Scopus, Web of Science y SAGE Journals quedan fuera del alcance de este estudio.

B. Análisis de Frecuencias

Sobre el corpus depurado se realizó un análisis estadístico de frecuencia para las variables autor, año de publicación, tipo de documento, revista y editorial, representados mediante gráficas de barras horizontales con paleta de colores académica.

C. Análisis de Palabras Clave por Categorías

Los abstracts del corpus fueron tokenizados aplicando conversión a minúsculas y reemplazo de frases compuestas por tokens unificados. Se definieron diez categorías temáticas basadas en la literatura sobre PC [5], [6], y se contabilizó la frecuencia de aparición de cada término en el corpus. Los resultados se representaron mediante nubes de palabras con máscara de silueta de cabeza humana, fuente Georgia y paleta azul académica. Las categorías utilizadas se presentan en la Tabla II.

TABLE II: Categorías y Variables Identificadas

Categoría	Variables (Muestra)
Habilidades	Abstraction, Algorithm, Coding, Creativity, Critical thinking, Decomposition, Problem solving, Programming
Conceptos Computacionales	Conditionals, Loops, Parallelism, Sequences, Software/hardware, Variables
Actitudes	Engagement, Motivation, Perceptions, Persistence, Self-efficacy
Propiedades Psicométricas	CTT, CFA, EFA, IRT, Reliability, SEM, Validity
Herramientas de Evaluación	BCTt, CTS, CTt, CTST, ESCAS, STEM attitude scale
Diseño de Investigación	Experimental, Mixed methods, Post-test, Pre-test, Quasi-experiments
Nivel de Escolaridad	University, High school, Primary school, Kindergarten, Preschool
Medio	Block programming, Programming, Robotics, STEM, Unplugged activities
Estrategia	Game-based learning, Gamification, Project-based learning, Flipped classroom
Herramienta	Scratch, Arduino, Minecraft, Kodable, Bee Bot, Codecombat

D. Redes de Co-ocurrencia

Se construyeron redes de co-ocurrencia de palabras clave calculando la frecuencia con que dos términos aparecen conjuntamente en el mismo abstract, acumulando un peso proporcional al número de abstracts compartidos. Se generó una red general con un umbral mínimo de 10 co-ocurrencias, conservando el componente conectado principal. La detección de comunidades se realizó mediante el algoritmo de Louvain [12] y la disposición de nodos mediante el *layout* Kamada-Kawai.

E. Similitud Textual y Clustering Jerárquico

Se implementó un análisis de clustering jerárquico sobre los 2.117 abstracts utilizando dos representaciones vectoriales: (i) TF-IDF con 5.000 características, que captura la frecuencia relativa de términos, y (ii) embeddings semánticos BERT de dimensión 384, que captura relaciones semánticas profundas entre textos. Sobre cada representación se evaluaron dos

métodos de enlace (*linkage*): Average con distancia coseno y Ward con distancia euclidiana. El número óptimo de clusters se determinó maximizando el coeficiente de silueta (*silhouette score*) en el rango de 2 a 12 grupos, complementado con el índice Calinski-Harabasz. Los resultados se visualizaron mediante dendrogramas con línea de corte indicando el número óptimo de agrupaciones.

IV. Resultados

A. Análisis de Frecuencias

El análisis por autor (Fig. 1) muestra un interés académico creciente en el PC. Los autores más destacados son Weipeng Yang (14 publicaciones), Siu-Cheung Kong (12) y Zhang Shuhan, Larisa Ismailova y Sergey Kosikov (11 cada uno).

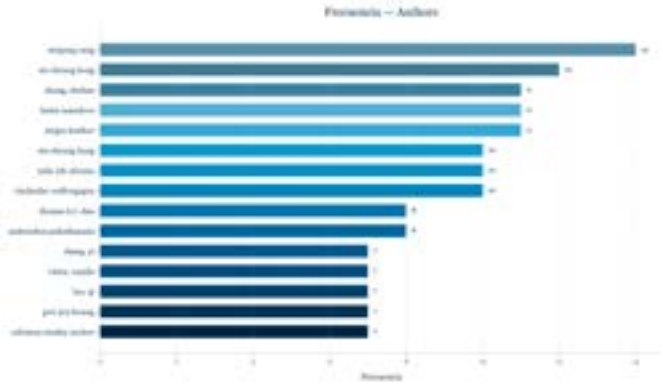


Fig. 1: Frecuencia de aparición por autores (Top 15).

La distribución temporal (Fig. 2) revela un crecimiento sostenido: 2025 concentra el mayor número de publicaciones (514), seguido de 2024 (370) y 2023 (324). El incremento es especialmente abrupto a partir de 2022, coincidiendo con la incorporación del PC en políticas curriculares nacionales de varios países.

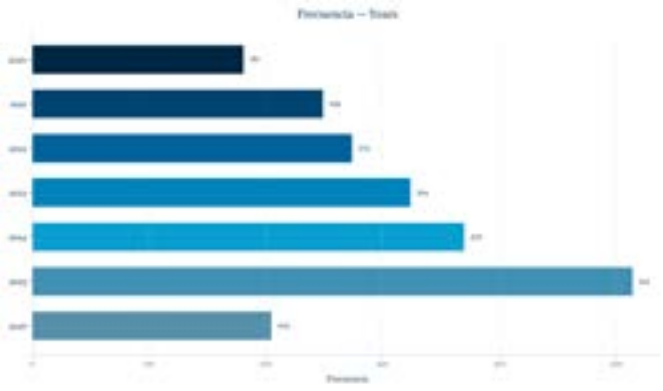


Fig. 2: Distribución de publicaciones por año (2020 – mayo de 2026).

Por tipo de documento (Fig. 3), los artículos científicos constituyen la mayoría del corpus (1.329 registros), seguidos de ponencias en congresos (685) y capítulos de libros (96).

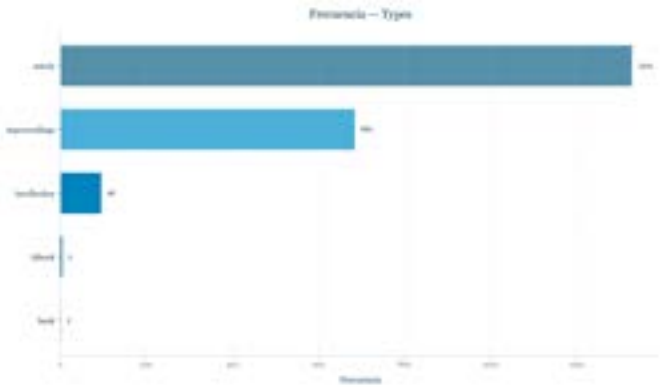


Fig. 3: Tipos de documentos en el corpus.

En cuanto a revistas (Fig. 4), *Computers & Education* lidera con 119 publicaciones, seguida de *Thinking Skills and Creativity* (109) e *International Journal of Child-Computer Interaction* (100). Respecto a editoriales (Fig. 5), Elsevier domina con 49 registros, seguida de Academic Press (30) y Morgan Kaufmann (10).

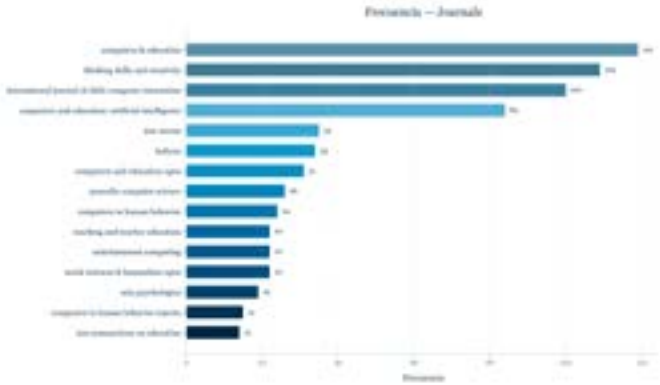


Fig. 4: Revistas con mayor número de publicaciones (Top 15).

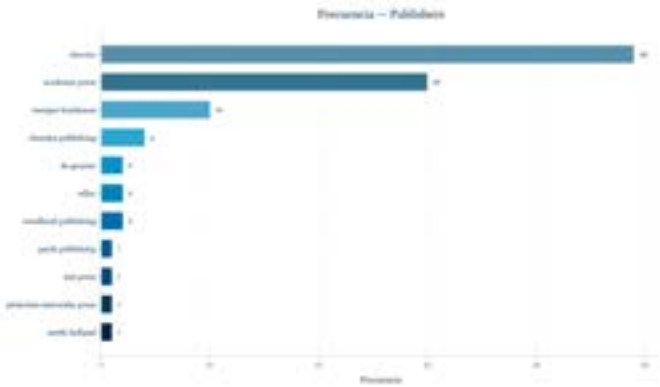


Fig. 5: Editoriales con mayor presencia en el corpus.

B. Análisis de Palabras Clave

La nube de palabras general (Fig. 6) confirma la dualidad técnico-educativa del campo: “programming” es el término

más frecuente, seguido de conceptos educativos (“evaluation”, “university”, “higher education”) y técnicos (“software”, “coding”, “robotics”).



Fig. 6: Nube de palabras general (Top 50 términos).

Las Figs. 7 y 8 presentan las nubes de palabras por categoría. En Habilidades predominan “programming”, “problem solving” y “creativity”. En Conceptos Computacionales destacan “software” y “variables”. Actitudes muestra “motivation”, “engagement” y “self-efficacy”, lo que evidencia la importancia de los factores afectivos en el aprendizaje del PC [5]. En Propiedades Psicométricas sobresalen “validity” y “reliability”, mientras que Herramientas de Evaluación refleja diversidad de instrumentos estandarizados y Diseño de Investigación está dominado por “experimental”.

Las categorías restantes se presentan en la Fig. 9. Nivel de Escolaridad muestra cobertura en todos los niveles educativos, con predominancia universitaria. En Medio destacan “programming” y “robotics”. Estrategia está dominada por “game-based learning” y Herramienta por “scratch”, “arduino” y “minecraft”.

C. Redes de Co-ocurrencia

La red de co-ocurrencia general (Fig. 10) fue construida con un umbral mínimo de 10 co-ocurrencias. El algoritmo de Louvain detectó cuatro comunidades temáticas:

- **C1 – Evaluación psicométrica:** agrupa herramientas de medición del PC (CTS, CTt, ESCAS) junto con propiedades como validez y confiabilidad, reflejando la madurez metodológica del campo.
- **C2 – Propiedades de validación:** concentra términos como *reliability*, *validity* e IRT, vinculados al desarrollo y validación de instrumentos.
- **C3 – Habilidades de programación:** incluye *programming*, *coding*, *algorithm* y *decomposition*, conformando el núcleo técnico-computacional del corpus.
- **C4 – Contextos educativos:** integra niveles de escolaridad, estrategias pedagógicas y herramientas como Scratch y Arduino, representando la vertiente educativa del PC.

El tamaño de los nodos refleja su centralidad de intermediación y el grosor de las aristas indica la frecuencia de co-ocurrencia.

D. Similitud Textual y Clustering Jerárquico

La Tabla III presenta las métricas de clustering jerárquico. BERT con método Average obtuvo el mayor coeficiente de silueta (0.3021), indicando la mejor separación entre grupos. BERT con Ward destaca por su índice Calinski-Harabasz (88.61), que mide la compacidad intra-cluster. Los valores reducidos de TF-IDF son esperables en corpus temáticamente homogéneos, donde las diferencias semánticas son sutiles.

TABLE III: Métricas de Clustering Jerárquico

Modelo	Método	N.º C	Silueta	C-H
TF-IDF	Average	2	0.0328	1.07
TF-IDF	Ward	12	0.0058	7.73
BERT	Average	2	0.3021	12.88
BERT	Ward	2	0.0673	88.61

Los dendrogramas de BERT + Ward (Fig. 11) y TF-IDF + Ward (Fig. 12) exhiben estructuras jerárquicas más claras y diferenciadas que sus contrapartes con método Average (Figs. 13 y 14), donde las fusiones ocurren a niveles de distancia más similares, indicando mayor solapamiento temático.

V. Discusión

A. Tendencias de Producción Científica

El incremento de 201 registros en 2020 a 514 en 2025 no es un fenómeno aislado: refleja la consolidación del PC como competencia transversal reconocida en agendas educativas y tecnológicas a nivel global [4], [5]. El punto de inflexión identificado en 2022 —cuando la producción anual supera por primera vez los 300 registros— coincide con la incorporación explícita del PC en marcos curriculares nacionales de varios países, lo que sugiere una relación bidireccional entre política educativa y producción académica: las políticas impulsan la investigación, y esta a su vez retroalimenta el diseño curricular.

La concentración de primeras firmas en un grupo reducido de autores —Weipeng Yang (14), Siu-Cheung Kong (12)— es característica de campos en expansión donde comunidades de investigación especializadas lideran la agenda [6]. Sin embargo, la dispersión de autores con 7 o menos publicaciones sugiere también una base amplia de investigadores emergentes, lo que apunta a un campo en proceso de consolidación y no aún dominado por unos pocos grupos hegemónicos.

B. Dualidad Técnica y Educativa

La concentración de publicaciones en *Computers & Education* (119) y *Thinking Skills and Creativity* (109), junto con la presencia de *IEEE Access* y *Procedia Computer Science*, confirma la naturaleza híbrida del PC como objeto de estudio: es simultáneamente un concepto computacional y una competencia pedagógica [4]. Esta dualidad no es contradictoria sino constitutiva del campo, tal como argumentan Grover y Pea [5], quienes señalan que el PC solo adquiere pleno sentido cuando se articula con contextos de aprendizaje concretos.

El análisis de palabras clave refuerza esta interpretación. El dominio de “programming” en el corpus técnico contrasta



(a) Habilidades. (b) Conceptos Computacionales. (c) Actitudes.

Fig. 7: Nubes de palabras por categoría (grupo 1).



(a) Propiedades Psicométricas. (b) Herramientas de Evaluación. (c) Diseño de Investigación.

Fig. 8: Nubes de palabras por categoría (grupo 2).



(a) Nivel de Escolaridad. (b) Medio. (c) Estrategia. (d) Herramienta.

Fig. 9: Nubes de palabras por categoría (grupo 3).

con la prominencia de “motivation”, “engagement” y “self-efficacy” en la categoría de Actitudes, lo que indica que la investigación no se limita a qué enseñar, sino que se preocupa por cómo los estudiantes se relacionan afectivamente con el aprendizaje computacional. Este desplazamiento hacia los factores afectivos es coherente con tendencias más amplias en la investigación educativa [5] y abre una línea de trabajo que conecta el PC con la psicología del aprendizaje.

C. Estructura Temática y Redes de Co-ocurrencia

Las cuatro comunidades detectadas mediante el algoritmo de Louvain validan empíricamente la estructura categorial propuesta en este estudio y son coherentes con las dimensiones del PC documentadas en la literatura [6], [8]. La densidad de conexiones en C1 (evaluación psicométrica) y C3 (habilidades de programación) refleja la madurez investigativa de estas dimensiones: son áreas con vocabulario técnico estabilizado y tradición metodológica consolidada. En contraste, las estructuras más dispersas de C2 (propiedades de validación) y C4 (contextos educativos) pueden interpretarse de dos maneras no excluyentes: como áreas con menor volumen acumulado de literatura, o como dominios donde la terminología aún no ha convergido hacia un conjunto estable de términos centrales.

La centralidad de nodos como “programming”, “computational thinking” y “evaluation” en la red general refuerza la idea de que el PC funciona como eje articulador: es el término que conecta comunidades técnicas y educativas que, de otro modo, operarían con vocabularios poco solapados [11].

D. Rendimiento del Clustering Semántico

La superioridad de BERT sobre TF-IDF en coeficiente de silueta (0.3021 vs. 0.0328) tiene una implicación metodológica relevante: en corpus temáticamente homogéneos como el analizado, donde todos los documentos giran en torno al PC, las diferencias entre textos no residen en qué palabras se usan, sino en cómo se relacionan semánticamente [3]. TF-IDF captura frecuencia léxica pero no contexto; BERT, al codificar relaciones entre palabras en función de su posición

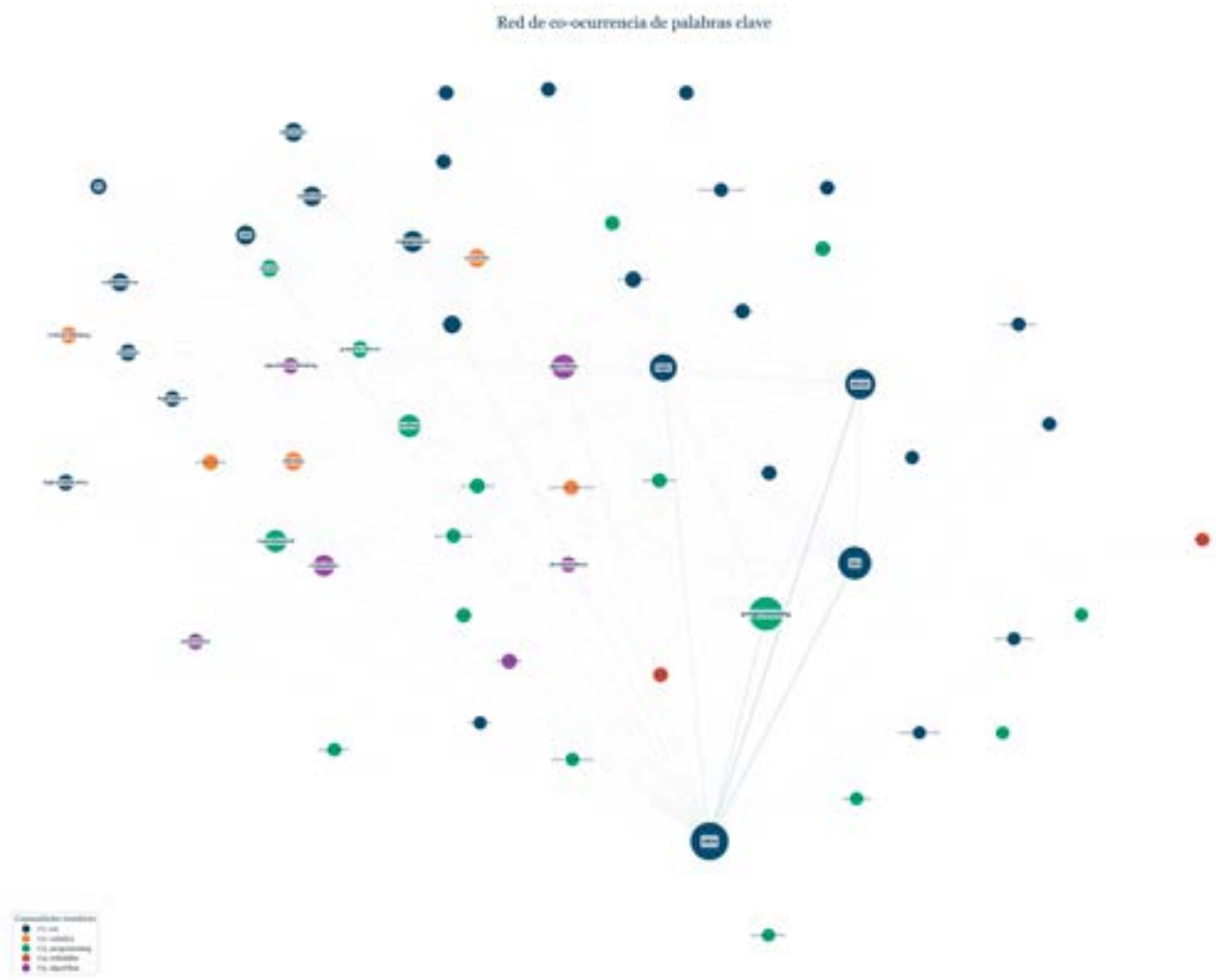


Fig. 10: Red de co-ocurrencia general de palabras clave.

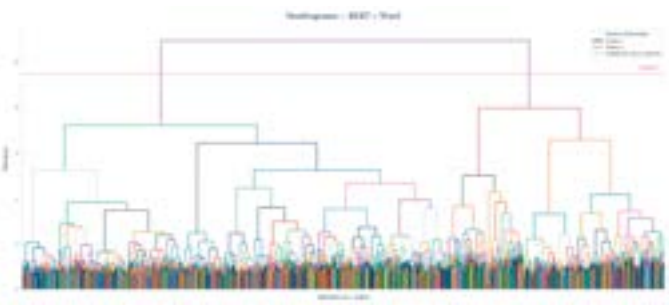


Fig. 11: Dendrograma BERT + Ward (2 *clusters* óptimos).

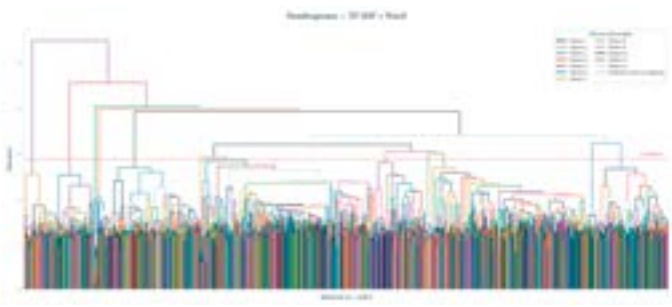


Fig. 12: Dendrograma TF-IDF + Ward (12 *clusters* óptimos).

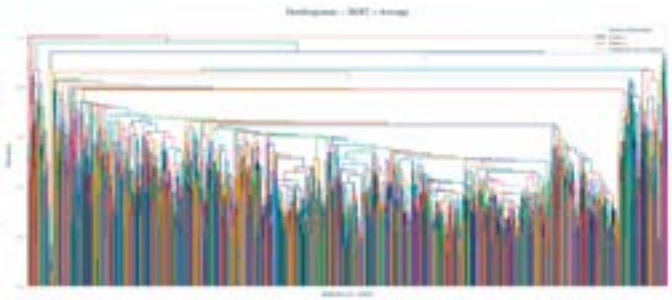


Fig. 13: Dendrograma BERT + Average (2 *clusters*).

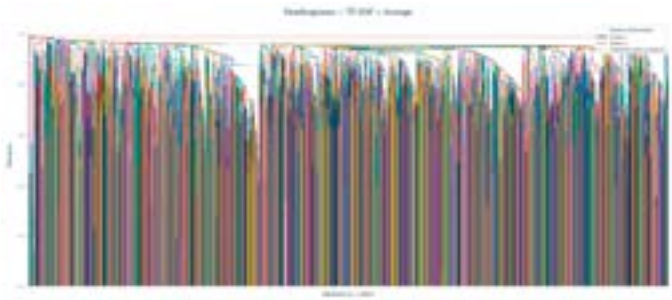


Fig. 14: Dendrograma TF-IDF + Average (2 *clusters*).

y co-ocurrencia dentro de oraciones, logra distinguir matices que el modelo de bolsa de palabras no detecta.

El hecho de que tanto BERT + Average como BERT + Ward converjan en dos clusters óptimos otorga solidez a la segmentación: no es un artefacto del método de enlace, sino una estructura temática subyacente al corpus. Estos dos clusters corresponden precisamente a las vertientes técnica y educativa identificadas de forma independiente mediante nubes de palabras y redes de co-ocurrencia, lo que constituye una validación convergente de los resultados por tres vías metodológicas distintas.

E. Limitaciones

Este estudio presenta cuatro limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. Primera, la restricción a IEEE Xplore y ScienceDirect excluye fuentes relevantes como Scopus, Web of Science y SAGE Journals, lo que introduce un sesgo de selección hacia publicaciones de perfil tecnológico y científico-educativo. Segunda, el análisis cubre el período 2020 – mayo de 2026 y no captura la evolución histórica anterior, lo que impide comparar las tendencias actuales con las de la década previa. Tercera, la búsqueda se realizó con el término exacto "Computational Thinking", por lo que variantes terminológicas en otros idiomas o enfoques disciplinares específicos podrían haber quedado fuera del corpus. Cuarta, el año 2026 constituye un período parcial, pues solo abarca hasta mayo (fecha de corte de la extracción); por ello su conteo no es directamente comparable con el de los años completos y no debe interpretarse como un descenso en la producción del campo.

VI. Conclusiones

Este estudio aporta evidencia empírica y metodológica sobre la evolución del pensamiento computacional como área de investigación. Tres contribuciones principales se derivan del trabajo:

Crecimiento y concentración temática. La producción científica sobre PC ha crecido de forma sostenida, con un punto de inflexión en 2022, y se concentra en revistas de tecnología educativa. Este patrón indica que el campo, aunque interdisciplinar, mantiene su centro de gravedad en las ciencias de la educación.

Estructura dual consistente. El análisis convergente de nubes de palabras, redes de co-ocurrencia y clustering identifica dos vertientes estables: una técnica (programación, software, robótica) y una educativa (evaluación, creatividad, pensamiento crítico). Esta dualidad debe ser tenida en cuenta por investigadores al diseñar marcos teóricos y por educadores al seleccionar enfoques pedagógicos.

Aporte metodológico. La combinación de extracción automatizada con Playwright y análisis semántico con BERT demuestra ser eficiente y replicable para el mapeo científico a gran escala. El método BERT + Average ofreció la mejor segmentación temática (silueta $= 0.3021$), superando a TF-IDF en la captura de relaciones semánticas profundas.

Como trabajo futuro se propone: (1) ampliar el corpus a Scopus, Web of Science y SAGE Journals; (2) incorporar análisis de redes de colaboración entre autores e instituciones; (3) explorar BERTopic para modelado de tópicos emergentes; y (4) extender el análisis al período previo a 2020 para capturar la evolución histórica completa del campo.

References

[1] A. Pritchard, "Statistical bibliography or bibliometrics," *Journal of Documentation*, vol. 25, no. 4, pp. 348–349, 1969.
[2] R. N. Broadus, "Toward a definition of bibliometrics," *Scientometrics*, vol. 12, no. 5–6, pp. 373–379, 1987.
[3] M. Aria and C. Cuccurullo, "bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis," *Journal of Informetrics*, vol. 11, no. 4, pp. 959–975, 2017.
[4] J. M. Wing, "Computational thinking," *Communications of the ACM*, vol. 49, no. 3, pp. 33–35, 2006.
[5] S. Grover and R. Pea, "Computational thinking in K–12: A review of the state of the field," *Educational Researcher*, vol. 42, no. 1, pp. 38–43, 2013.
[6] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, and W. M. Lim, "How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines," *Journal of Business Research*, vol. 133, pp. 285–296, 2021.
[7] I. Zupic and T. Čater, "Bibliometric methods in management and organization," *Organizational Research Methods*, vol. 18, no. 3, pp. 429–472, 2015.
[8] M. J. Cobo, A. G. López-Herrera, E. Herrera-Viedma, and F. Herrera, "Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools," *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol. 62, no. 7, pp. 1382–1402, 2011.
[9] S. Y. Lye and J. H. L. Koh, "Review on teaching and learning of computational thinking through programming: What is next for K-12?" *Computers in Human Behavior*, vol. 41, pp. 51–61, 2014.
[10] J. Moreno-León, G. Robles, and M. Román-González, "Towards data-driven learning paths to develop computational thinking with Scratch," *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 5, no. 3, pp. 68–79, 2016.

[11] F. J. García-Peñalvo, M. Á. Conde, and A. Gonçalves, "A survey of resources for introducing coding at school," in *Proc. 4th Int. Conf. Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality*, 2016, pp. 19–26.
[12] V. D. Blondel, J.-L. Guillaume, R. Lambiotte, and E. Lefebvre, "Fast unfolding of communities in large networks," *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, vol. 2008, no. 10, p. P10008, 2008.

Modelación hidrológica e hidráulica orientada al trazado de zonas de inundación en el sector ribereño del municipio de Flandes, Tolima mediante el uso de herramientas SIG

Angie Brigithe Montaña Muñoz
Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería civil
Universidad Piloto de Colombia
Seccional del Alto Magdalena
Girardot, Colombia
angie-montana@upc.edu.co

Jesus Flaminio Ospitia Prada
Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería civil
Universidad Piloto de Colombia
Seccional del Alto Magdalena
Girardot, Colombia
jesus-ospitia@unipiloto.edu.co,ORCID

Resumen—Como resultado de su posición geográfica, el municipio de Flandes se sitúa en el área de influencia del río Magdalena, situación que a lo largo del tiempo ha favorecido el crecimiento económico y social del municipio, sin embargo, estas mismas características territoriales son las que incrementan el nivel de vulnerabilidad ya que la dinámica hidrológica del río asociada a eventos de precipitación intensa genera desbordamientos e impactos significativos sobre la población y la infraestructura. Añadiendo, se tiene que el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio no cuenta con información de referencia que limite las zonas de inundación ni reconozca las cotas máximas asociadas a eventos históricos de crecientes relevantes del río Magdalena. Por ende, se restringe la toma de decisiones estratégicas relacionadas con la gestión del riesgo, la planificación territorial y la formulación de medidas de mitigación orientadas a salvaguardar la vida de la población junto a la minimización de afectaciones en sus bienes.

El presente trabajo constituye al avance en investigación del desarrollo de la modelación hidrológica e hidráulica, la cual mediante el uso de tecnologías de georeferenciación permitirá delimitar zonas de afectación por inundación, específicamente aquellas localizadas en las riberas del río Magdalena, afluente que baña al municipio de Flandes, Tolima. Asimismo, se resalta que el proyecto se alineará con dos objetivos de desarrollo sostenible, considerando a manera directa el (ODS) 11 “CIUDADES Y COMUNIDADES SOTENIBLES”, meta 11.5, la cual busca reducir la cantidad de personas afectadas por desastres, incluidos aquellos asociados al cambio climático; e indirecta al vincular el ODS 13 “ACCIÓN POR EL CLIMA”, meta 13.1, dirigida en fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación frente a los riesgos climáticos y los desastres naturales.

Es importante mencionar que se empleará una metodología guiada por una ruta cuantitativa con carácter descriptivo y explicativo, estructurado por fases las cuales permitirán el cumplimiento de las metas propuestas al integrar la precisión de bases teóricas, recopilación de información, procesamiento de datos, reconocimiento del área de estudio, modelación hidrológica e hidrológica, resultados y análisis. Este proceso facilitará el conocimiento del comportamiento hidrológico e hidráulico del sector ribereño del municipio de Flandes, específicamente los barrios San Luis, Las Rosas, Centro, Gaitán y La Capilla. Añadiendo que la población de estudio considera un total de 370 personas y 140 viviendas, con un aproximado de 124 hogares, quienes tienen acercamiento directo con el afluente hídrico: Río Magdalena.

Palabras clave: Modelamiento hidrológico e hidráulico, Inundación, Precipitación.

Abstract— The municipality of Flandes is located within the Magdalena River’s watershed, a factor that has historically fostered the municipality’s economic and social growth. However, these characteristics also increase vulnerability, as the river’s hydrological dynamics particularly during periods of heavy rainfall lead to flooding and have significant impacts on the population and infrastructure. In addition, the municipality’s Land Use Plan (EOT) lacks up-to-date information that delineates flood zones or identifies the maximum water levels associated with historically significant flood events on the Magdalena River. Consequently, this restricts decision-making related to risk management, land-use planning, and the formulation of mitigation measures aimed at safeguarding the lives of the population and reducing damage to their property.

This study represents a step forward in research on the development of hydrological and hydraulic modeling, which, through the use of georeferencing technologies, will make it possible to identify flood-prone areas, specifically those located along the banks of the Magdalena River. Additionally, the project will align with two Sustainable Development Goals (SDGs), directly addressing SDG 11 “SUSTAINABLE CITIES AND COMMUNITIES,” Target 11.5, which seeks to reduce the number of people affected by disasters, including those associated with climate change; and indirectly by linking to SDG 13 “CLIMATE ACTION,” Target 13.1, aimed at strengthening resilience and adaptive capacity in the face of climate-related risks and natural disasters.

The methodology will follow a quantitative approach with descriptive and explanatory elements, structured in phases designed to achieve the proposed objectives by integrating a solid theoretical foundation, information collection, processing, site surveys, hydrological and

hydraulic modeling, results, and analysis. This process will facilitate understanding of the hydrological and hydraulic behavior of the riverside sector of the municipality of Flandes, specifically the area comprising the neighborhoods of San Luis, Las Rosas, Centro, Gaitán, and La Capilla. It should be noted that the study population comprises a total of 370 people and 140 dwellings, with approximately 124 households, all of whom have direct access to the watercourse: The Magdalena River.

Key words: Hydrological and hydraulic modeling, Inundation, Precipitation.

I. Introducción

En el municipio de Flandes, la proximidad con el Río Magdalena ha condicionado históricamente el desarrollo urbano y social del territorio, sin embargo, las dinámicas de crecimiento urbano sobre áreas cercanas al río han incrementado la exposición de la población frente a eventos de inundación, particularmente en contextos donde las condiciones topográficas, la variabilidad climática modifican el comportamiento natural del cauce.

Añadiendo a lo anterior, el municipio de Flandes no cuenta con estudios técnicos que consoliden información respecto a la caractericen el comportamiento hidráulico e hidrológico del Río Magdalena, limitación de zonas de inundación con cotas máximas. En respuesta a ello, la investigación plantea el desarrollo de una base técnica sustentada en antecedentes de crecientes súbitas, información hidrológica, registros de precipitación y herramientas de análisis espacial, con el propósito de identificar patrones de inundación y diseñar el mapa de huella de inundación que fortalezca la planificación municipal frente a eventos hidrológicos extremos.

II. Pregunta de investigación

Dado que la variación en la dinámica hidrológica del río se asocia con la ocurrencia de precipitaciones de alta intensidad, las cuales se desencadenan en crecientes súbitas e inundaciones. Provocando drásticos efectos negativos sobre la población, infraestructura y bienes. Se permite plantear la siguiente pregunta: ¿De qué forma el desarrollo de un modelo hidrológico e hidráulico apoyado en herramientas SIG contribuye a delimitar zonas de inundación en el sector ribereño correspondiente a los barrios San Luis, Las Rosas, Centro, Gaitán y La Capilla del municipio de Flandes?

III. Objetivos

A. *Objetivo general*

Estructurar una modelación hidrológica e hidráulica mediante herramientas SIG para el trazado tanto de zonas de inundación como cotas máximas en el sector ribereño de los barrios San Luis, Las Rosas, Centro, Gaitán y La Capilla del municipio de Flandes.

B. *Objetivos específicos*

- Recopilar las variables hidrometeorológicas asociadas al comportamiento histórico de los eventos de inundación en la zona de estudio.
- Determinar las condiciones hidrológicas de la cuenca urbana mediante el análisis de curvas IDF, caudales de retorno y cotas máximas en el sector ribereño.
- Evaluar las zonas con mayor susceptibilidad a inundación en el sector ribereño mediante visitas de campo para la validación adecuada de sus condiciones.
- Modelar la dinámica hidráulica del sector de estudio integrando la información hidrológica e hidráulica en el software HEC-RAS para la generación del mapa de huella de inundación.

IV. Antecedentes

A. *Asentamiento historico sobre las riberas del Magdalena*

El municipio de Flandes es extensamente reconocido por ser la puerta de oro del del departamento del Tolima, sus pobladores se convirtieron en los revolucionarios que desde la época de la conquista hicieron que el municipio resonara por su cruce náutico que comunicaba territorios como Ibagué, Neiva y Bogotá D.C. Este mismo auge de la navegación se encargó en que las primeras viviendas que datan de 1875, fueran construidas sobre las zonas ribereñas ya que para sus habitantes era un punto estratégico que les permitía satisfacer sus necesidades económicas, tomando vínculos con actividades pesqueras, turísticas y de trasporte. Es importante mencionar que estas costumbres aún se mantienen y que la pesca llena de cultura al municipio, ver Fig. 1 y Fig. 2 (Colombia Turismo Web , s.f).



Fig. 1. Pescador tradicional en Flandes, Tolima. Fotografías tomadas de Colección Privada Album de Fotografias del Tolima, Estudio Pizma de Bogota Alvaro Negrillo (2015).



Fig. 2. Pescador tradicional en Flandes, Tolima .Fuente: Los autores (2022).

B. Dinámica de precipitación en Colombia

El fenómeno climático de "La Niña" es el fenómeno climático corresponde a la fase fría del ciclo ENSO (El Niño–Oscilación del Sur) que se caracteriza por el enfriamiento anómalo de la temperatura superficial del océano Pacífico ecuatorial. Esta condición altera los patrones atmosféricos e hidrometeorológicos, produciendo aumentos en los niveles de precipitación y en la humedad antecedente del suelo, principalmente en las regiones Caribe y Andina de Colombia. A partir de allí, se intensifican los procesos de saturación hídrica y escurrimiento superficial, aumentando la probabilidad de ocurrencia de inundaciones, crecientes súbitas, movimientos en masa y demás eventos asociados a amenazas hidrológicas (Sánchez, Vargas, González, & Pabón, 2001).

De la misma manera, los episodios ocurridos entre 1998 y 2000 asociados a este fenómeno demostraron el incremento considerable en la probabilidad de pérdidas humanas y afectación de viviendas en el territorio nacional. En esa época se registraron aproximadamente 615 emergencias que derivaron en la pérdida de 279 vidas humanas y afectaciones en cerca de 301 municipios del país. A partir del análisis hidrometeorológico desarrollado para este periodo, se identificaron anomalías positivas de precipitación en la región Andina Central, especialmente durante 1998, 1999 y los primeros meses del año 2000. (Sánchez, Vargas, González, & Pabón, 2001).

C. Las lluvias en el departamento del Tolima

El departamento del Tolima presenta una dinámica hidrometeorológica influenciada por factores climáticos,

topográficos y fluviales que favorecen la ocurrencia recurrente de precipitaciones intensas a lo largo del año. Como por ejemplo la alerta del 22 de abril de 2022 debido al incremento del nivel de río Magdalena en el municipio de Honda, Tolima, dónde las autoridades activaron alertas preventivas debido al riesgo inminente de inundación sobre viviendas y establecimientos comerciales ubicados en las zonas ribereñas. Dentro del reporte se destacó que el nivel del río alcanzó aproximadamente 8,62 metros, superando la cota mínima de desbordamiento establecida en 8,40 metros (El Tiempo, 2022).

Por último, la notificación más reciente ocurrió el 03 de febrero de 2026 dónde el incremento del nivel del río Magdalena generó preocupación entre las autoridades de gestión del riesgo por las posibles afectaciones sobre las comunidades ribereñas. n el caso del municipio de Honda, el río alcanzó niveles cercanos a los 6,30 metros, estabilizándose posteriormente alrededor de los 6 metros; sin embargo, las autoridades advirtieron que la continuidad de las lluvias podría provocar nuevos incrementos capaces de activar niveles superiores de alerta. De igual manera, municipios ribereños como Flandes, Purificación y Suárez fueron identificados dentro de las zonas con potencial riesgo de afectación, debido a la susceptibilidad de sus sectores cercanos al río frente a posibles desbordamientos (El Nuevo Día, 2026).

D. Casos de inundación en el municipio de Flandes

El municipio de Flandes ha registrado históricamente múltiples eventos de inundación asociados al comportamiento del Río Magdalena y a las fuertes precipitaciones en la región. Es importante mencionar que no se encontró información clara sobre niveles de inundación en el municipio, sin embargo es notable considerar que estas emergencias han generado afectaciones recurrentes sobre viviendas, infraestructura y población asentada en sectores ribereños de acuerdo con algunos registros fotográficos recopilados desde el año 2011, ver Fig 3, Fig 4 y Fig 5.

Se exponen registros fotográficos correspondientes a la temporada invernal ocurrida el 4 de mayo de 2011 y 17 de mayo de 2017, en la cual se evidenció un incremento significativo en el nivel del Río Magdalena y sus efectos directos sobre el sector ribereño del barrio La Capilla. En estas fotografías se observa la inundación que afectó visiblemente la infraestructura del malecón turístico y áreas aledañas, producto del desbordamiento y expansión temporal del cauce.



Fig. 3. Ubicación del malecón turístico. Fuente: Los autores, tomado de (Google Earth, 2026)



Fig. 4. Malecón turístico luego de la ola invernal año2011. Fotografías tomadas del video "Creciente río Magdalena Flandes y Girardot", (JuanchoGoAI, 2011)



Fig. 5. Malecón turístico afectado por inundación año 2017. Fotografías tomadas del video "Creciente río Magdalena Girardot", (Ruperto, 2017)

Continuando con lo anteiror, durante la ola invernal mencionada del 4 de mayo de 2011 otros barrios del municipio también sufrieron drásticas afectaciones, como por ejemplo el barrio Las Rosas dónde los registros fotográficos permiten evidenciar el alto nivel de vulnerabilidad presente en la población ribereña, al reflejar cómo los eventos de inundación generan afectaciones directas sobre la infraestructura urbana y las condiciones de habitabilidad del sector. Considerándose también que la exposición prolongada al agua y a ambientes contaminados incrementa los riesgos para la salud pública, favoreciendo la propagación de enfermedades y comprometiendo la seguridad y bienestar de las comunidades afectadas, ver Fig 6, Fig 7, Fig 8.



Fig. 6. Ubicación del barrio Las Rosas. Fuente: Los autores, tomado de (Google Earth, 2026)



Fig. 7. Habitantes ribereños afectados por ola invernal año 2011. Fotografías tomadas del video "Creciente río Magdalena Flandes y Girardot", (JuanchoGoAI, 2011)



Fig. 8. Incremento del nivel del río Magdalena, inundación primer piso de vivienda. Fotografías tomadas del video "Creciente río Magdalena Flandes y Girardot", (JuanchoGoAI, 2011)

V. Fundamentación teórica

Durante el desarrollo del campo de la meteorología, uno de los primeros aportes orientados a la comprensión de la circulación atmosférica global fue desarrollado por George Hadley en 1735, a partir de sus estudios relacionados con los vientos alisios. Dichas investigaciones permitieron establecer el concepto de las células de Hadley, definidas como sistemas simétricos de circulación atmosférica presentes en ambos hemisferios terrestres alrededor de la zona ecuatorial. Estos análisis contribuyeron significativamente al entendimiento de la influencia de la rotación terrestre sobre el comportamiento y desplazamiento de las masas de aire en la atmósfera (Martínez, 2024).

Añadiendo a lo anterior, toma participación el ciclo hidrológico el cual se encarga del proceso continuo de circulación del agua entre la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo en sus diferentes estados físicos: líquido, sólido y gaseoso. Dentro de este sistema se vincula la evaporación, condensación, precipitación, infiltración y escorrentía, los cuales permiten la renovación permanente del recurso hídrico y regulan su distribución espacial y temporal sobre la Tierra (Jaramillo & Chavez, 2000).

En añadidura, la variable cuantitativa "precipitación" representa una de las variables hidrológicas de mayor relevancia, ya que corresponde al proceso mediante el cual el agua en estado líquido o sólido desciende desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. Se considera fundamental al ser la entrada principal de agua al sistema hidrológico, debido a su influencia directa en la generación de escorrentía superficial, la recarga de acuíferos y el desarrollo de eventos extremos asociados a inundaciones (Jaramillo & Chavez, 2000).

Asimismo, la precipitación puede presentar variaciones en función de su intensidad, entendida como la cantidad de lluvia precipitada en una unidad de tiempo, expresada comúnmente en milímetros por hora (mm/h). Este parámetro permite evaluar el comportamiento de los eventos de lluvia y su influencia sobre la generación de escorrentía superficial y los caudales máximos (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

Considerando lo anterior, a intensidad de precipitación puede estimarse mediante las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), herramientas de análisis hidrológico que permiten caracterizar estadísticamente el comportamiento de los eventos extremos de lluvia a partir de la relación entre la intensidad de precipitación, la duración en min y su período de retorno en años y los parámetros de ajuste adimensionales, ver ecuación (1). A partir de esto, se facilita la evaluación de distintos escenarios hidrometeorológicos asociados a probabilidades específicas de ocurrencia, permitiendo interpretar la respuesta hidrológica de una cuenca frente a precipitaciones de alta magnitud (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2015).

$$I = (K * T^m) / (t^n) \quad (1)$$

Nota. Ecuación tomada de Corporación Autónoma Regional (CAR), (2015).

VI. DISEÑO METODOLÓGICO

La presente investigación se desarrollará bajo un enfoque metodológico de carácter cuantitativo, considerando que este tipo de ruta investigativa se fundamenta en el análisis numérico y en la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos para la evaluación secuencial de fenómenos y la validación de supuestos analíticos. Asimismo, la investigación adoptará un alcance descriptivo y explicativo a fin de detallar y funcionar como modelo replicable tanto nacional como internacional (Hernández & Mendoza, 2018).



Fig. 9. Esquema metodológico del proyecto .Fuente: Los autores (2026).

Bajo este enfoque, se estructurarán procesos sistémicos orientados a la medición y análisis, incorporando un desarrollo de (5) fases provocando control y seguridad dentro de la gestión de la investigación de variables hidrometeorológicas de la zona de estudio ubicada sobre los barrios San Luis, Las Rosas, Centro, Gaitán y La Capilla del municipio de Flandes Tolima, ver Fig 9. Es este punto es importante hacer énfasis en que la presente investigación se encuentra en curso y que la metodología está en la segunda fase.

VII. RESULTADOS

Inicialmente, se consolidó el registro histórico de precipitación máxima en 24 horas (mm), correspondiente a la información hidrometeorológica disponible para descarga pública a través de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Los datos fueron registrados por estación pluviométrica Aeropuerto Santiago Vila, ubicada en el municipio de Flandes, considerando que se encuentra habilitada desde los años 1998 y 2018.

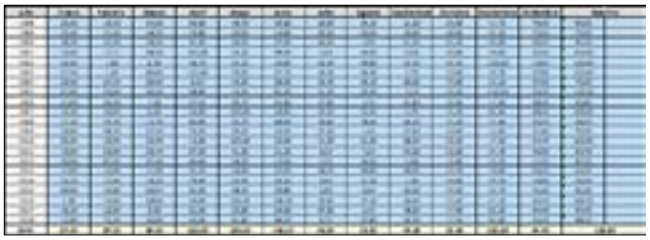
Añadiendo a lo anterior, la recopilación y organización de esta información se considera fundamental para la estructuración del análisis del comportamiento histórico de las precipitaciones máximas registradas en el área de estudio. En primera instancia, se obtuvo que la precipitación máxima mensual registrada entre el periodo de 1998 y 2018 fue de 122,60 mm para el mes de abril en el año 2003, constituyéndose como el evento de mayor intensidad dentro de toda la serie histórica analizada. En adición, en los meses de abril, mayo, junio, octubre y noviembre presentan recurrentemente los mayores valores de precipitación máxima, permitiendo identificar una marcada influencia de las temporadas lluviosas bimodales características de la región Andina colombiana, ver Tabla 1.

Por otra parte, visualizando los valores anuales es posible observar que el año 2016 presentó uno de los comportamientos más críticos de la serie histórica, registrando valores máximos de 106,50 mm tanto en mayo como en junio, lo que evidencia una persistencia de lluvias intensas durante periodos consecutivos y un posible aumento de saturación del suelo.

Posteriormente, con base en la serie histórica se empleó la estimación de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), orientadas a caracterizar el comportamiento probabilístico de los eventos extremos de precipitación en el área de estudio. Para su desarrollo es importante considerar la ecuación (1) previamente mencionada la cual permite determinar intensidades máximas de precipitación a diferentes intervalos de duración y recurrencia, ver Tabla 2.

Finalmente, se realizó la representación e las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), con el propósito de interpretar el comportamiento de los eventos extremos de precipitación en la zona de estudio, ver Fig. 10. Las curvas IDF constituyen una herramienta fundamental dentro de los estudios hidrológicos, debido a que permiten caracterizar la respuesta de las precipitaciones extremas y evaluar su incidencia sobre procesos asociados a escorrentía, drenaje urbano y generación de inundaciones (Marcus, Del Valle, Elizalde, Marcor, & Cristina, 2019).

Tabla 1. Valores mensuales de precipitación máxima en 24 hrs (mm)



[a.] Información registrada por Estación Meteorológica Aeropuerto Santiago Vila, Flandes-Tolima. Datos tomados de (Corporación Autónoma Regional Cundinamarca , 2018)

Tabla 2. Valores de intensidad y tiempo de duración según la frecuencia en años



[b.] Información tomada de Datos tomados de (Corporación Autónoma Regional Cundinamarca , 2018)

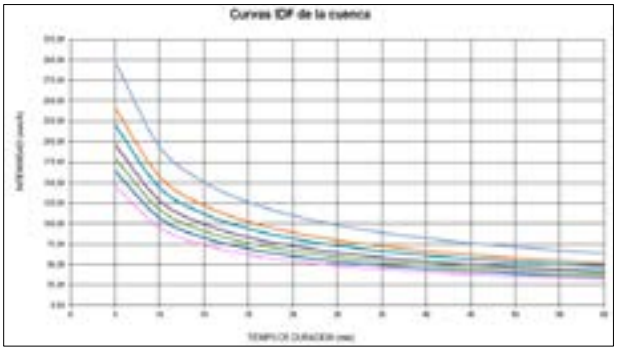


Fig. 10. Gráfico de curvas IDF de la zona de estudio, duración vs intensidad. Tomado de (Corporación Autónoma Regional Cundinamarca , 2018)

A partir del análisis de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) obtenidas para el área de estudio, se logra identificar un comportamiento hidrológico acorde con las dinámicas pluviométricas características de regiones tropicales, como ocurre en el municipio de Flandes. Considerando que, para el período de retorno de 2 años, se estimaron intensidades cercanas a 145,50 mm/h para eventos de 5 minutos, disminuyendo progresivamente hasta valores aproximados de 31,26 mm/h para duraciones de 60 minutos.

De manera similar, en escenarios asociados a períodos de retorno de 100 años, las intensidades máximas alcanzan aproximadamente 241,48 mm/h en eventos de corta duración, reduciéndose hasta 51,88 mm/h conforme aumenta el tiempo de precipitación. Por otra parte, los valores obtenidos para períodos de retorno de 50 y 100 años evidencian escenarios críticos de precipitación extrema, los cuales resultan fundamentales para el dimensionamiento de obras hidráulicas, sistemas de drenaje urbano y estructuras de control de inundaciones.

VIII. Conclusiones

- Es preciso concluir que Se identifica una relación inversamente proporcional entre la intensidad de precipitación y la duración del evento lluvioso, evidenciando que las mayores intensidades se concentran en intervalos de corta duración. Este comportamiento es característico de eventos convectivos intensos presentes en regiones tropicales, donde precipitaciones de alta magnitud ocurren en periodos reducidos de tiempo.

- El incremento de las intensidades asociado a mayores períodos de retorno permite inferir una relación directa entre la recurrencia del evento y su severidad hidrológica. Por lo tanto, los eventos menos frecuentes presentan una mayor capacidad de generación de escorrentía superficial y mayores probabilidades de producir afectaciones hidráulicas en sectores vulnerables.

- Los escenarios asociados a períodos de retorno altos, particularmente de 50 y 100 años, evidencian intensidades de lluvia con potencial suficiente para superar la capacidad hidráulica natural de drenaje del sistema fluvial, favoreciendo procesos de desbordamiento e inundación en sectores ribereños de baja pendiente topográfica.

References

[1] Agencia Estatal de Meteorología. (23 de Julio de 2018). *MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÒN Y MEDIO AMBIENTE*. Obtenido de Breve historia de la meteorolofgía: https://www.aemet.es/documentos/es/conocenos/nuestra_historia/breve_historia_meteorologia.pdf

[2] Alcaldía Municipal de Flandes. (2013). *Plan de Contingenica y Acción a Emergencias.* Flandes: Alcaldía Municipal- Secretaría de Planeación e Infraestructura.

[3] Camargo, O. W. (2016). Modelación Hidrológico-hidráulica de eventos de inundación en el río Bogotá (sector Tocanzipa-Chía) usando HEC-RAS. *Revista Ambiental Agua Aire y Suelo*, 7.

[4] Colombia Turismo Web . (s.f). *Colombia Turismo Web* . Obtenido de Municipio de Flandes: http://www.colombiaturismoweb.com/DEPARTAMENTOS/TOLIMA/MUNICIPIOS/FLANDES/FLANDES.htm

[5] Coordinación de Gestión de Riesgos de Desastres . (2026). *Plan de Emergencia y Contingencia para la Temporada de Lluvias.* Flandes: Alcaldía Municipal de Flandes.

[6] Corporación Autónoma Regional Cundinamarca . (2018). *Corporación Autónoma Regional Cundinamarca (CAR).* Obtenido de Curvas IDF-Aeropuerto Santiago Vila : https://www.car.gov.co/vercontenido/4729

[7] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2015). Guía técnica para la adecuación hidráulica y restauración ambiental de corrientess hídricas superficiales. Bogotá: CAR & Consorcio IEH Grucon-Hidrovias.

[8] EL ESPECTADOR . (07 de Mayo de 2014). *EL ESPECTADOR.* Obtenido de Fuertes lluvias prenden las alarmas en el Tolima: https://www.elespectador.com/colombia/mas-regiones/fuertes-lluvias-prenden-las-alarmas-en-el-tolima-article-491003/

[9] El Nuevo Día. (03 de Febrero de 2026). *El Nuevo Día.* Obtenido de Creciente del río Magdalena mantiene en alerta al Tolima : https://www.elnuevodia.com.co/tolima/creciente-del-rio-magdalena-mantiene-en-alerta-al-tolima-534528

[10] EL TIEMPO. (22 de Abril de 2022). *EL TIEMPO* . Obtenido de Alerta por gran aumento en el nivel del río Magdalena en Honda, Tolima : https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/tolima-alerta-por-gran-aumento-en-nivel-del-rio-magdalena-en-honda-666976

[11] Guzmán, C. L., Prada Alvis, C., Suarez Rodriguez, T., Rincón Leuro, S., Briñez García, L. F., Bustos Morales, M. A., . . . Bautista Gallego, S. (2019). *Documento técnico inventario patrimonio cultural material e imaterial del municipio.* Flandes, Tolima.

[12] Hernández, S. R., & Mendoza, T. C. (2018). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN: LAS RUTAS CUANTITATIVA, CUALITATIVA Y MIXTA.* Ciudad de México: McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C. V.

[13] Houghtalen, R., Akan, A. O., & Hwang, N. H. (2010). Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems (4th ed.). New Jersey: Prentice Hall.

[14] Jaramillo, R. A., & Chavez, C. B. (2000). Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé*, 102-113.

[15] JuanchoGoAI. (04 de Mayo de 2011). Obtenido de Creciente río Magdalena Flandes y Girardot [Video]. Youtube: https://youtu.be/4Siq73A-8vg?si=teV88gCsCCqjxnqJ

[16] Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1982). Hydrology for Engineers (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.

[17] Mantilla , R., Mesa, O., & Poveda , G. (1998). Geometría, Topología y Morfología de la cuencas Magdalena- Cauca y Atrato a partir de Modelos Digitales de Terreno. Medellín : Universidad Nacional de Colombia .

[18] Marcus, R., Del Valle, M. M., Elizalde, C. E., Marcor, J., & Cristina, I. (2019). *Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de la estación meteorológica del CIM-FICH. Serie 1986-2016.* Santa Fe, Argentina : Universidad Nacional del Litoral.

[19] Montealegre, B. J., & Pabon, C. J. (2000). La Variabillidad Climática Interanual Asociada al ciclo El Niño- La Niña, Oscilación del Sur y su Efecto en el Patrón Pluviométrico de Colombia. Bogotá: Boletín de Meteorología Colombiana .

[20] Mora, M. W., & Ochoa, R. G. (2016). Modelamiento de zonas de inundación por medio de las herramientas hec-ras, geo-ras y arcgis, para el sectorcomprendido entre los municipios de corrales- paz de rio a lolargo del rio Chicamocha, en el departamento de Boyacá. Sogamoso, Boyacá: UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.

[21] Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2013). Fundamentals of Fluid Mechanics (7th ed.). New york: Wiley.

[22] Ruperto, J. (17 de Mayo de 2017). Obtenido de Creciente RÍo Magdalena Girardot- Flandes [Video]. YouTube.: https://youtu.be/2QBx9KBVRBI?si=R1myNzMErBcMXaCQ

[23] Sanchez, L. J., Escobar, V. J., Beltrán, C. D., Ardila, C. F., Oliveros, A. J., Cardona, A. C., & Garay, B. C. (2018). Hydrological and Hydraulic Modelling in Magdalena River. *International Congress on Environmental Modelling and Software*.

[24] Sánchez, R., Vargas, G., González, H., & Pabón, D. (2001). Los Fenómenos Cálido del Pacífico (El niño) y Frío del Pacífico (La niña) y su Incidencia en la Estabilidad de Laderas en Colombia. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

[25] Tenesaca, S. E., Reyes, Z. J., Vallejo, V. D., & Chavarría, P. J. (2024). Modelación hidrológica e hidráulica para la identificación de zonas de inundacióon en la quebrada Las Abras, Riobamba. *INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 21.

[26] Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2022). *Plan Nacional de Respuesta Primera Temporada Lluvias (15 marzo 2022-15 junio 2022).* Bogotá: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres .

[27] Unidad Nacional para La Gestión del Riesgo de Desastres. (2022). *Plan Nacional de Respuesta- Segunda Temporada Lluvias 2022 con influencia Fenómeno La Niña.* Bogotá: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD).

Apropiación Social del Conocimiento para la Gestión del Riesgo de Desastres en la Cuenca Río Quilichao

1° Dairon Popo Sabogal
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad del Cauca
Santander de Quilichao, Colombia
daironps@unicauca.edu.co

2° Daniela Galarza Bravo
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad del Cauca
Santander de Quilichao, Colombia
danielagalarza@unicauca.edu.co

3° Andrea Johana Cabezas Guzmán
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad del Cauca
Santander de Quilichao, Colombia
andreacabezas@unicauca.edu.co

4°Enif Medina Bello
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad del Cauca
Santander de Quilichao, Colombia
enifmedina@unicauca.edu.co

5° Edgar Alexander Rodríguez Castiblanco
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad del Cauca
Santander de Quilichao, Colombia
edgararodriguez@unicauca.edu.co

RESUMEN

La gestión del riesgo de desastres en territorios con condiciones ambientales y sociales complejas requiere enfoques que vayan más allá de lo técnico e integren activamente a las comunidades. En este contexto, esta investigación se desarrolla en la cuenca del río Quilichao, ubicada en el municipio de Santander de Quilichao, en el departamento del Cauca, Colombia, en el marco del proyecto "Escenarios de amenazas socio naturales en las cuencas de los ríos Quilichao y Mondomo, Santander de Quilichao – Cauca: aporte a los procesos de gestión del riesgo y ordenamiento territorial", un territorio que enfrenta de manera recurrente fenómenos como inundaciones, avenidas torrenciales y deslizamientos.

El estudio incorpora la apropiación social del conocimiento como eje transversal del proceso investigativo, orientado a articular el conocimiento técnico con los saberes locales y promover procesos de construcción colectiva y coproducción de conocimiento entre comunidad y academia, con el fin de fortalecer las capacidades para la comprensión y gestión del riesgo de desastres. En este contexto, el proyecto se desarrolló en tres fases: diagnóstico de escenarios de amenaza en el territorio, monitoreo comunitario y fortalecimiento de capacidades promoviendo la participación activa de la comunidad en la construcción colectiva del conocimiento sobre las dinámicas del territorio y sus escenarios de riesgo.

En una primera fase, se identificaron los escenarios de amenaza naturales mediante la revisión de información de eventos de desastres, análisis de estudios previos y recorridos de campo junto con la comunidad. Así mismo, se implementó un proceso de monitoreo comunitario orientado al seguimiento de variables hidrometeorológicas, mediante la instalación de instrumentos para la medición de precipitación y niveles. Finalmente se desarrollaron espacios de formación e intercambio de experiencias enfocados en el fortalecimiento de capacidades locales, incluyendo ejercicios prácticos en campo, procesos de capacitación y el uso de herramientas para el registro, seguimiento y visualización de la información generada comunitariamente.

Los resultados evidencian que la participación de la comunidad favorece una comprensión integral de las dinámicas territoriales asociadas a los escenarios de amenaza y riesgo, al tiempo que fortalece las capacidades locales para la gestión del riesgo del territorio. La articulación entre el conocimiento técnico y los saberes locales permitió generar información útil para la comprensión de fenómenos asociados a inundaciones, avenidas torrenciales, movimientos en masa y variabilidad hidroclimatológica, promoviendo aprendizaje colectivo y la participación comunitaria en los procesos de gestión del riesgo aportando a la construcción de comunidades más preparadas frente a futuros eventos.

PALABRAS CLAVE

Gestión del riesgo de desastres; Apropiación social del conocimiento; Monitoreo comunitario.

I. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta los avances de un proceso de apropiación social del conocimiento desarrollado en la cuenca del río Quilichao, en el municipio de Santander de Quilichao (Cauca), como parte del proyecto de investigación *"Escenarios de amenazas socionaturales en las cuencas de los ríos Quilichao y Mondomo"*. Este proceso surge de la necesidad de comprender el riesgo no solo desde una perspectiva técnica, sino también a partir de las experiencias y saberes de las comunidades que habitan el territorio.

En este marco, la apropiación social del conocimiento se incorporó promoviendo la articulación entre el conocimiento técnico y los saberes locales, en procesos de reconocimiento territorial, monitoreo comunitario e intercambio de experiencias relacionadas con la gestión del riesgo de desastres, lo cual permitió la participación y avances en una compresión integral de las dinámicas de amenaza presentes en la cuenca.

El desarrollo del proceso integró análisis técnico, revisión de información secundaria, trabajo de campo y espacios de construcción colectiva del conocimiento entre comunidad y academia. A partir de ello, se construyeron de manera conjunta la identificación de los escenarios de amenaza, monitoreo comunitario de variables hidrometeorológicas y fortalecimiento de capacidades locales orientadas a la gestión de riesgo de desastres.

En Colombia, la ocurrencia de inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa está estrechamente relacionada con las condiciones geomorfológicas del territorio y la variabilidad climática, particularmente en la región Andina. De acuerdo con la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, uno de los factores determinantes en la generación del riesgo está relacionado con la forma en que se organiza y se ocupa el territorio (UNGRD, 2024). En la misma línea, el CONPES 4058 (DNP, 2021) señala que la variabilidad climática contribuye a la configuración de escenarios de riesgo cuando interactúa con condiciones de exposición y vulnerabilidad presentes en el territorio.

Estas dinámicas se expresan en el departamento del Cauca, donde las características geomorfológicas, las pendientes pronunciadas y la variabilidad en las precipitaciones favorecen la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos. En este escenario se ubica la cuenca del río Quilichao, con una extensión aproximada de 87,56 km² y una longitud de cauce principal cercana a 18,33 km, cuyo sistema hídrico nace en el cerro Munchique, en inmediaciones de la Reserva Natural Munchique Los Tigres según el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (Concejo Municipal de Santander de Quilichao, 2024). La cuenca presenta una alta interacción entre dinámicas ambientales y sociales, donde en la parte alta predominan comunidades rurales cuyos medios de vida dependen del recurso hídrico, mientras que en la parte baja se concentran zonas urbanas e infraestructura.

De acuerdo con el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (Alcaldía de Santander de Quilichao, 2016), las inundaciones, las avenidas torrenciales y los movimientos en masa, asociados a factores como lluvias intensas, pendientes del terreno y condiciones de cobertura vegetal. En concordancia, estudios de la Corporación Autónoma Regional del Cauca reportan diferentes niveles de amenaza en el territorio de los fenómenos mencionados (CRC, 2023 a, b, c), evidenciando la existencia de zonas críticas tanto en áreas rurales como urbanas.

En conjunto, estas condiciones reflejan una alta susceptibilidad del territorio a procesos hidrometeorológicos y geomorfológicos, en los cuales los fenómenos que se originan en la parte alta de la cuenca, como la erosión y los movimientos en masa, pueden generar incrementos en el caudal, transporte de sedimentos y afectaciones a la población y la infraestructura en las zonas bajas. Esta dinámica territorial se ilustra en la Fig. 1, donde se presenta la distribución de los procesos geomorfológicos presentes en la cuenca del río Quilichao y su relación con la generación de escenarios de riesgo.

II. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo participativo, integrando herramientas para la gestión del riesgo de desastres, el monitoreo comunitario con el propósito de articular el conocimiento técnico y los saberes locales en la cuenca del río Quilichao.

En el desarrollo del proceso la apropiación social del conocimiento se incorporó como eje transversal orientado a promover la participación activa de la comunidad mediante el diálogo de saberes, el intercambio de experiencias, la construcción colectiva y coproducción del conocimiento, favoreciendo la comprensión del territorio y de las dinámicas del riesgo (Minciencias, 2021) y relaciones horizontales entre comunidad y academia. En coherencia con ello, la cartografía social se constituye como una herramienta metodológica central, al facilitar la representación participativa de los escenarios de amenaza presentes en el territorio (Sandoval-Díaz et al., 2025). De manera complementaria, se incorporó el enfoque de activos comunitarios, orientado a reconocer capacidades, recursos y fortalezas presentes en la comunidad (Betancurth Loaiza et al., 2020).

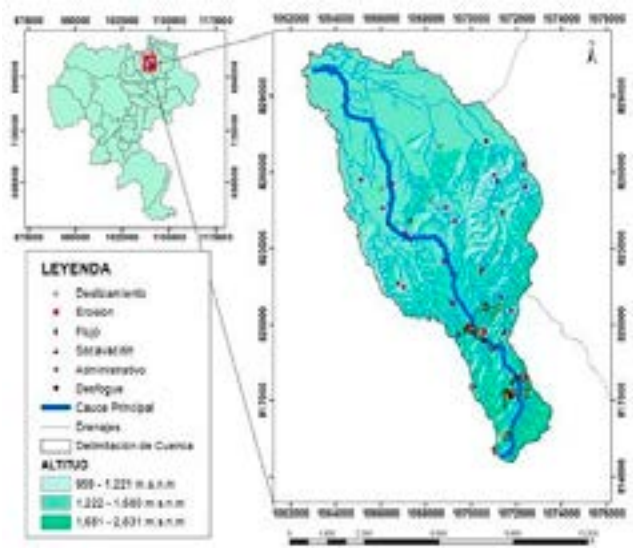


Fig. 1. Distribución de los procesos geomorfológicos presentes en la cuenca del río Quilichao

Con base en estos elementos, se estructuró un proceso metodológico progresivo en tres etapas interrelacionadas, como se observa en la Fig. 2:



Fig. 2. Estrategia Metodológica

Etapa 1. Diálogo de saberes y contextualización del riesgo en el territorio

La primera etapa se orientó a la construcción de una comprensión integral del territorio, a partir de la articulación entre el análisis de información secundaria, la revisión de antecedentes de eventos y el diálogo de saberes con la comunidad. Inicialmente, se realizó la revisión de estudios previos a escala de cuenca y de documentos institucionales, tales como el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD, 2018) de Santander de Quilichao y los informes de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC, 2023), en los cuales se identifican las áreas de amenaza por inundaciones, avenidas torrenciales y los movimientos en masa como escenarios prioritarios de riesgo.

De manera complementaria, se analizaron registros históricos y reportes comunitarios relacionados con eventos ocurridos en el territorio, permitiendo reconocer sectores recurrentemente afectados y aspectos asociados a la variabilidad hídrica en la cuenca.

Posteriormente, se desarrollaron espacios de diálogo con líderes comunitarios, recorridos de campo y talleres participativos orientados al reconocimiento territorial y al intercambio de experiencias sobre dinámicas ambientales y los escenarios de amenaza presentes en la cuenca del río Quilichao. Estas actividades promovieron procesos de construcción colectiva y diálogo de saberes entre comunidad y academia favoreciendo la integración entre el conocimiento técnico y las experiencias locales en la comprensión del territorio.

Etapa 2. Monitoreo comunitario

La segunda etapa se orientó a la implementación de un proceso de monitoreo comunitario de variables hidrometeorológicas en la cuenca del río Quilichao con el propósito de generar información local asociada al comportamiento de la precipitación y los niveles de agua , así como, fortalecer la participación comunitaria en el seguimiento de las dinámicas territoriales relacionadas con inundaciones, avenidas torrenciales, movimientos en masa y sequías, esta última, teniendo en cuenta que se trata de una cuenca abastecedora.

En esta etapa se realizó la instalación de instrumentos de medición, específicamente un pluviómetro y una regla limnimétrica, además de jornadas de socialización y capacitación sobre el funcionamiento de los instrumentos, la toma de datos y el registro de la información. De manera complementaria se promovió la participación comunitaria en las actividades de seguimiento y monitoreo de las variables hidroclimatológicas.

En coherencia con enfoques de monitoreo comunitario y construcción colectiva del conocimiento, el proceso buscó integrar el conocimiento técnico y los saberes locales en la generación y seguimiento de información territorial favoreciendo espacios de participación e intercambio entre la comunidad y la academia (Sandoval-Díaz et al., 2025; Acosta-Hernández et al., 2023).

Etapa 3. Fortalecimiento de capacidades para la Gestión del Riesgo de Desastres.

La tercera etapa se orientó al fortalecimiento de las capacidades locales para la gestión del riesgo de desastres a partir de los procesos de aprendizaje construidos durante el monitoreo comunitario y de la articulación entre la comunidad y la academia en torno al reconocimiento de los escenarios de amenaza y las dinámicas hidrometeorológicas de la cuenca.

En esta etapa se desarrollaron espacios de formación, actividades prácticas y ejercicio de intercambio de experiencias relacionados con el uso de instrumentos, la toma y organización de los datos, la comprensión de la información recolectada y su utilidad para el seguimiento de las dinámicas del territorio relacionadas con la gestión del riesgo.

Asimismo, se desarrolló e implementó una aplicación para el registro y seguimiento de la información generada durante el monitoreo comunitario, complementada con el uso de herramientas digitales como Avenza Maps dando alcance a productos de cartografía social en actividades de reconocimiento territorial y levantamiento de información georreferenciada.

El desarrollo del proyecto en articulación con el trabajo comunitario ha permitido avanzar progresivamente en la generación y registro de información relevante para la gestión del riesgo en la cuenca, así como el fortalecimiento en el seguimiento de las variables hidroclimatológicas. Este proceso constituye una base inicial para futuras aplicaciones, como el fortalecimiento de estrategias de monitoreo y la posible implementación de un sistema de alerta temprana, en coherencia con los principios de la apropiación social del conocimiento (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2021).

III. RESULTADOS

El proceso desarrollado en la cuenca del río Quilichao permitió evidenciar avances en la apropiación social del conocimiento a través de la articulación entre la comunidad y la academia, fortaleciendo procesos de diálogo de saberes, monitoreo comunitario y apropiación de herramientas para el reconocimiento del territorio y el seguimiento de variables hidrometeorológicas. Los resultados obtenidos se presentan a continuación de acuerdo con las etapas presentadas en el proceso metodológico.

Resultados Etapa 1. Diálogo de saberes y contextualización del riesgo en el territorio

El análisis de los antecedentes históricos y los espacios participativos permitieron el diálogo de saberes con la comunidad favoreció una comprensión más integral de las dinámicas territoriales y de los escenarios de amenaza presentes en la cuenca del río Quilichao. Así mismo, la información institucional y los estudios previos fueron complementados con el conocimiento local aportado por los líderes comunitarios y habitantes del territorio (Fig. 3) permitiendo reconocer sectores recurrentemente afectados por inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa.

Los recorridos de campo y los talleres participativos permitieron identificar conjuntamente sectores críticos y comprender la relación entre las dinámicas de la parte alta de la cuenca y sus efectos sobre las zonas bajas, especialmente en términos de crecientes súbitas, transporte de sedimentos y afectaciones sobre infraestructura y viviendas. Además, la comunidad aportó información relacionada con periodos de disminución en la disponibilidad hídrica, ampliando la comprensión de las problemáticas territoriales presentes en la cuenca



Fig. 3. Reconocimiento sectores críticos del área de estudio en la vereda Guayabal, municipio de Santander de Quilichao, realizado en compañía de la comunidad local.

Este proceso favoreció la construcción colectiva del conocimiento sobre el territorio, integrando los saberes locales y el conocimiento técnico en la identificación de problemáticas y la priorización de sectores estratégicos para el monitoreo comunitario y el seguimiento hidrometeorológico.

Resultados Etapa 2. Monitoreo comunitario

La implementación del monitoreo comunitario permitió iniciar procesos de generación de información local sobre el comportamiento hidrometeorológico de la cuenca, mediante la instalación y seguimiento de instrumentos para la medición de la precipitación y los niveles de agua (Fig. 4), además de actividades de monitoreo hidrológico en campo como ejercicio de aforos en el cauce (Fig. 5).



Fig. 4. Instalación de pluviómetro y regla limnimétrica para la medición de la precipitación y niveles de agua.

La definición de los puntos de monitoreo se realizó de manera conjunta entre la comunidad y la academia, por tanto, integró criterios técnicos y conocimiento local sobre el comportamiento del recurso hídrico, lo cual permitió orientar el seguimiento a las dinámicas territoriales asociadas a la generación de amenazas, mediante un proceso construido y acompañado por la comunidad.



Fig. 5. Ejercicio de aforos en el cauce.

Resultados de la Etapa 3. Fortalecimiento de capacidades e intercambio de experiencias para la gestión del riesgo de desastres

Los espacios de formación e intercambio de experiencias permitieron fortalecer procesos de aprendizaje colectivo alrededor de las dinámicas hidrometeorológicas y de los escenarios de amenazas presentes en la cuenca (Fig. 6). A través de actividades prácticas, recorridos de campo y ejercicios asociados al monitoreo comunitario, la comunidad ha avanzado en comprensión de la utilidad de la información recolectada relacionada con la evaluación y análisis de los escenarios de amenazas.



Fig. 6. Espacio de socialización comunitaria de resultados, orientado a la presentación de avances en el monitoreo hidrometeorológico y la gestión del riesgo en el territorio.

De manera complementaria, el diseño e implementación de una aplicación móvil para el registro y seguimiento de la información permitió iniciar procesos de organización, visualización y consulta de los datos generados durante el monitoreo comunitario (Fig. 7), el cual se encuentra en construcción en la herramienta KoboToolbox. Esta herramienta constituye una base inicial para futuros procesos de análisis y seguimiento hidrometeorológico, facilitando el acercamiento de la comunidad al manejo de información territorial.



Fig. 7. Propuesta final de diseño para la interfaz del aplicativo móvil.

Así mismo, el uso de herramientas como la cartografía social junto con apoyos digitales como Avenza Maps durante los recorridos de campo realizado con los líderes comunitarios permite que se maneje y levante información georreferenciada. El mapa utilizado en Avenza Maps se elaboró con QGIS y corresponde a un mapa base topográfico de la cuenca. La información capturada en mediante esta herramienta puede descargarse en formato KML permitiendo que los lideres comunitarios la visualicen posteriormente en plataformas como Google Maps.

En conjunto, las actividades desarrolladas durante las diferentes etapas del proceso permitieron fortalecer la articulación entre comunidad y academia, promoviendo procesos de construcción colectiva y apropiación social del conocimiento en torno a la comprensión de las dinámicas territoriales y la gestión del riesgo de desastres en la cuenca del río Quilichao.

IV. CONCLUSIONES

El proceso desarrollado en la cuenca del río Quilichao evidenció que la apropiación social del conocimiento constituye una estrategia relevante para fortalecer la gestión del riesgo de desastres en territorios con alta complejidad socioambiental.

La articulación entre el la comunidad y la academia permitió integrar el conocimiento técnico y los saberes locales en la comprensión de las dinámicas territoriales asociadas a inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa, así como, variabilidad hídrica.

El monitoreo comunitario, apoyado en el uso de instrumentos de medición y herramientas digitales, permitió iniciar procesos de generación y seguimiento de información hidrometeorológica local, fortaleciendo progresivamente la participación comunitaria y el reconocimiento de la utilidad de la información para la gestión del riesgo y del recurso hídrico.

Finalmente, el proceso desarrollado permitió fortalecer espacios de aprendizaje colectivo, intercambio de experiencias, y construcción conjunta del conocimiento entre comunidad y academia, generando además información e insumos relevantes para estudios de amenaza y para el fortalecimiento de procesos de monitoreo territorial y posibles estrategias comunitarias de alerta temprana en la cuenca del río Quilichao.

REFERENCIAS

[1] Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2024). Plan nacional de gestión del riesgo de desastres 2015–2030. Bogotá, Colombia.

[2] DNP- Departamento Nacional de Planeación. (2021). CONPES 4058: Política nacional de gestión del riesgo de desastres y adaptación al cambio climático. Consejo Nacional de Política Económica y Social.

[3] Concejo Municipal de Santander de Quilichao. (2024). Plan básico de ordenamiento territorial del municipio de Santander de Quilichao. Santander de Quilichao, Colombia.

[4] Alcaldía de Santander de Quilichao. (2016). Plan municipal para la gestión del riesgo de desastres (PMGRD) 2014–2027.

[5] Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC). (2023a). Informe de amenaza por avenida torrencial, escala 1:2000: Elaboración de estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgos por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial en municipios priorizados del departamento del Cauca.

[6] Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC). (2023b). Informe de amenaza por inundación, escala 1:5000: Elaboración de estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgos por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial en municipios priorizados del departamento del Cauca.

[7] Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC). (2023c). Informe de amenaza por movimientos en masa, escala 1:5000: Análisis de movimientos en masa, Santander de Quilichao. Elaboración de estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgos por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial en municipios priorizados del departamento del Cauca.

[8] Minciencias. (2021). Política pública de apropiación social del conocimiento en el marco de la ciencia, la tecnología y la innovación. Bogotá, Colombia.

[9] Sandoval-Díaz, J., Suazo-Muñoz, C., & Navarrete-Valladares, C. (2025). Cartografía social y mapeo participativo en la gestión comunitaria del riesgo de desastres: Una revisión sistemática. Psicoperspectivas, 24(3). https://doi.org/10.5027/psicoperspectivas-vol24-issue3-fulltext-3414

[10] Betancurth Loaiza, D. P., Vélez Álvarez, C., & Sánchez Palacio, N. (2020). Cartografía social: construyendo territorio a partir de los activos comunitarios en salud. Entramado, 16(1), 138–151. https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.6081

[11] Acosta-Hernández, K. J., Forero-Molina, S. C., & Garzón-Medina, C. (2023). La cartografía social y su aplicabilidad en la construcción de marca territorio: Una revisión teórica. Vestigium Ire, 17(1), 64–82.

Definición de Aspectos de Seguridad: Caso de estudio Grupo de Investigación GRID

1st Miguel A.Garcia-Osorio
Facultad de Ingeniería
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
miguela.garciao@uqvirtual.edu.co

2nd Huendy Caicedo-Tangarife
Facultad de Ingeniería
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
huendy.caicedot@uqvirtual.edu.co

3th Luis E. Sepúlveda-Rodríguez
Facultad de Ingeniería
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
lesepulveda@uniquindio.edu.co

***Resumen*—Este trabajo presenta una propuesta de aspectos de seguridad orientados a fortalecer entornos de computación en la nube mediante mecanismos de monitoreo, control y protección perimetral. La propuesta toma como caso de estudio la infraestructura del grupo GRID de la Universidad del Quindío, aunque el enfoque puede ser adaptado a organizaciones que requieran fortalecer capacidades de ciberseguridad alineadas con estándares internacionales. El desarrollo metodológico se fundamentó en un estudio de mapeo sistemático y en la caracterización de infraestructura tecnológica. Como resultado, se identificaron tendencias relacionadas con modelos Zero Trust, sistemas SIEM, mecanismos IDS/IPS y controles asociados con ISO/IEC 27001, ISO/IEC 27017 e ISO/IEC 27018. Actualmente, el proyecto se encuentra en fase de implementación de prototipo funcional**

***Keywords*—computación en la nube, ciberseguridad, ISO/IEC 27001, arquitectura de seguridad, SIEM.**

I. Introduction

La computación en la nube ha transformado la manera en que las instituciones y organizaciones gestionan sus recursos tecnológicos, permitiendo mejorar la disponibilidad, escalabilidad y acceso a servicios distribuidos. Sin embargo, este crecimiento también ha incrementado los riesgos asociados con la seguridad de la información, especialmente en entornos donde convergen servicios virtualizados, almacenamiento distribuido y múltiples usuarios conectados simultáneamente [1]-[2].

En el sector académico y organizacional, la protección de los activos de información representa un desafío crítico debido al incremento de amenazas cibernéticas relacionadas con accesos no autorizados, fuga de información, ataques dirigidos y vulnerabilidades en infraestructuras cloud [3]-[4]. Diversos estudios han evidenciado que muchas organizaciones aún presentan limitaciones relacionadas con monitoreo continuo, correlación de eventos y formalización de controles de seguridad [5].

Frente a esta problemática, los estándares internacionales proporcionan lineamientos orientados a fortalecer la gestión de seguridad en entornos cloud. La norma ISO/IEC 27001:2022 establece un marco para la implementación de Sistemas de Gestión de Seguridad de la Información, mientras que ISO/IEC 27017:2015 incorpora controles específicos para servicios de computación en la nube e ISO/IEC 27018 fortalece la protección de información sensible y datos personales almacenados en infraestructuras cloud [6]-[8].

Adicionalmente, investigaciones recientes destacan la adopción de arquitecturas Zero Trust, sistemas SIEM y mecanismos IDS/IPS como estrategias para mejorar capacidades de monitoreo, detección y respuesta frente a amenazas en entornos distribuidos [9]-[10]. No obstante, múltiples propuestas abordan estos mecanismos de manera aislada, existiendo una menor presencia de arquitecturas integrales orientadas a combinar monitoreo, control y protección perimetral bajo enfoques alineados con estándares internacionales.

Bajo este contexto, surge la necesidad de definir aspectos de seguridad orientados a complementar infraestructuras cloud mediante mecanismos de defensa en profundidad, monitoreo continuo y gestión centralizada de eventos de seguridad.

Actualmente, el proyecto se encuentra en fase de implementación de un prototipo funcional orientado a complementar la infraestructura existente sin alterar su operación actual. Asimismo, se busca establecer una base técnica para futuras etapas de validación y evaluación de la arquitectura propuesta.

II. Metodología

La metodología del trabajo se define bajo un enfoque estructurado orientado al análisis, diseño e implementación progresiva de una arquitectura de seguridad para entornos de computación en la nube. Este enfoque integra procesos de investigación, caracterización de infraestructura y definición arquitectónica, permitiendo articular evidencia científica, necesidades organizacionales y mecanismos de seguridad alineados con estándares internacionales.

Para efectos del trabajo, la metodología se organiza en cinco fases principales: i) identificación de necesidades, problemas y oportunidades; ii) estudio de mapeo sistemático; iii) diseño del protoipo; iv) implementación del prototipo; y v) validación del prototipo. A continuación, se describe cada una de estas fases.

A. dentificación de necesidades, problemas y oportunidades

La primera fase se orientó a la identificación de necesidades, problemas y oportunidades (NPO) relacionadas con la seguridad de la infraestructura de computación en la nube del entorno de estudio. Para ello, se realizó un proceso de levantamiento y análisis de información mediante entrevistas estructuradas y revisión técnica de la infraestructura existente.

Esta fase tuvo como propósito reconocer aspectos asociados con controles de seguridad, mecanismos de protección, monitoreo y gestión de infraestructura, considerando además los principios de seguridad de la información y los desafíos presentes en entornos cloud institucionales.

Asimismo, se tomaron como referencia estándares internacionales como ISO/IEC 27001 e ISO/IEC 27017, con el fin de orientar la identificación de oportunidades de mejora relacionadas con la formalización de controles y fortalecimiento de capacidades de seguridad.

Finalmente, el análisis NPO permitió establecer una base conceptual y técnica para las fases posteriores del trabajo, especialmente en lo relacionado con la incorporación de mecanismos de seguridad unificada, monitoreo y arquitecturas de protección orientadas a entornos de computación en la nube.

B. Estudio de mapeo sistemático

La segunda fase se orientó al desarrollo de un estudio de mapeo sistemático (Systematic Mapping Study, SMS) con el propósito de identificar tendencias, enfoques, tecnologías y estándares relacionados con la seguridad en entornos de computación en la nube. Esta fase permitió consolidar una base científica y técnica para apoyar la definición de la arquitectura de seguridad propuesta.

El SMS se desarrolló siguiendo lineamientos metodológicos para revisiones sistemáticas en ingeniería de software [11]-[13]. El proceso se estructuró en seis etapas principales, como se puede ver en la Fig.1, estas etapas son: 1) definición de preguntas de investigación; 2) construcción del protocolo de búsqueda; 3) ejecución de estrategias de búsqueda; 4) aplicación de criterios de selección y evaluación; 5) extracción y clasificación de información y 6) síntesis y análisis de resultados.



Fig. 1. Metodología explicita.

Con el propósito de fortalecer la cobertura y trazabilidad de la literatura analizada, se utilizaron dos estrategias complementarias de búsqueda: búsqueda automática en bases de datos académicas y snowball hacia atrás y hacia adelante. La búsqueda automática se ejecutó sobre IEEE Xplore, Web of Science, Springer, ScienceDirect y Taylor & Francis, considerando publicaciones entre 2020 y 2026 relacionadas con cloud security, cybersecurity, security controls y cloud architecture.

Posteriormente, la estrategia de snowballing permitió ampliar la cobertura de literatura mediante el análisis de referencias bibliográficas de los estudios seleccionados y de investigaciones relacionadas que citaban dichos trabajos.

Asimismo, se definieron criterios de inclusión, exclusión y evaluación de calidad orientados a garantizar la pertinencia y trazabilidad de los estudios considerados dentro del proceso investigativo.

Finalmente, la información recopilada fue organizada mediante criterios de clasificación relacionados con enfoques de seguridad, tecnologías implementadas, estándares utilizados y contextos de aplicación, permitiendo estructurar conceptualmente la evidencia utilizada como apoyo para el desarrollo del trabajo.

C. Diseño del prototipo

La tercera fase se orientó al análisis y resolución de decisiones tecnológicas mediante el enfoque Decision Analysis and Resolution (DAR), con el propósito de apoyar la selección de componentes y mecanismos de seguridad para la propuesta arquitectónica.

Esta fase tomó como base los resultados obtenidos en la identificación de necesidades, problemas y oportunidades, así como la evidencia científica recopilada durante el estudio de mapeo sistemático. A partir de ello, se definieron criterios orientados a evaluar alternativas tecnológicas relacionadas con monitoreo, protección perimetral, detección de intrusiones y gestión de eventos de seguridad.

El proceso DAR permitió estructurar la toma de decisiones considerando aspectos técnicos, funcionales y operativos asociados con la norma ISO/IEC 27001 e ISO/IEC 27017.

Asimismo, esta fase contempló el análisis comparativo de herramientas y enfoques de seguridad orientados a fortalecer capacidades de detección, prevención y respuesta frente a amenazas en infraestructuras distribuidas.

Posteriormente, con base en las decisiones tecnológicas obtenidas, se desarrolló el diseño de la arquitectura de seguridad propuesta mediante un enfoque por capas. Para la representación formal de la arquitectura se utilizó ArchiMate, lenguaje de modelado orientado a la descripción de componentes, relaciones y servicios dentro de arquitecturas empresariales.

La arquitectura fue estructurada en siete capas principales orientadas a representar los diferentes niveles funcionales y tecnológicos de la solución, incluyendo componentes asociados con acceso de usuarios, servicios, aplicaciones, monitoreo, seguridad, infraestructura y comunicaciones.

Dentro de la arquitectura se contempló la integración de mecanismos de seguridad perimetral mediante dispositivos UTM, sistemas SIEM para monitoreo y correlación de eventos, mecanismos IDS/IPS, segmentación de red y conexiones seguras mediante VPN.

Finalmente, esta fase permitió establecer la base conceptual y técnica necesaria para la implementación progresiva del prototipo funcional de seguridad.

D. Implementación del prototipo

La cuarta fase corresponde a la implementación progresiva del prototipo funcional de la arquitectura de seguridad propuesta. Esta etapa toma como base las decisiones tecnológicas y el diseño arquitectónico definidos en las fases anteriores, con el propósito de complementar la infraestructura existente mediante mecanismos de monitoreo, protección y gestión de eventos de seguridad.

La implementación se desarrolla en un entorno controlado asociado a la infraestructura del grupo GRID, buscando evitar afectaciones sobre la operación de los servicios actualmente desplegados. Asimismo, esta fase contempla la configuración e integración gradual de los componentes definidos dentro de la arquitectura de seguridad.

Entre los mecanismos considerados dentro del prototipo se incluyen: dispositivos UTM para protección perimetral; sistemas SIEM para monitoreo y correlación de eventos; mecanismos IDS/IPS para detección y prevención de intrusiones; segmentación de red y conexiones seguras mediante VPN.

Adicionalmente, esta fase contempla la integración de herramientas orientadas al monitoreo y análisis de eventos de seguridad, así como mecanismos de inspección del tráfico de red y generación de alertas frente a comportamientos sospechosos dentro de la infraestructura.

La implementación del prototipo constituye el paso intermedio entre el diseño arquitectónico y las futuras etapas de validación, permitiendo materializar la propuesta y preparar el entorno para procesos posteriores de evaluación y análisis de desempeño de los mecanismos de seguridad implementados.

E. validación del prototipo

La quinta fase se orienta a la validación del prototipo funcional de la arquitectura de seguridad propuesta, con el propósito de evaluar el comportamiento e integración de los mecanismos implementados dentro del entorno de prueba.

Esta fase contempla la definición y ejecución de pruebas orientadas a verificar capacidades relacionadas con monitoreo, generación y correlación de eventos, detección de actividades sospechosas y funcionamiento de los mecanismos de protección incorporados en la arquitectura.

Asimismo, se espera evaluar aspectos asociados con: visibilidad del tráfico de red; generación de alertas de seguridad; funcionamiento de mecanismos IDS/IPS; monitoreo centralizado de eventos; y comportamiento general de los componentes de seguridad integrados dentro de la infraestructura.

La validación permitirá analizar el desempeño operativo de la propuesta arquitectónica frente a escenarios relacionados con amenazas, eventos sospechosos y actividades de monitoreo dentro del entorno cloud.

Finalmente, esta fase proporcionará elementos para identificar oportunidades de mejora, fortalecer la arquitectura propuesta y establecer bases para futuras etapas de maduración, escalabilidad y adopción de mecanismos de seguridad alineados con estándares internacionales.

Debido a que el proyecto se encuentra actualmente en fase de desarrollo e implementación progresiva, el cumplimiento de los objetivos se presenta de manera parcial conforme al avance alcanzado en cada fase metodológica. La Tabla I resume el estado actual de cumplimiento de los objetivos definidos dentro del trabajo.

TABLA I. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Objetivo	Descripción	Estado
Objetivo 1	Identificación de NPO en seguridad cloud.	Completa
Objetivo 2	Caracterización de referentes tecnológicos.	Completa
Objetivo 3	Selección de tecnologías de seguridad.	Completa
Objetivo 4	Diseño de arquitectura de seguridad.	Completa
Objetivo 5	Implementación del prototipo funcional.	En proceso
Objetivo 6	Validación de la arquitectura propuesta.	En proceso

III. Resultados

Debido a que el proyecto se encuentra en fase de desarrollo e implementación progresiva, los resultados presentados se estructuran conforme a las cinco fases metodológicas propuestas. Esto permite distinguir los avances obtenidos, los resultados actualmente en ejecución y los elementos contemplados para etapas posteriores de validación, evidenciando el valor técnico y práctico alcanzado hasta el momento.

A. Resultados de la fase 1: identificación de necesidades, problemas y oportunidades (NPO)

El análisis realizado sobre la infraestructura de seguridad permitió identificar necesidades relacionadas con la alineación de controles y procesos de seguridad con estándares internacionales como ISO/IEC 27001 e ISO/IEC 27017, así como la necesidad de fortalecer la centralización de mecanismos de monitoreo y gestión de seguridad.

Asimismo, se evidenciaron problemáticas asociadas con la baja formalización de controles, adopción limitada de buenas prácticas de seguridad de la información y dispersión de mecanismos de protección dentro de la infraestructura analizada. Estas condiciones representan riesgos potenciales sobre la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los activos de información.

De igual manera, el análisis permitió reconocer oportunidades orientadas al fortalecimiento de la seguridad mediante la incorporación de soluciones de Gestión Unificada de Amenazas (UTM), facilitando la integración de múltiples controles de seguridad dentro de una misma plataforma y mejorando capacidades de monitoreo y administración centralizada.

Los hallazgos obtenidos durante esta fase evidenciaron la necesidad de avanzar hacia una arquitectura de seguridad más integrada y alineada con estándares internacionales, sirviendo como base para las decisiones tecnológicas y arquitectónicas desarrolladas en las fases posteriores del proyecto.

B. Resultados fase 2: estudio de mapeo sistematico

El estudio de mapeo sistemático se desarrolló mediante una estrategia híbrida que combinó búsqueda automática en bases de datos académicas y búsqueda mediante snowballing, permitiendo ampliar la cobertura y trazabilidad de la literatura analizada.

La estrategia de búsqueda se estructuró en cuatro actividades principales: 1) definición de la estrategia de búsqueda; 2) identificación general de estudios; 3) revisión y filtrado de estudios y 4) selección de estudios primarios para el SMS.

La búsqueda automática se ejecutó sobre las bases de datos Web of Science, IEEE Xplore, Springer, ScienceDirect y Taylor & Francis, seleccionadas por su relevancia y cobertura en áreas relacionadas con computación en la nube, ciberseguridad y tecnologías de la información.

Para garantizar la pertinencia de los estudios recuperados, se definieron criterios de inclusión y exclusión, se puede ver en la Tabla II.

TABLA II. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Categoría	Inclusión	Exclusión
Campos	Resumen, titulo y palabras clave	—
Tipo de publicación	Artículos y capítulos ubicados en revistas científicas o académicas y actas de congresos	Informe técnico, actas de congresos y tesis
Área/Disciplina	Administración, Informática, Tecnologías de la Información y Ciberseguridad	Áreas no relacionadas con la gestión, Informática, Tecnologías de la Información y Ciberseguridad.
Período	Entre 2020 to 2026	Menos de 2020
Idioma	Inglés	—

Inicialmente se recuperaron 43,043 estudios preliminares distribuidos entre las diferentes bases de datos consultadas. Posteriormente, mediante la aplicación de filtros asociados con los criterios definidos, el conjunto se redujo a 1,260 publicaciones potencialmente relevantes.

La eliminación de estudios duplicados se realizó mediante la herramienta de gestión bibliográfica Mendeley, obteniendo finalmente un conjunto de 1,257 estudios para el proceso de revisión inicial o screening que se puede ver en la Fig.2.

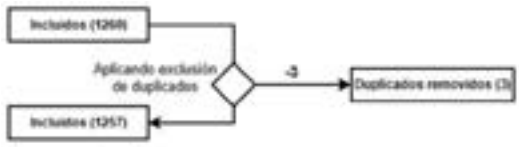


Fig. 2. Eliminación de estudios.

Durante el proceso de screening se revisaron título, resumen y palabras clave de cada publicación, aplicando además métricas de calidad orientadas a evaluar la relevancia y alineación de los estudios con los objetivos de investigación. Entre las métricas utilizadas se incluyeron:

La primera métrica utilizada fue el CVI (*Content Validity Index*), empleada para evaluar el nivel de relación de cada estudio con los objetivos y criterios definidos, como se observa en la ecuación (1):

$$CVI=\frac{\sum_{n=1}^{k} F(n)}{k} \quad (1)$$

donde **k** representa el número de evaluadores y **f(n)** la frecuencia de respuestas obtenidas.

La segunda métrica corresponde al SCI (*Scientific Citation Index*), utilizada para relacionar el número de citaciones con la antigüedad del estudio, como se observa en la ecuación (2):

$$SCI=\frac{C}{A} \quad (2)$$

donde **C** representa el número de citaciones y **A** la antigüedad de publicación.

Finalmente, se utilizó el IRRQ (*Index of Relationship to Research Questions*) para evaluar el nivel de alineación de los estudios con las preguntas de investigación, como se observa en la ecuación (3):

$$IRRQ=\frac{N}{2} \quad (3)$$

donde **N** representa la cantidad de preguntas de investigación abordadas por el estudio.

Como resultado del proceso de selección y evaluación, se consolidó un conjunto de 166 estudios primarios con relación directa al enfoque del trabajo.

Posteriormente, se aplicó la estrategia de búsqueda mediante snowballing sobre la totalidad de los estudios seleccionados. Esta estrategia contempló tanto búsqueda hacia atrás (backward snowballing) como búsqueda hacia adelante (forward snowballing), permitiendo identificar literatura adicional relacionada con el contexto de investigación.

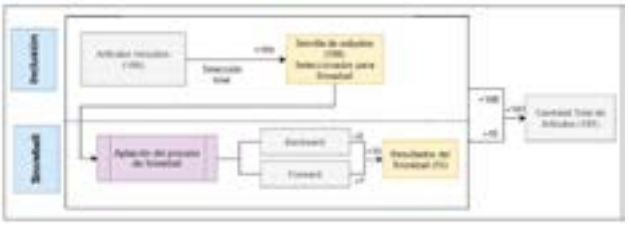


Fig. 3. Resumen del proceso de SMS.

Finalmente, el proceso de snowballing permitió incorporar 15 estudios adicionales, consolidando un total de 181 estudios primarios utilizados como base para el análisis y desarrollo de la propuesta arquitectónica, los detalles del proceso completo se pueden ver en la Fig.3.

Adicionalmente, a partir de los hallazgos obtenidos se construyó una taxonomía orientada a estructurar las relaciones entre enfoques metodológicos, tecnologías y escenarios de aplicación identificados en la literatura analizada. Esta taxonomía permitió organizar de manera conceptual los principales elementos asociados con seguridad en entornos de computación en la nube, ver Fig.4.

La taxonomía se estructuró en tres dimensiones principales: 1) tipo de contribución; 2) enfoque de seguridad y 3) contexto de aplicación.

La dimensión de tipo de contribución agrupó elementos relacionados con computación en la nube, arquitectura, seguridad, taxonomía y controles de seguridad. Por su parte, la dimensión de enfoque de seguridad incluyó mecanismos y conceptos como Zero Trust, SIEM, ciberseguridad, controles de seguridad y estándares ISO/IEC 27001. Finalmente, la dimensión de contexto de aplicación permitió clasificar los principales escenarios identificados dentro de la literatura revisada.

Esta organización facilitó la comprensión estructurada del dominio de estudio y sirvió como apoyo conceptual para la definición de la arquitectura de seguridad propuesta.

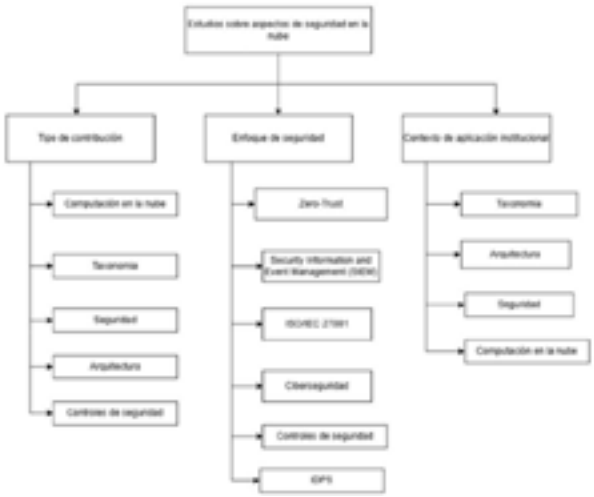


Fig. 4. Taxonomía resultante del proceso de SMS.

C. Resultados fase 3: diseño del prototipo

Para la selección de tecnologías asociadas a Sistemas de Detección y Prevención de Intrusiones (IDPS) y Sistemas de Gestión de Eventos e Información de Seguridad (SIEM), se aplicó la metodología DAR (*Decision Analysis and Resolution*) propuesta por CMMI. Este enfoque permitió realizar un proceso estructurado de evaluación tecnológica considerando las necesidades identificadas previamente en el análisis NPO y los lineamientos asociados con las normas ISO/IEC 27001 e ISO/IEC 27017.

El análisis contempló diferentes alternativas tecnológicas IDPS y SIEM, evaluadas mediante criterios guíados por los controles de las ISO/IEC 27001 y la ISO/IEC 27017.

La evaluación se realizó mediante una escala de valoración de 1 a 5, donde 1 representa un bajo nivel de cumplimiento del criterio evaluado y 5 representa un cumplimiento satisfactorio.

Como resultado del análisis DAR, como se puede ver en la Fig.5, la herramienta Suricata obtuvo la mayor valoración dentro de las tecnologías IDPS evaluadas, mientras que Wazuh presentó el mejor desempeño dentro de las alternativas SIEM analizadas. Estas herramientas fueron seleccionadas debido a su alineación con las necesidades identificadas y su capacidad para complementar los mecanismos de seguridad de la infraestructura propuesta.



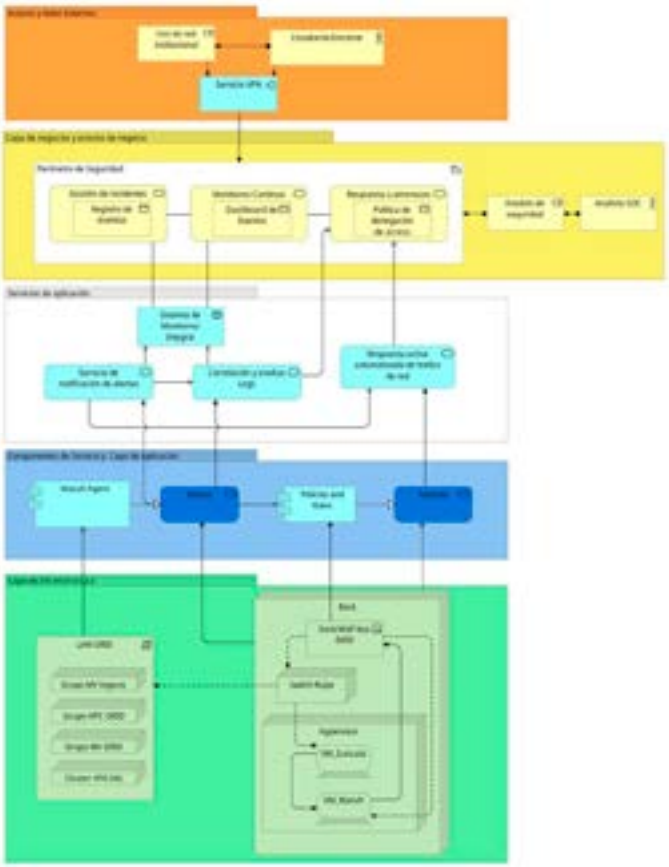
Fig. 5. Resumen del proceso de SMS.

Posteriormente, se desarrolló el diseño de la arquitectura de defensa en profundidad mediante ArchiMate, permitiendo representar de manera estructurada los diferentes componentes y relaciones de la solución propuesta, ver la Fig.6.

Fig. 6. Arquitectura en profundidad realizada en ArchiMate.

La arquitectura fue organizada mediante un enfoque por capas, contemplando elementos asociados con infraestructura, conectividad, protocolos de comunicación, monitoreo, almacenamiento de registros, aplicaciones de seguridad y procesos de gestión. Asimismo, se incorporó una capa de interacción externa orientada a proporcionar una visión integral de la trazabilidad operativa de la arquitectura.

El diseño arquitectónico permitió establecer una representación integral de los mecanismos de protección, monitoreo y gestión de seguridad considerados dentro de la propuesta, sirviendo como base para la implementación progresiva del prototipo funcional.



D. Resultados fase 4: Implementación del prototipo

Actualmente, el proyecto se encuentra en fase de implementación progresiva del prototipo funcional de la arquitectura de seguridad propuesta. Esta etapa contempla la integración de los componentes seleccionados durante el análisis DAR dentro de un entorno controlado asociado a la infraestructura del grupo GRID.

La implementación considera mecanismos de seguridad perimetral, monitoreo centralizado, correlación de eventos y detección de intrusiones mediante la integración de herramientas como Suricata y Wazuh.

Como componente principal de protección perimetral, se contempla el uso de un dispositivo Unified Threat Management (UTM) SonicWall NSa 6600, orientado a centralizar múltiples mecanismos de seguridad dentro de una misma plataforma. Este dispositivo proporciona capacidades asociadas con: 1) inspección profunda de paquetes; 2) filtrado de tráfico; 3) gestión de VPN; 4) control de acceso; 5) prevención de intrusiones y 6) monitoreo de eventos de seguridad, sin embargo, algunos mecanismos de seguridad integrados en el requieren de licenciamiento, es por ello que se requiere complementarlo con herramientas como los son el IDPS Suricata y el SIEM Wazuh, con el fin de potencializar la capacidad de respuesta.

La Tabla III presenta una síntesis técnica del dispositivo considerado dentro de la propuesta arquitectónica.

TABLA III. SÍNTESIS TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN

Característica	Descripción
Dispositivo	SonicWall NSa 6600
Tipo	Unified Threat Management (UTM)
Funciones principales	Firewall, IDS/IPS, VPN, filtrado y monitoreo
Uso dentro de la arquitectura	Protección perimetral
Integración propuesta	Wazuh y Suricata
Contexto de despliegue	Infraestructura cloud del entorno GRID

E. Validación del prototipo

La fase de validación se orientará a evaluar el comportamiento operativo de la arquitectura propuesta mediante pruebas relacionadas con monitoreo, detección de eventos, generación de alertas y funcionamiento de mecanismos de protección implementados dentro del entorno de prueba.

Entre los aspectos a validar se contemplan: 1) comportamiento de mecanismos IDS/IPS; 2) monitoreo centralizado de eventos; 3) visibilidad del tráfico de red; 4) correlación de alertas y 5) capacidad de respuesta frente a eventos sospechosos.

Como trabajo futuro, se proyecta ampliar los procesos de validación mediante escenarios de prueba más robustos, integración de nuevos controles de seguridad y evaluación de desempeño bajo diferentes condiciones operativas.

Asimismo, se espera fortalecer la alineación de la arquitectura con estándares internacionales de seguridad de la información y explorar su posible adaptación en otros entornos institucionales y organizacionales que requieran mecanismos centralizados de protección y monitoreo en infraestructuras de computación en la nube.

IV. Conclusiones

El presente trabajo permitió identificar necesidades, problemáticas y oportunidades relacionadas con la seguridad en entornos de computación en la nube, evidenciando la importancia de adoptar mecanismos de monitoreo, protección y gestión alineados con estándares internacionales de seguridad de la información.

A través del estudio de mapeo sistemático se logró consolidar una base científica y tecnológica orientada a identificar enfoques, herramientas y mecanismos utilizados en arquitecturas de seguridad cloud. Asimismo, la aplicación del proceso DAR permitió realizar una selección estructurada de tecnologías IDPS y SIEM acordes con las necesidades identificadas dentro del contexto de estudio.

Como resultado, se definió una arquitectura de defensa en profundidad basada en mecanismos de monitoreo, correlación de eventos, detección de intrusiones y protección perimetral, representada mediante ArchiMate y orientada a complementar

la infraestructura existente sin afectar la operación actual de los servicios.

Finalmente, aunque el proyecto se encuentra en fase de implementación y validación progresiva, la propuesta desarrollada establece una base técnica y conceptual que puede ser adaptada no solo a contextos académicos, sino también a organizaciones que requieran fortalecer sus capacidades de ciberseguridad y avanzar hacia modelos de seguridad alineados con buenas prácticas y estándares internacionales.

REFERENCES

[1] P. Mell and T. Grance, The NIST Definition of Cloud Computing, NIST Special Publication 800-145, National Institute of Standards and Technology, 2011. [Online]. Available: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf.

[2] European Network and Information Security Agency (ENISA), Cloud Computing Risk Assessment. ENISA, 2009. [Online]. Available: https://www.enisa.europa.eu/publications/cloud-computing-risk-assessment.

[3] H. S. Lallie, A. Thompson, E. Titis, and P. Stephens, "Analysing Cyber Attacks and Cyber Security Vulnerabilities in the University Sector," Computers, vol. 14, no. 2, p. 49, 2025, doi: 10.3390/computers14020049.

[4] EDUCAUSE, "8 Considerations When Establishing Cybersecurity in Higher Education," EDUCAUSE Review, Oct. 30, 2023. [Online]. Available: https://er.educause.edu/articles/sponsored/2023/10/8-considerations-when-establishing-cybersecurity-in-higher-education .

[5] M. Salama, R. Bahsoon, and N. Bencomo, "Managing Trade-offs in Self-Adaptive Software Architectures: A Systematic Mapping Study," in Managing Trade-Offs in Adaptable Software Architectures, I. Mistrik, N. Ali, R. Kazman, J. Grundy, and B. Schmerl, Eds. Boston, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2017, pp. 249–297, doi: 10.1016/B978-0-12-802855-1.00011-3.

[6] ISO, ISO/IEC 27001:2022, 2022. [Online]. Available: https://www.iso.org/es/norma/27001 .

[7] ISO, ISO/IEC 27017:2015, 2015. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/43757.html

[8] ISO, ISO/IEC 27018:2025, 2025. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/27018

[9] G. Aydin, "A Study of Cloud Computing Adoption in Universities as a Guideline to Cloud Migration," International Journal of Cloud Applications and Computing, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.4018/IJCAC.2021010101 .

[10] G. Juve, B. Tovar, R. F. Da Silva, D. Krol, D. Thain, E. Deelman, W. Allcock, and M. Livny, "Practical Resource Monitoring for Robust High Throughput Computing," in Proc. IEEE Int. Conf. on Cluster Computing, 2015, pp. 650–657, doi: 10.1109/CLUSTER.2015.115.

[11] B. Kitchenham, R. Pretorius, D. Budgen, O. P. Brereton, M. Turner, M. Niazi, and S. Linkman, "Systematic Literature Reviews in Software Engineering: A Tertiary Study," Information and Software Technology, vol. 52, no. 8, pp. 792–805, 2010, doi: 10.1016/j.infsof.2010.03.006.

[12] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, and M. Mattsson, "Systematic Mapping Studies in Software Engineering," in Proc. 12th Int. Conf. on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE), 2008, pp. 68–77.

[13] C. Wohlin, "Guidelines for Snowballing in Systematic Literature Studies and a Replication in Software Engineering," in Proc. 18th Int. Conf. on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE),

New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2014, Art. no. 38, doi: 10.1145/2601248.2601268.

Diseño y análisis estructural de un chasis tipo Formula SAE

1st Valentina Garzón Peña
Ingeniería industrial
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
va.garzon@javeriana.edu.co

2nd Nicolas Vera Hernandez
Ingeniería Mecatrónica
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
n_vera@javeriana.edu.co

3rd Natalia Amado Díaz
Ingeniería Mecánica
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
amado_n@javeriana.edu.co

4th Juan Sebastián Rubio
Ingeniería Mecatrónica
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
js_rubio@javeriana.edu.co

5th Yezid Andrés Guzmán Periñan
Ingeniería Mecatrónica
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
yaguzman@javeriana.edu.co

6th Grecia Isabela Zúñiga
Ingeniería Mecánica
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
Gi_zunigal@javeriana.edu.co

***Resumen*— El presente proyecto aborda el diseño conceptual y análisis estructural de un chasis para vehículo tipo Formula SAE, integrando fundamentos de ingeniería mecánica, ciencia de materiales, manufactura y normatividad técnica. A partir de una revisión bibliográfica especializada realizada por el equipo de trabajo, se identificó que los chasis tubulares tipo space frame continúan representando una solución óptima en este tipo de aplicaciones debido a su facilidad de fabricación, bajo costo relativo y adecuado desempeño estructural cuando son diseñados bajo criterios técnicos rigurosos.**

Los estudios analizados permitieron reconocer la relevancia de parámetros críticos como su resistencia a la flexión, la distribución eficiente de cargas y el diseño apropiado de uniones estructurales, particularmente en sistemas soldados donde pueden generarse concentraciones de esfuerzos y fenómenos de fatiga. Asimismo, se determinó que la selección de materiales constituye un factor determinante en el proceso de diseño, destacándose el acero AISI 1020 por su balance entre propiedades mecánicas, disponibilidad comercial y manufacturabilidad.

Adicionalmente, el cumplimiento de la reglamentación establecida por la competencia Formula SAE se consideró como un criterio fundamental que orienta el desarrollo del diseño desde sus etapas iniciales. Como parte del proceso metodológico, se contempla la caracterización experimental del material mediante ensayos de laboratorio para comprender su comportamiento mecánico y validar su aplicabilidad dentro del diseño estructural propuesto. Este trabajo tiene como objetivo evidenciar la capacidad técnica, analítica y colaborativa de estudiantes de ingeniería en la resolución de desafíos de diseño aplicados a contextos reales de ingeniería automotriz.

Palabras Clave —Formula SAE, diseño estructural, chasis, acero AISI 1020, análisis de elementos finitos, rigidez torsional, space frame

I. Introducción

El diseño del chasis en vehículos tipo Formula SAE ha sido un tema ampliamente abordado en la literatura debido a su influencia directa en la seguridad del piloto, el comportamiento dinámico del vehículo y la eficiencia estructural. La competencia Formula SAE representa un escenario académico en el que estudiantes universitarios diseñan, construyen y validan un prototipo tipo monoplaza, aplicando principios de ingeniería automotriz.

El chasis es uno de los componentes más críticos del vehículo, ya que define la geometría, la seguridad estructural y la distribución de cargas del sistema completo. El diseño estructural del chasis debe cumplir con dos propósitos fundamentales: garantizar un habitáculo con los más altos estándares de seguridad para el piloto y proporcionar una base excepcionalmente rígida para el correcto funcionamiento de cada uno de los subsistemas de suspensión, dirección y tracción.

El presente trabajo corresponde específicamente al desarrollo estructural del chasis dentro de un proyecto Formula SAE de carácter multidisciplinario, el cual integra simultáneamente áreas de suspensión, aerodinámica, manufactura, electrónica, potencia y gestión organizacional desarrolladas por diferentes departamentos del semillero Scuderia Xaverian de la Pontificia Universidad Javeriana.

El objetivo de este trabajo es presentar el proceso de diseño y desarrollo de un chasis que cumpla con las normativas internacionales de la Formula SAE, priorizando tres dimensiones fundamentales: la seguridad estructural del piloto en condiciones de impacto y vuelco, la rigidez torsional suficiente para garantizar comportamiento predecible de la suspensión, y la reducción de peso sin comprometer la integridad estructural. El enfoque integral combina modelado en

software CAD, simulación estructural mediante análisis por elementos finitos (FEA), selección de materiales, diseño de uniones y criterios de fabricabilidad.

II. Estado del Arte

A. Estructuras Space frame

El equipo ha considerado el uso de estructuras tipo space frame, ya que representan una de las soluciones más utilizadas en Formula SAE. Un space frame es un chasis conformado por un conjunto de tubos interconectados que forman una estructura tridimensional, donde las cargas se transmiten principalmente a través de esfuerzos axiales (tracción y compresión) en los elementos. La clave de este tipo de diseño está en la triangulación estructural, que consiste en disponer los tubos de manera que se formen triángulos, evitando así deformaciones por flexión y aumentando la rigidez global, especialmente la rigidez torsional.

En el trabajo de Lee y Lee [1], se desarrolla un chasis tubular optimizado mediante análisis por elementos finitos, mostrando cómo la correcta distribución de los elementos estructurales permite mejorar significativamente el comportamiento frente a cargas de torsión. Armstead [2] desarrolló un estudio completo sobre diseño, modelado y construcción de un chasis para Fórmula SAE, empleando Pro-Engineer para el modelado y ANSYS para los análisis estructurales, enfocándose en rigidez torsional, reducción de peso y ergonomía del piloto.

B. Análisis estructural y casos de carga

En el trabajo de Bhandari et al. [3], se analiza el diseño de un chasis tubular utilizando herramientas CAD y simulaciones estructurales, evaluando variables como deformaciones, esfuerzos equivalentes de von Mises y factor de seguridad. Kumar et al. [4] presentan un análisis detallado de las principales cargas que actúan sobre el chasis, incluyendo torsión asociada a la dinámica del vehículo en curvas, así como impacto frontal y lateral. Riley y George [5] introducen conceptos clave de diseño de chasis, definiendo los casos de carga, desarrollando un modelo de resortes para estimar rigidez objetivo y técnicas experimentales para verificar la rigidez del chasis fabricado.

C. Selección de materiales

En el trabajo de Karim et al. [6], se describe el acero AISI 1020 como un material ampliamente utilizado debido a su alta ductilidad, buena conformabilidad y facilidad de manufactura. Estas propiedades se deben a su bajo contenido de carbono (aproximadamente 0.17-0.23%), lo que le permite presentar excelente soldabilidad y reducir el riesgo de fallas durante procesos de fabricación. El acero AISI 1020 es reconocido por ser un material de fácil acceso en el mercado y de bajo costo.

D. Diseño de uniones y soldadura

Falana et al. [7] analizan cómo el tipo de unión y el proceso de soldadura influyen directamente en el comportamiento mecánico del material en aceros de bajo carbono. Se comparan diferentes configuraciones de junta, evidenciando que la geometría de la unión tiene un impacto significativo en la distribución de esfuerzos. Hobbacher [8] analiza el comportamiento a fatiga en estructuras tubulares soldadas, mostrando que la vida a fatiga depende significativamente de factores como la geometría de la unión, la calidad de la soldadura y el acabado superficial.

III. Reglamento y Marco Normativo

El reglamento FSAE, publicado anualmente por la Society of Automotive Engineers (SAE) [9], establece los requisitos mínimos de seguridad, geometría, materiales y fabricación que los equipos deben cumplir obligatoriamente para ser admitidos en la competición.

A. Principios normativos aplicados al chasis

Los requisitos principales incluyen: (1) Celda de seguridad del piloto: Main Hoop, Front Hoop y refuerzos laterales. (2) Dimensiones mínimas de tubos: miembros principales con diámetro exterior mínimo 25.4 mm y espesor mínimo 2.0 mm en acero al carbono. (3) Rigidez y resistencia a cargas: el chasis debe soportar sin deformaciones excesivas cargas equivalentes a impacto frontal, lateral, trasero y vuelco. (4) Integración con subsistemas: puntos de anclaje mínimos para suspensión, dirección, cinturones y asiento. (5) Manufactura y soldadura: todas las uniones estructurales mediante soldadura de alta resistencia. (6) Protección vuelco e impactos: la altura del Main Hoop debe superar en al menos 50 mm la cabeza del piloto más alto. (7) Evacuación del piloto: en menos de 5 segundos.

TABLE I. Secciones clave del Reglamento FSAE

Normas aplicadas		
Aplica a:	***Sección***	***Tema***
Materiales y dimensiones	F.3 / T.2	Normas de diseño del bastidor
Arcos de seguridad	F.6	Arco Principal y Arco Frontal
Triangulación obligatoria	F.7	Refuerzo del Arco
Cabina, plantilla Percy	T.3	Célula del piloto

B. Requisitos de material

La normativa establece que el material del chasis debe ser tubería de acero no aleada con un contenido máximo de 0.3% de carbono, 1.7% manganeso y 0.6% de cualquier otro elemento. Las propiedades del acero utilizadas para los cálculos son: Módulo de Young (E) = 200 GPa, límite elástico (Sy) = 305 MPa para material no soldado y 180 MPa para juntas soldadas, límite de rotura (Su) = 365 MPa para material no soldado y 300 MPa para juntas soldadas.

IV. Selección de Materiales

A. Relevancia del material

El material del chasis se entiende como uno de los factores más importantes en el diseño del monoplaza. No solo define la resistencia estructural, sino que también influye directamente en el peso, la seguridad del piloto y el desempeño del vehículo. Un material correctamente seleccionado permite lograr un equilibrio entre rigidez, resistencia y ligereza. La rigidez torsional es la capacidad del chasis para resistir deformaciones cuando se le aplica un par torsor. Un chasis con buena rigidez torsional transmite mejor las fuerzas de la suspensión, mejora el agarre y permite un control más preciso.

B. Comparación de materiales

Para la selección formal de material se evaluaron diferentes tipos de aceros al carbono. El acero 1010 es utilizado comúnmente para láminas de electrodomésticos y estructuras livianas. El acero 1017 contiene mayor carbono (0.14-0.20%), con aplicaciones en ejes de maquinaria ligera y pernos. El acero 1020 presenta carbono (0.17-0.23%), utilizado para estructuras metálicas, chasis de maquinaria y partes de automóviles que requieren mayor resistencia.

TABLE II. PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACEROS

Material	*Su (MPa)*	*Sy (MPa)*	*E (GPa)*
Acero 1010	365	305	190-210
Acero 1017	405	340	190-210
Acero 1020	420-450	350	200-215
Acero 4130	560	435	205

C. Material seleccionado

El material seleccionado para la fabricación principal del chasis es el acero AISI 1020. La decisión se tomó considerando factores mecánicos, de manufactura y disponibilidad. El acero 1020 cumple con los requisitos mínimos establecidos por la normativa para estructuras tubulares de Formula SAE. Para juntas y uniones se propone el uso de acero 1017 debido a su balance entre resistencia mecánica, ductilidad y facilidad de mecanizado.

D. Proceso de soldadura

La soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) fue seleccionada para realizar uniones entre los extremos del acero por su alta precisión y resistencia. Este proceso utiliza un electrodo de tungsteno que no se consume y un gas inerte de protección (argón o helio). Los parámetros recomendados incluyen metal de aporte ER70S-2, gas de protección argón puro 99.99% con caudal 8-12 L/min, sin precalentamiento para espesores menores a 3 mm.

V. METODOLOGÍA DE DISEÑO

A. Proceso de diseño secuencial

La metodología aplicada se desarrolló de manera secuencial: (1) Revisión bibliográfica y normativa. (2) Selección del tipo de estructura space frame tubular en acero con geometría triangulada. (3) Definición de materiales y dimensiones con tubos Schedule 10/40 equivalentes. (4) Diseño geométrico CAD mediante modelado 3D en SolidWorks. (5) Simplificación para fabricación con nudos directos y cortes rectos. (6) Validación conceptual mediante análisis FEA y pruebas físicas de tubería.

B. Definición ergonómica del piloto

Antes de diseñar cualquier tubo, se define el espacio del piloto usando la plantilla Percy del reglamento. Todo el chasis se construye alrededor de este volumen. El procedimiento incluye: identificar al piloto de mayor tamaño, definir la posición del asiento y el ángulo de reclinación típicamente entre 20° y 30°, ubicar pies, caderas, hombros y cabeza que determinan la posición del Front Hoop y el Main Hoop, verificar que el Main Hoop supere en al menos 50 mm la cima del casco, y garantizar evacuación en menos de 5 segundos.

TABLE III. COTAS GENERALES DEL VEHÍCULO

Parámetro	*Rango típico*	*Impacto*
Wheelbase	1500-1700 mm	Longitud spaceframe
Track delantero	1100-1300 mm	Ancho zona frontal
Peso del chasis	25-40 kg	Optimización material

C. Zonas estructurales del chasis

El chasis FSAE se divide en zonas funcionales. La Survival Cell rodea y protege al piloto, comprendiendo desde el Front Hoop hasta el Main Hoop. Contiene el Main Hoop, el Front Hoop, la Side Impact Structure (SIS) y el Under Tray. Debe resistir cargas de impacto lateral, frontal y vuelco sin colapsar hacia el piloto. El Front Bulkhead es la estructura frontal, con el Impact Attenuator montado delante como zona de deformación programada.

El Main Hoop es el arco principal de seguridad ubicado detrás de la cabeza del piloto. Es el elemento de mayor carga en caso de vuelco. Debe ser un tubo continuo sin juntas en la zona curva, con un ángulo máximo respecto a la vertical de 10°, y requiere bracing (triangulación) hacia la parte trasera del chasis con ángulo mínimo de 30°. La zona trasera Powertrain Bay aloja motor, transmisión y diferencial.

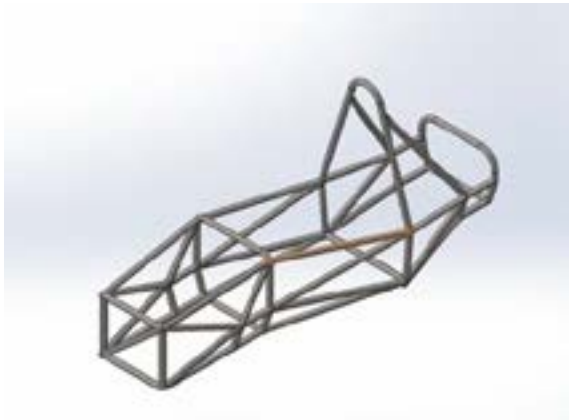


Fig. 1. *Estructura completa del chasis tubular tipo space frame diseñado en SolidWorks*

D. Principios de triangulación

La triangulación es el principio estructural fundamental del spaceframe. Sin triángulos, los tubos trabajan en flexión en lugar de en modo axial puro, reduciendo drásticamente la rigidez. Cada panel del chasis debe estar dividido en triángulos para que los tubos trabajen en compresión o tracción, nunca en flexión. Los anclajes de suspensión y motor deben coincidir con nodos para garantizar transmisión axial de cargas.

E. Restricciones de diseño y optimización de masa

Uno de los principales desafíos identificados durante el desarrollo del proyecto corresponde a la optimización del peso total del chasis. Las primeras estimaciones del modelo estructural indican un rango de masa aproximado entre 75 kg

para la configuración inicial y hasta 95 kg considerando futuras mejoras estructurales y refuerzos actualmente en evaluación. Esta variación refleja el principal trade-off de diseño presente en el proyecto: el aumento de rigidez y seguridad estructural suele implicar un incremento de masa, afectando potencialmente el desempeño dinámico del vehículo. Las estimaciones actuales de masa corresponden al ensamblaje estructural preliminar completo incluyendo refuerzos adicionales, elementos temporales de validación y configuraciones aún no optimizadas.

Como parte del enfoque interdisciplinario del semillero, los diferentes departamentos del equipo trabajan de manera conjunta en estrategias de reducción de peso, selección de materiales y optimización geométrica, buscando alcanzar un equilibrio adecuado entre seguridad, manufacturabilidad y desempeño estructural. El diseño actual contempla el uso aproximado de 29 a 32 tubos estructurales principales, cuya distribución geométrica continúa siendo optimizada mediante análisis estructurales iterativos y criterios de fabricabilidad.

VI. Diseño de Uniones Estructurales

A. Insertos soldados

Según las normativas F.3.4.3 y F.5.12 del Structural Equivalency Spreadsheet, las uniones atornilladas presentan un punto crítico de concentración de esfuerzos. Al aplicar el torque de apriete necesario, las paredes de los tubos huecos quedan expuestas a fuerzas de compresión extremas que pueden propiciar su deformación plástica o colapso local.

Para mitigar este riesgo, se diseñaron insertos cilíndricos sólidos que se alojan concéntricamente en el diámetro interior de los tubos principales. La utilidad mecánica de este inserto es distribuir los esfuerzos de compresión a lo largo de la sección transversal sólida. Los insertos modelados cuentan con un área transversal de 265.49 mm² y un momento de inercia de 24408.87 mm⁴.



Fig. 2. *Perspectiva del tubo estructural que aloja el inserto sólido en su interior*

B. Conexiones atornilladas

Se diseñaron conexiones atornilladas principales del chasis en cumplimiento con los requerimientos de la sección F.5.12. El ensamblaje completo consiste en el soporte externo, el tubo hueco principal, el inserto soldado en su interior y los tornillos pasantes. Esta configuración garantiza que la fuerza de compresión ejercida por el tornillo sea absorbida enteramente por el inserto.

Las platinas de soporte se componen de platinas paralelas diseñadas simétricamente en acero SAE 1020, ajustadas al diámetro exterior del tubo principal. Este ensamble simétrico evita presiones que puedan deformar el tubo y garantiza una alta rigidez local en todo el nodo.



Fig. 3. *Ubicación del nodo estructural en el chasis tubular con unión atornillada*

C. Tipos de anclaje

Los puntos de anclaje de la suspensión son los nodos más críticos del chasis. Los tipos incluyen: nodo soldado directo donde el tubo de suspensión se suelda directamente al nodo del chasis, bracket con rodamiento con placa soldada con agujero para pasador y rodamiento esférico, insert roscado soldado para perno de anclaje del amortiguador, y gusset plate como placa de refuerzo en el nodo para distribuir la carga del anclaje.

VII. Análisis Estructural

A. Definición de casos de carga

El equipo realizó un análisis preliminar de la estructura mediante criterios de carga básicos para comprobar que el diseño cumple con las deformaciones admisibles de la normativa. Los casos de carga definidos se fundamentan en el trabajo de referencia de Riley y George (2002) [5].

TABLE IV. Casos De Carga Para Análisis Fea

Caso de carga	***Factor***	***Descripción***
Torsión pura	—	Diagonal suspensión levantada
Frenada	1.5g	Transferencia eje delantero
Aceleración	1.0g	Par motor desde anclajes
Flexión lateral	1.5g	Curva alta velocidad
Impacto frontal	3.0g	Crash - 7 kN estáticos
Vuelco	Regl.	Carga Main Hoop y Front Hoop

B. Proceso de análisis FEA

El proceso recomendado consiste en: (1) Importar la geometría CAD al solver FEA. (2) Modelar los tubos como elementos BEAM para reducir el tiempo de cómputo con suficiente precisión. (3) Asignar propiedades de sección transversal. (4) Asignar propiedades del material (E = 200-205 GPa, ν = 0.29, Fy = 250-435 MPa). (5) Aplicar condiciones de contorno para cada caso de carga. (6) Verificar que las tensiones

máximas sean menores que Fy / FS con factor de seguridad ⩾ 1.5. (7) Calcular la rigidez torsional como Kt = T / θ en Nm/°.

C. *Ensayo de torsión en FEA*

El ensayo de torsión es el más importante para cualquier chasis FSAE. El procedimiento estándar consiste en: (1) Restringir los 4 puntos de suspensión trasera. (2) Aplicar fuerza vertical +F en el punto delantero derecho. (3) Aplicar fuerza vertical -F en el punto delantero izquierdo. (4) Calcular el torque aplicado. (5) Medir el desplazamiento vertical. (6) Calcular el ángulo de torsión. (7) Obtener la rigidez torsional como Kt = T / θ en Nm/°.

TABLE V. VALORES DE REFERENCIA DE RIGIDEZ TORSIONAL

Kt (Nm/°)	***Clasificación***	***Acción***
< 800	Insuficiente	Rediseñar triangulación
800-1200	Aceptable	Optimizar peso
1200-2000	Bueno	Proceder a fabricación
> 2000	Excelente	Verificar masa innecesaria

D. *Resultados preliminares del análisis FEA*

Como parte del proceso de validación estructural, el equipo desarrolló un análisis preliminar mediante elementos finitos sobre la geometría inicial del chasis tubular. Los resultados obtenidos permitieron identificar zonas críticas de concentración de esfuerzos, principalmente en nodos estructurales asociados a anclajes de suspensión y uniones sometidas a cargas torsionales.

El análisis preliminar evidenció que la geometría base presenta un comportamiento estructural adecuado bajo los casos de carga iniciales definidos para torsión y flexión lateral. Sin embargo, también permitió reconocer oportunidades de mejora relacionadas con la optimización de masa estructural, la distribución de cargas en algunos nodos y el diseño de ciertas uniones soldadas.

Actualmente, el modelo estructural se encuentra en proceso de iteración y mejora por parte del equipo de trabajo. Como resultado de este proceso, se contempla la incorporación de nuevas configuraciones geométricas, incluyendo modificaciones en las uniones mediante doblado de tubos estructurales, con el objetivo de reducir masa, mejorar continuidad estructural y disminuir concentraciones de esfuerzos. Estas propuestas se encuentran en evaluación tanto desde el punto de vista estructural como de compatibilidad con el reglamento Formula SAE. Debido a que el diseño continúa en etapa de optimización, los análisis FEA serán actualizados posteriormente para validar las mejoras implementadas y comparar el desempeño estructural entre las diferentes iteraciones del chasis.

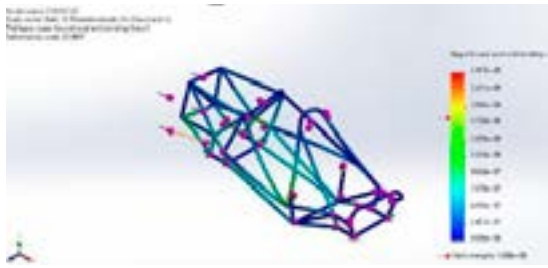


Fig. 4. *Resultados preliminares FEA*

E. *Validación experimental*

El equipo complementó el análisis FEA con pruebas físicas en laboratorio sobre las tuberías de acero. Los ensayos recomendados incluyen: ensayo de tracción para obtener los valores reales de Fy, Fu y módulo E, ensayo de flexión en 3 puntos para verificar la rigidez de la sección transversal, y medición de espesor real con ultrasonido o micrómetro. Una vez fabricado el chasis, se validará la rigidez torsional medida contra el valor FEA, siendo aceptable una diferencia ⩽ 15%.

VIII. FABRICACIÓN Y MANUFACTURA

A. *Criterios de fabricación*

El equipo priorizó criterios de diseño orientados a la fabricación: (1) Nudos directos evitando ángulos muy agudos. (2) Uniones claras donde cada tubo tiene un destino geométrico definido. (3) Cortes rectos o de fácil copado evitando copados compuestos que requieren maquinado CNC. (4) Mínimo número de uniones, dado que a mayor cantidad de soldaduras corresponden mayor variabilidad estructural y mayor peso.

B. *Secuencia de fabricación*

El proceso de fabricación recomendado: (1) Construir el jig de soldadura sobre mesa plana con todos los nodos referenciados. (2) Cortar todos los tubos según el modelo CAD. (3) Realizar un dry fit completo en el jig sin soldar. (4) Puntear (tack weld) la estructura completa. (5) Verificar la geometría con calibres antes de la soldadura final. (6) Soldar en secuencia cruzada para minimizar la distorsión térmica. (7) Dejar enfriar lentamente. (8) Verificar la geometría final contra el modelo CAD con tolerancias ⩽ 2 mm.

C. *Inspección técnica*

El chasis pasa por una inspección técnica estricta antes de competir. Es necesario preparar: los certificados de material (Mill Certificates) de todos los tubos estructurales, la documentación del Impact Attenuator con cálculos o resultados del crush test, la ficha técnica del chasis con dimensiones, materiales y pesos, soldaduras visibles y accesibles para inspección visual del juez, y la demostración de evacuación del piloto en menos de 5 segundos.

IX. APRENDIZAJE EXPERIMENTAL E ITERACIÓN

El desarrollo del proyecto ha representado un proceso de aprendizaje autónomo y colaborativo para los estudiantes integrantes del semillero Scuderia Xaverian, acompañado por orientación técnica de profesores de la Pontificia Universidad Javeriana.

Como parte de las etapas iniciales de validación conceptual y divulgación del proyecto, el equipo construyó un primer prototipo de chasis utilizando tubería PVC, permitiendo evaluar aspectos geométricos, ergonómicos y de ensamblaje a escala real. Este ejercicio práctico involucró la participación conjunta de diferentes áreas del semillero y facilitó la identificación temprana de múltiples aspectos estructurales y de manufactura susceptibles de mejora.

Los resultados obtenidos durante esta etapa motivaron el replanteamiento parcial del diseño CAD original y el inicio de una nueva fase de optimización estructural, incluyendo futuras iteraciones de análisis FEA y revisión de nodos críticos. Esta metodología iterativa ha permitido fortalecer el proceso de toma de decisiones ingenieriles dentro del equipo, evidenciando cómo el aprendizaje práctico y la experimentación progresiva constituyen elementos fundamentales en proyectos de ingeniería estudiantil.

X. Conclusiones y Discusión

El diseño de un chasis tubular tipo spaceframe para Formula SAE constituye un proceso multidisciplinar que integra normativa internacional, selección de materiales, modelado CAD, simulación estructural y fabricación en taller. La metodología presentada demuestra que es posible abordar un primer prototipo competitivo con materiales de bajo costo y herramientas de software de acceso académico.

La selección del acero AISI 1020 para la estructura principal y acero 1017 para uniones permite un equilibrio adecuado entre resistencia estructural, facilidad de soldadura y comportamiento durante procesos de validación experimental. La implementación de insertos sólidos previene eficazmente el colapso de los tubos estructurales ante las cargas de compresión por torque de apriete, satisfaciendo los requerimientos técnicos de las secciones F.3.4.3 y F.5.12 del Structural Equivalency Spreadsheet.

Los resultados preliminares del análisis FEA indican un comportamiento estructural favorable, aunque evidencian oportunidades de mejora en términos de optimización de masa y distribución de cargas. La rigidez torsional constituye el indicador de desempeño estructural más relevante para el chasis FSAE, y su optimización mediante triangulación adecuada impacta directamente en el comportamiento dinámico del vehículo.

Actualmente, el proyecto se encuentra en una etapa intermedia de desarrollo debido a limitaciones presupuestales asociadas a procesos de manufactura, adquisición de materiales y validación experimental avanzada. No obstante, el equipo continúa trabajando de manera coordinada con áreas administrativas y académicas de la universidad para gestionar recursos que permitan avanzar hacia la fabricación definitiva y validación física del prototipo.

A pesar de estas limitaciones, el proyecto ha logrado consolidar una metodología de diseño estructural, análisis y trabajo interdisciplinario que servirá como base para futuras iteraciones del vehículo Formula SAE desarrollado por el semillero. La experiencia acumulada sienta las bases metodológicas para iteraciones futuras con materiales de mayor desempeño (acero AISI 4130 Chromoly) y geometrías optimizadas topológicamente.

Este trabajo evidencia la capacidad técnica, analítica y colaborativa de estudiantes de ingeniería en la resolución de desafíos de diseño aplicados a contextos reales de ingeniería automotriz, integrando fundamentos teóricos con aplicaciones prácticas bajo restricciones normativas estrictas y limitaciones presupuestales propias de proyectos estudiantiles.

Referencias

[1] W. H. Lee y J. J. Lee, "Space Frame Design for Formula SAE," SAE Technical Paper 2009-32-0092, 2009.

[2] J. K. Armstead, "Chassis development for the formula SAE racer," Bachelor of Mechanical Engineering Dissertation, University of Southern Queensland, 2006.

[3] V. B. Bhandari et al., "Design and Analysis of Spaceframe Chassis for FSAE Vehicle," International Journal of Engineering Research & Technology, 2020.

[4] A. Kumar et al., "Numerical Analysis on Space Frame Chassis of a Formula SAE Car," Materials Today: Proceedings, 2022.

[5] W. B. Riley y A. R. George, "Design, analysis and testing of a formula SAE car chassis," SAE Technical Paper 2002-01-3300, 2002.

[6] A. Karim et al., "Microstructure and Mechanical Properties of Pack Carburized AISI 1020 Steel," Journal of Renewable Energy & Mechanics, vol. 5, no. 2, 2022.

[7] S. O. Falana et al., "Microstructure and Mechanical Characteristics of Welded AISI 1020 Low Carbon Steel," Journal of Science and Technology, vol. 17, no. 1, 2025.

[8] A. Hobbacher, "Fatigue Design of Welded Joints and Components," IIW, Springer, 2016.

[9] SAE International, "Formula SAE Rules 2026," Warrendale, PA, 2025.

[10] A. Estruch y M. Pons, "Vehículo de competición fórmula SAE: Diseño y optimización del chasis," Valencia, 2016.

[11] F. J. S. Suárez, "The engineering design of a formula SAE racing car," Master Thesis, University of Texas at Austin, 2018.

[12] SAE International, "Structural Equivalency Spreadsheet (SES) v2026," FSAE Online, 2025.

[13] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, Shigley's Mechanical Engineering Design, 11th ed. McGraw-Hill, 2020.

[14] F. Cagigas Quintana, "Diseño chasis tubular de un vehículo para la Fórmula Student edición 2023," Universidad de Cantabria, 2023.

Design of a serious game for education in circular economy applied to construction and demolition waste (CDW) management

Laura Urrego Montoya
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia
laurrego@unal.edu.co

Miguel David Rojas Lopez
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia
mdrojas@unal.edu.co

***Abstract*— This proposal aims to design the serious game *"Descombrarte"*, which addresses the challenge of managing construction and demolition waste (CDW) commonly known as debris, within a circular economy framework. The proposal is conceived as a teaching-learning tool intended to facilitate the understanding of sustainable practices in the construction industry**

First, a conceptual review of concepts regarding circular economy, waste management and serious games as a pedagogical tool is conducted. Subsequently to that phase, the game *"Descombrarte" which* simulates different scenarios where the players assume different professional roles inside a construction company, having to make decisions as a team with different perspectives, having to consider as top priorities the feasibility and sustainability of the options displayed in all the presented scenarios.

Lastly, a validation phase is proposed, in which the results obtained from the pilot implementation of the game in different classroom settings are analyzed and the findings are presented.

Keywords— serious games, circular economy, learning tool

I. Introduction

The circular economy is a term used to describe an economic development model based on the principles of reducing, recycling and reusing the waste produced by industrial operations. This model is a framework for systemic solutions to environmental and socioeconomic challenges that are related to global warming, waste management, loss of biodiversity and certain kinds of pollution. [1]

The application of the circular economy model in the construction industry is important as it is one of the economic sectors that consumes the largest amount of raw materials in Colombia, using 60% of the non-renewable resources extracted from the earth and 40% of the country´s energy. In addition, it contributes 30% of CO2 emissions, and its operational waste represents 20% of the total materials used in construction projects [2]. Among the lines of action of the National Circular Economy Strategy (ENEC), construction materials are included with specific indicators, short- and long-term goals, as well as actions that encourage economic actors to innovate their traditional production and consumption models to transform them into circular models [3].

The inadequate management of solid waste needs to be addressed across different industries to promote its reuse. Under the circular economy approach these residues can be considered as valuable resources; This article proposes the design of a serious game as a pedagogical tool to explore the valorization of Construction and Demolition Waste (CDW) through strategic decision making.
To apply design, planning, execution, monitoring and finalization practices in construction projects and ensure its alignment with the practices mentioned earlier is necessary that the values, norms and behavior of the company are formulated under an organizational culture whose decision making process is oriented to the principles of circular economy; organizational culture is the group of values, norms and behavior that define the way a company operates internally and interact with its external environment [4]
In this context serious games emerge as tools that allow the simulation of strategic decision-making scenarios, it fosters the experiential learning process and facilitates the comprehension of dynamics associated with circular economy, thus contributing to the creation, strengthening, or transformation of organizational culture. In this context the serious game "Descombrarte" is presented as a proposal focused on the construction and demolition waste

management, through collaborative dynamics based on the simulation of realistic scenarios, the participants assume roles and take strategic decisions throughout a construction project, evaluating the technical, economic and environmental implications of the scenarios; promoting the integration of circular economy principles into practice.

II. Theoretical Framework

The serious games concept dates to 1970 and refers to games that have been designed and applied with educational purposes, these are used in various fields such as mathematics, engineering, health sciences, among others [6]. These also aim to raise awareness and promote understanding about a specific topic that is developed in the game [5].

Among the challenges that are faced in modern society the ones that are related to environmental damage take special relevance, giving rise to the concept of circular economy, the idea of minimizing waste in the industrial activities has been around since 1940 under the proposal of "industrial ecology" which along with the term "industrial symbiosis" was commonly used to describe determinant factors to industrial locations, with the purpose of using resources efficiently and avoiding waste; In 1990 the circular economy concept had stagnated and there weren't significant advances regarding the concept; In 2010 the Ellen MacArthur foundation was established, and since then innovative advances have come forward such as the butterfly diagram and other ways to view and apply circular economy in industrial activities [7].

Different governments and international entities such as the OECD have promoted various initiatives to support the transition toward a circular economy growth model, highlighting the need for education and implementation of these principles across different economic industries.

The construction industry must apply the circular economy principles into their practice. The proper and sustainable management of solid waste is one of the most representative alternatives for this economic activity. Known as construction and demolition waste (CDW)/ debris refers to inert and heavy materials that come up out of constructions, demolitions or other related activities, characterized by not decomposing easily and not being organic [8].

The following materials are mainly included within the category of debris:

- concrete
- bricks
- blocks
- clay or cement roof tiles
- mortar
- ceramic (tiles/ coatings)
- Stone
- pavement or asphalt fragments
- hardened gypsum

In Colombia approximately 25.000 tons of solid waste are generated daily, of which only 13% is recovered and 7% is reintegrated into the productive life cycle [9]. Construction debris forms part of these statistics. By 2019 estimates suggest that between 18 and 22 million tons of construction and demolition waste (CDW) were generated annually [10]. In this context, it is necessary to advance toward sustainable management models capable of mitigating the impacts associated with construction debris.

III. Descombrarte

Objective and Structure:

Teams make strategic decisions throughout a construction project to manage construction debris under circular economy principles, evaluating their environmental impact while assuring their decisions are sustainable, ethical, feasible and financially responsible

Number of players, Teams and Roles:

The number of players is flexible; however, each team must be distributed in odd numbers, ideally the quantity of players per team is 3 as they have to choose their roles between: environmental engineer, general manager and financial director

Game materials:

Context sheets and lists of alternatives for each scenario, reused bottle taps of different colors to represent points, google form to document and analyze the obtained scores

Game structure:

The game follows five stages of a construction project: 1. Design, 2. Planning, 3. Execution phase, 4. monitoring, and 5. Project closure. Each phase has its own scenarios which are related to debris management. The teams discuss the presented alternatives and pick one. Each alternative is associated with a tap color depending on its impact and feasibility.

TABLE I. Game Score System

Bottle Cap Color	**Game Score System**	
	Meaning	***Score***
Green	circular, sustainable and feasible decision	+5
Blue	Good decision	+3
Yellow	Neutral decision / partially sustainable	+1
Red	Deficient decision for circular economy	-3
Black	Negative impact for environment and / or society	-5

Game Dynamic:

- The context of the problem related to construction debris and scenarios are presented.
- The teams discuss the options presented for 3 minutes per scenario
- They reveal their decision for each scenario
- The moderator reveals the scores and meaning of the decision
- They are given the respective colored bottle caps

Innovation Cap (Bonus):

The moderator can give one special cap as a bonus when a team proposes and justifies an innovative or strategic idea related to the scenario. These ideas must be presented at a determined time presented by the moderator on each round.

End of the Game:

In the final stage of the project, each team sums up the scores of the taps they received and that's the final score. The teams that have higher scores have the most circular projects.

TABLE II. TOTAL SCORE CLASSIFICATION

Scores	**Total Score Classification**
	Meaning
+40	Leading circular economy project
30-39	competitive and sustainable project
20-29	Project with sustainable advances
Below 20	Traditional waste management

Scenarios and lists of options:

Each scenario has been planned to belong to one of the construction project phases (design, planning, project execution and completion)

Initial Context:

A construction company has been hired to develop a building project in the city of Medellín, Colombia, the project must meet technical, economic and environmental requirements. The construction and demolition waste management represents a challenge due to its high generation rate and limited recycling and recovery.

It has been estimated that 1,200 tons of solid waste/ debris will be generated throughout the project. At the moment less than 10% of solid waste is reintegrated into the productive cycle in the country.

The team that makes strategic decisions consists of financial director, environmental engineer and general manager. The decisions they will have to make have to be feasible, sustainable and within the framework of circular economy principles in all the phases of the project (1.design, 2. Planning, 3. project execution, 4. monitoring and 5. completion/ project closure)

The main goal is to efficiently manage the generated waste to ensure financial and environmental well-being.

IV. DESCOMBRARTE – SCENARIOS

A. Design Phase

a) Material Selection: It is estimated that 500 m3 concrete will be used. There is the option of replacing up to 20% with recycled aggregate, which reduces 18% the greenhouse gas emissions of the project but increases the project costs 8% and it requires certified vendors by ministry of environment and sustainable development.
As a team you decide:

a) Use 20% recycled aggregate combined with material efficiency design and optimized procurement from certified suppliers, reducing total material use, environmental impact and overall project costs (+5, green cap)

b) Replace only 10% to reduce costs while still having positive environmental impact (+1, yellow cap)

c) Use the highest level of recycled aggregate to mitigate environmental impact and raise the final price to ensure financial profitability. (+3, blue cap)

d) Use 5% of recycled aggregate and purchase from a non-certified vendor offering low material costs. (-5, black cap)

b) Design for disassembly:
Structural redesign would allow up to 30% of materials to be recovered at end of life but increases initial costs by 5%.
As a team you decide:

a) Keep the original design (-3, red cap)
b) Apply design for disassembly criteria only in selected areas of the project (+3, blue cap)
c) Redesign completely for disassembly and reuse (+5, green cap)

B. Planning:

a) CDW Management: The generation of 1,200 tons of CDW is estimated over the project's lifetime
Traditional management: 50.000 COP/TON
Material classification on site: Rises the costs 15,000 COP/ TON but allows recovery up to 40% of used materials.
As a team you decide:

a) dispose of all CDW without prior classification or separation sending it to an illegal dumping site. (-5, black cap)
b) Sort only high value materials (+3, blue cap)

c) Sort all the CDW generated throughout the project (+5, green cap)
d) Choosing a traditional approach (-3, red cap)

b) Partnerships with recycling companies: A recycling company offers to process up to 300 tons of (CDW) at a cost 10% higher than traditional approach.
As a team you decide:

a) Not accepting the partnership as it raises the original costs (-3, red cap)
b) Accepting the partnership but only for high value materials (+1, yellow cap)
c) Adding the partnership with the recycling company into the waste management plan**.** (+5, green cap)

C. Project Execution

a) On-site Management

During the execution phase it is observed that 60% of the waste is being mixed, reducing the recycling potential to less than 10%. Implementing training and monitoring costs COP 5,000,000 but can increase the recycling rate by 35%.
As a team you decide:

a) Not taking action to avoid delivery delay (-5, black cap)
b) Instruct workers to sort only visible waste (+1, yellow cap)
c) Implement training and monitoring on site (+5, green cap)

D. Project Monitoring

a) Performance Indicators

It has been brought to attention that there is no CDW monitoring system is currently in place Implementing a monitoring system costs COP 3,000,000 but allows for a 20% improvement in efficiency
As a team you decide:

a) Measure no indicators (-5, Black cap)
b) Measure only at the end of the project (+1,yellow cap)
c) Implement continuous monitoring (+5, green cap)
d) Delegate without supervision (-3, red cap)

E. Project Completion

a) Project Closure:

There are 200 tons of CDW left
Traditional disposal: $50.000 COP/TON
Recycling: $65.000 COP/TON but reduces environmental impact by 25%

a) Dispose of all remaining waste through traditional disposal (-3, red cap)
b) Recycle only 30% of the remaining waste and dispose of the rest through traditional disposal (+3, blue cap)
c) Manage complete recycling of all remaining waste (+5,green cap)
d) Illegally dispose of the remaining waste and lie to the authorities about it (-5, black cap)

V. PILOT RESULTS ANALISIS

A total of 51 students participated in the playing of the game, prior to the game participants were asked to self-assess their level of familiarity with sustainability concepts. Most respondents reported a moderate level of familiarity (51%, n=26) followed by a high level (31,4%, n=16). Lower familiarity levels were reported by (15,7%, n=8) while only one participant (2%) indicated a very high level of knowledge on the subject.

Participants evaluated fourteen statements regarding the educational effectiveness of "*Descombrarte"* using a five-point Likert scale, where 1 represented "strongly disagree", and 5 represented "strongly agree". Overall, the responses indicate a positive perception of the serious game as a learning tool for sustainability and circular economy concepts.

The highest rated statement was "The game helped me understand the benefits of circular economy in construction projects" (mean=4,06), followed by "the circular economy component was interesting and engaging" (mean=4,04) and "The game increased my awareness in decision making" (mean=4,02).

Similarly, participants agreed that the game exposed them to sustainability-related decisions during project planning (mean=4.00) and encouraged them to consider construction waste as a valuable resource (mean= 3,98) and the project life cycle (mean=3,98).

Moderately high scores were also observed for statements related to integrating sustainability into real projects (mean=3,92), understanding sustainability challenges (mean=3,90), and the usefulness of the game for learning how to structure construction projects (mean=3,88).

The lowest mean score corresponded to the statement "The game motivated me to continue learning about sustainability after playing" (mean=3,55). Nevertheless, this value remained above the midpoint of the scale, indicating a favorable perception.

Participants also provided an overall evaluation of "*Descombrarte"* using a ten-point scale. The serious game obtained an average score of 8.31 out of 10 (SD=1.43), indicating a high level of acceptance among participants, suggesting that most respondents consistently perceived the game as a valuable educational source.

References

[1] Ellen MacArthur Foundation, "Circular economy overview," [Online]. Available: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/temas/presentacion-

economia-circular/vision-general

[2] International Energy Agency & United Nations Environment Programme, "2018 Global Status Report: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector," UN Environment Programme, 2018. [Online]. Available: https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-2018

[3] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, "Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC)," Bogotá, Colombia, 2018. [Online]. Available: https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/estrategia-nacional-de-economia-circular/

[4] CEREM Business School, "Cultura organizacional: características y componentes," 2022. [Online]. Available: https://www.cerem.es/blog/cultura-organizacional-caracteristicas-y-componentes/

[5] F. A. Ochoa Silva and R. Chalmeta, "Aplicación y tendencias de los juegos serios como herramienta didáctica para la sostenibilidad," *Etic@net*, vol. 20, no. 2, pp. 242–261, 2020. DOI: 10.30827/ETICANET.V20I2.16548

[6] L. M. Londoño Vásquez and M. D. Rojas López, "De los juegos a la gamificación: propuesta de un modelo integrado," *Educación y Educadores*, vol. 23, no. 3, pp. 493–512, 2020. DOI: 10.5294/edu.2020.23.3.7

[7] P. Ekins, T. Domenech Aparisi, P. Drummond, R. Bleischwitz, N. Hughes, and L. Lotti, "The Circular Economy: What, Why, How and Where," OECD Centre for Entrepreneurship, Paris, France, 2020.

[8] Oficina de Gestión Ambiental, Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, "Residuos de Construcción y Demolición – RCD," 2023. [Online]. Available: https://ogabogota.unal.edu.co/componente-antropico/residuos/

[9] Greenpeace Colombia, "El problema de los residuos," Mar. 2026. [Online]. Available: https://www.greenpeace.org/colombia/el-problema-de-los-residuos/

[10] G. Martínez, "¡Alarmante! Colombia produce 22'000.000 de toneladas de residuos de construcción y demolición RCD al año," *Ingeniería y Construcción Colombia*, Sep. 2019. [Online]. Available: https://www.ingenieriayconstruccioncolombia.com/residuos-de-construccion-y-demolicion-rcd/

Análisis computacional de la actividad solar a partir de imágenes de alta resolución

1ro Jhon Henry Vargas Beltrán[a]
Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá D.C, Colombia.
jhon.vargas@unimilitar.edu.co [a]

2nd Paula Sofia Gómez
Facultad Ingeniería
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, Colombia
est.paulas.gomez@unimilitar.edu.co

3rd Juan Sebastián Rodríguez
Facultad Ingeniería
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, Colombia
est.juans.rodriguezf@unimilitar.edu.co

Abstract— **El presente proyecto aborda el análisis morfológico de la actividad solar mediante el procesamiento digital de imágenes de alta resolución y el uso de herramientas computacionales en Python. La investigación se centra en el estudio de las manchas solares como indicadores de la actividad magnética en la fotosfera, permitiendo la caracterización de sus propiedades físicas a partir de datos observacionales. La metodología se fundamenta en la técnica de Lucky Imaging, la cual consiste en la captura de secuencias de video a alta velocidad con el fin de mitigar los efectos de la turbulencia atmosférica. Posteriormente, se aplica un flujo de procesamiento digital mediante herramientas como PIPP, AutoStakkert y Registax, permitiendo la selección de los mejores fotogramas, su alineación y apilado, y la mejora de la relación señal-ruido para la recuperación de detalles finos de la superficie solar. Como complemento al procesamiento digital, se emplea la librería SunPy para estructurar y analizar la información obtenida, facilitando la incorporación de metadatos físicos y temporales en las imágenes procesadas. Esto permite realizar un análisis más riguroso de la morfología solar, incluyendo la identificación de estructuras como la umbra y penumbra, así como la estimación de dimensiones físicas de regiones activas a partir de la resolución del sistema óptico y la distancia Sol-Tierra. Los resultados obtenidos evidencian una mejora significativa en la calidad de las imágenes, así como la capacidad de recuperar estructuras solares no visibles en los datos originales. Asimismo, el análisis realizado permite caracterizar regiones activas y estimar su tamaño físico, aportando información cuantitativa relevante para el estudio de la actividad solar. Este trabajo demuestra que la integración de técnicas de astrofotografía, procesamiento digital y herramientas de análisis computacional permite transformar registros observacionales en datos con valor científico, contribuyendo al estudio de la morfología solar mediante metodologías accesibles y reproducibles.**

Palabras clave: actividad solar, manchas solares, astrofotografía, lucky imaging, procesamiento de imágenes, SunPy

I. INTRODUCCÍON

La observación terrestre de la fotosfera solar enfrenta un desafío fundamental: la degradación de la imagen inducida por la turbulencia atmosférica, comúnmente conocida como *seeing* [1]. Las fluctuaciones térmicas en la atmósfera terrestre generan variaciones en el índice de refracción, lo que distorsiona los frentes de onda de la luz entrante y limita severamente la resolución espacial de los instrumentos ópticos. Para superar esta limitación sin recurrir a costosos sistemas de óptica adaptativa o telescopios espaciales, la técnica de *Lucky Imaging* se ha consolidado como un estándar en la astrofotografía científica de alta resolución. Este trabajo presenta un análisis riguroso de un flujo de trabajo computacional secuencial diseñado para maximizar la fidelidad morfométrica de las estructuras solares. Mediante la captura de video de alta velocidad, se realiza una selección estadística de los fotogramas coincidentes con momentos de estabilidad atmosférica. Posteriormente, la aplicación de algoritmos de alineación, apilado y realce por *wavelets* permite optimizar la relación señal-ruido (S/N). El objetivo de esta investigación es detallar este proceso técnico, demostrando su eficacia para revelar estructuras a pequeña escala, como la granulación solar y la morfología detallada de las manchas solares, generando registros aptos para la fotometría y el análisis cuantitativo posterior.

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y su dinámica magnética influye de manera determinante en el clima espacial de nuestro entorno planetario. Durante los periodos de alta actividad, se incrementa la incidencia de erupciones solares y eyecciones de masa coronal eventos masivos de liberación de plasma capaces de perturbar infraestructuras satelitales, sistemas de telecomunicaciones y redes de distribución eléctrica[2]. Por consiguiente, la comprensión y el monitoreo constante de la actividad solar constituyen una prioridad tanto científica como tecnológica. Las manchas solares representan la manifestación fotosférica más evidente de dicha actividad; son regiones donde la alta concentración del campo magnético inhibe la convección térmica, generando áreas comparativamente más frías y oscuras que su entorno. Su estudio sistemático, documentado desde las observaciones de Galileo Galilei a principios del siglo XVII, se mantiene en la

actualidad como una métrica fundamental para modelar y entender el ciclo solar [3].

El presente trabajo constituye la evolución de una línea de investigación desarrollada al interior del semillero SAAC de la Universidad Militar Nueva Granada. En fases previas, el esfuerzo se centró en la validación de un protocolo observacional para capturar y procesar imágenes de alta resolución mediante software libre, mitigando los efectos de la turbulencia atmosférica [4]. Mientras que dicha etapa garantizó la obtención de registros con alta fidelidad óptica, la actual investigación trasciende hacia el análisis computacional avanzado[5]. Mediante la implementación de la librería científica SunPy, se transforman estos registros observacionales en datos cuantitativos, permitiendo determinar las dimensiones físicas de las regiones activas, caracterizar su estructura interna y analizar sus propiedades morfológicas con rigor métrico.

II. Marco Teórico

A. *La fotosfera y la morfología de las manchas solares*

La fotosfera La fotosfera constituye la capa visible del Sol, presentando una temperatura efectiva de aproximadamente 5778 K. Esta región es la principal fuente de la radiación electromagnética que alcanza la Tierra. En esta capa se manifiesta la granulación solar, un patrón dinámico conformado por millones de celdas convectivas de unos 1000 km de diámetro medio, producto del ascenso de plasma caliente desde la zona convectiva subyacente. La resolución óptica de esta estructura granular en registros observacionales terrestres es un indicador fundamental de alta fidelidad instrumental y del éxito en la mitigación de la turbulencia atmosférica.

Las manchas solares se originan por la emergencia de tubos de flujo magnético de alta intensidad, los cuales inhiben el transporte local de energía por convección. En consecuencia, se configuran regiones térmicamente deprimidas, entre 1500 K y 2000 K más frías que la fotosfera circundante, lo que genera un contraste visual que las hace percibir oscuras. Morfológicamente, una mancha solar desarrollada presenta dos regiones bien diferenciadas: la umbra, correspondiente al núcleo central oscuro, caracterizada por líneas de campo magnético predominantemente verticales y temperaturas de 3500 K a 4000 K; y la penumbra, una estructura anular circundante definida por campos magnéticos más inclinados, temperaturas entre 5000 K y 5500 K, y flujos radiales de plasma conocidos como el efecto Evershed.

Un avance notable en la física solar reciente establece que la frontera magnetohidrodinámica entre la umbra y la penumbra coincide de manera consistente con un valor del campo magnético vertical de aproximadamente 1867 G, independientemente del tamaño de la región activa o de la fase del ciclo solar. Este límite empírico, consolidado por Jurčák et al. (2018) a partir del análisis de más de 100 manchas observadas por el satélite Hinode, constituye uno de los parámetros físicos más robustos para la delimitación computacional y la caracterización cuantitativa de estas estructuras [6].

B. *El ciclo solar y su evolución espaciotemporal*

La aparición y distribución espacial de las manchas solares no constituye un fenómeno estocástico; por el contrario, obedece a una periodicidad de aproximadamente 11 años denominada ciclo de Schwabe, la cual está estrechamente ligada a la inversión del campo magnético global del Sol. A lo largo de este periodo, la evolución de las regiones activas está gobernada por la ley de Spörer. Según este principio, al inicio de un nuevo ciclo magnético, las manchas emergen en latitudes medias (típicamente entre 30° y 40° en ambos hemisferios). Conforme el ciclo avanza hacia su fase de máxima actividad, las nuevas regiones de flujo magnético se manifiestan progresivamente en latitudes más bajas, convergiendo hacia el ecuador solar. Esta migración latitudinal histórica se visualiza de forma clásica mediante el diagrama de mariposa de Maunder [7].

En la actualidad, el Sol transita por el Ciclo 25, cuyo mínimo y consecuente inicio oficial fue registrado en diciembre de 2019. Los datos observacionales recientes correspondientes a este ciclo han evidenciado una progresión y un nivel de actividad magnética significativamente superiores a los modelos predictivos iniciales del panel de consenso internacional. Esta intensificación imprevista subraya la pertinencia del monitoreo continuo y la medición morfométrica rigurosa de las manchas solares, ya que estos registros empíricos son fundamentales para refinar los modelos teóricos de la dinamo solar y la predicción del clima espacial.

C. *SunPy y el análisis computacional de datos solares en Python*

SunPy es una biblioteca de código abierto fundamentada en Python, desarrollada específicamente para el procesamiento y análisis de datos en física solar [8]. Su núcleo funcional radica en la capacidad de transformar arreglos bidimensionales de píxeles en objetos estructurados denominados mapas solares (*Maps*). Estas estructuras de datos vinculan la información visual con metadatos observacionales críticos, dotando a la imagen de una escala espacial calibrada, referencias temporales precisas y sistemas de coordenadas físicas rigurosos (tales como proyecciones heliocéntricas en kilómetros o grados heliográficos) [9]. Esta parametrización facilita la transición metodológica de la simple inspección visual cualitativa a la caracterización morfométrica cuantitativa de las estructuras fotosféricas.

Asimismo, la arquitectura de SunPy está diseñada para operar de manera nativa dentro del ecosistema científico de Python. Su integración sinérgica permite aprovechar bibliotecas fundamentales como SunPy, para el procesamiento matricial y

cálculo numérico avanzado; Matplotlib, para la generación de visualizaciones de datos de alta fidelidad; y Astropy, para la gestión de unidades físicas y transformaciones complejas de coordenadas astronómicas. La convergencia de estas herramientas conforma un entorno computacional robusto, reproducible y de acceso abierto (libre de costos de licenciamiento), el cual resulta idóneo para extraer métricas físicas precisas a partir de registros observacionales.

III. METODOLOGÍA

A. Captura de imágenes

Las imágenes se tomaron con un telescopio Meade ETX-70 y una cámara senda M, usando un filtro solar de seguridad en la apertura del telescopio y un filtro de banda estrecha de 530 nm para mejorar el contraste de las estructuras solares. La resolución calculada del sistema es de 1.41 segundos de arco por píxel, valor muy cercano al límite teórico del telescopio (1.41"/píxel), lo que garantiza que la cámara aprovecha casi toda la resolución disponible. Para la validación técnica de las imágenes obtenidas se requiere un emparejamiento óptimo entre el tren óptico y la cámara. Por este motivo, se determina la escala de placa del sistema (arcosegundos/píxel) para evitar regímenes de submuestreo o sobremuestreo que comprometan la información espacial de la superficie solar, se debe buscar en la calculadora que se muestre a continuación que la barra se encuentre dentro de la región de color verde o óptima para realizar la captura con la más alta resolución posible respectando el límite de difracción de Rayleigh [10]:



Fig. 1. Captura de pantalla con los parámetros del telescopio Celestron Meade ETX -70 y la cámara Player One Senda-M [10].

B. Procesamiento de las imágenes

Se describe una metodología experimental y cuantitativa de procesamiento de imágenes solares basada en la técnica de *Lucky Imaging*, utilizando PIPP, AutoStakkert [11], Registax y Gimp [12]. El flujo de trabajo consiste en capturar video de alta velocidad para extraer, alinear y apilar los fotogramas con menor turbulencia atmosférica, optimizando así la relación señal-ruido (S/N) y aplicando realce algorítmico por *wavelets*. Este proceso permite obtener registros de alta fidelidad morfométrica de la granulación y las manchas solares, consolidando un estándar metodológico robusto para la investigación dentro del semillero SAAC.

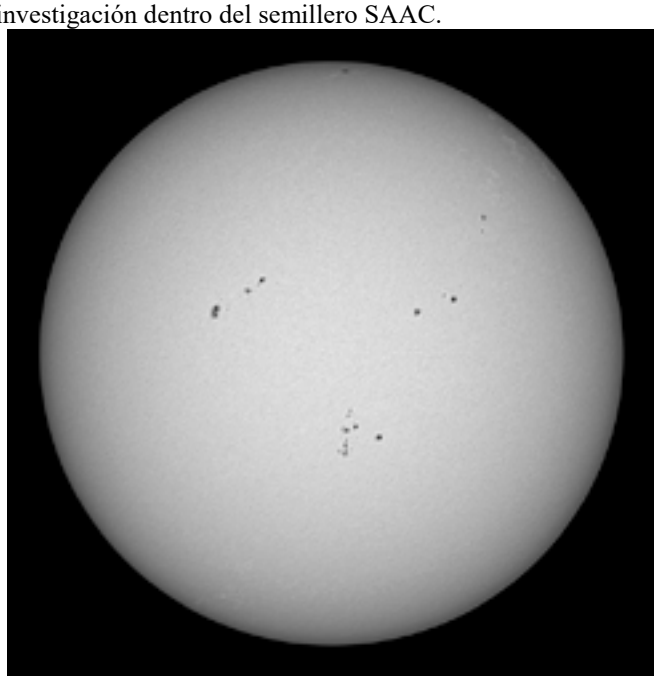


Fig. 2. Imagen final procesada a partir de tomas individuales Luck-Imagin.

C. Análisis computacional con SunPy

El procedimiento inició con la adquisición y carga de imágenes del Sol en alta resolución, las cuales fueron utilizadas como base para la detección de regiones activas sobre la superficie solar.

Posteriormente, se aplicaron técnicas de procesamiento digital de imágenes con el objetivo de mejorar la calidad visual y facilitar la identificación de manchas solares. Entre las tareas realizadas se incluyó la conversión y normalización de la imagen, el ajuste de contraste y la delimitación automática del disco solar para separar la región de interés del fondo de la imagen.Una vez definido el disco solar, se implementaron métodos de segmentación basados en diferencias de intensidad lumínica para detectar regiones oscuras correspondientes a manchas solares. Cada región detectada fue marcada y etiquetada individualmente para permitir su análisis posterior.

Después de la detección, se calcularon diversos parámetros físicos y geométricos de cada mancha solar. Entre ellos se determinaron el área aproximada en kilómetros cuadrados, el diámetro estimado y la posición heliográfica mediante coordenadas de latitud y longitud. Asimismo, se realizó una estimación de las temperaturas correspondientes a las regiones de umbra y penumbra a partir de variaciones de intensidad observadas en la imagen procesada. Con base en las dimensiones calculadas, las manchas solares fueron clasificadas según su tamaño. Finalmente, toda la información obtenida fue organizada en tablas y representada mediante gráficas estadísticas para facilitar el análisis visual y

comparativo de los datos generados por el sistema computacional.

IV RESULTADOS Y DISUSIÓN

A. Calidad de la imagen procesada

El flujo de procesamiento demostró ser muy efectivo. El fotograma original mostraba una imagen borrosa con mucho ruido, donde las estructuras internas de las manchas eran imperceptibles. Tras el apilado y la aplicación de wavelets, se obtuvo una imagen con el limbo solar perfectamente definido y con la umbra y penumbras claramente distinguibles. La región activa principal medida con SunPy presentó una extensión de aproximadamente 27 000 ± 900 km, es decir, más del doble del diámetro de la Tierra (12 742 km). Este resultado es coherente con los tamaños reportados en la literatura para regiones activas de actividad media [7].

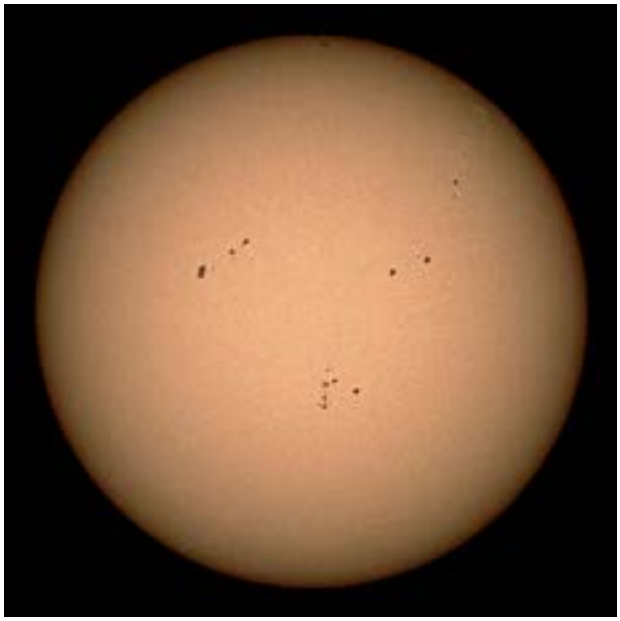


Fig. 3. Imagen final procesada a partir de tomas individuales Luck-Imagin Registro fotográfico del disco solar completo tras el procesamiento digital agregado de color con Gimp.

La Figura 3 presenta el registro observacional de disco solar completo obtenido tras aplicar el flujo de procesamiento digital integral. En la imagen se evidencia con alta nitidez la distribución espacial de múltiples regiones activas (grupos de manchas solares) localizadas predominantemente en latitudes medias y bajas, las cuales exhiben una clara delimitación morfológica entre la umbra oscura y la penumbra circundante. Adicionalmente, el realce de altas frecuencias logrado mediante los algoritmos de *wavelets* ha permitido resolver de manera uniforme la estructura fina de la granulación fotosférica a lo largo de toda la superficie visible. Este nivel de detalle e integridad morfométrica, contrastado sobre un fondo instrumentalmente limpio mediante ajustes de histograma, certifica el éxito en la mitigación de la turbulencia atmosférica y consolida la idoneidad de la imagen para su posterior análisis cuantitativo.

B. Análisis con SunPy

A partir del procesamiento computacional realizado sobre la imagen solar analizada, se detectaron un total de nueve manchas solares distribuidas en diferentes regiones del disco solar. Todas las manchas identificadas fueron clasificadas dentro de la categoría de tamaño pequeño de acuerdo con los criterios establecidos en el análisis del programa Sunpy:

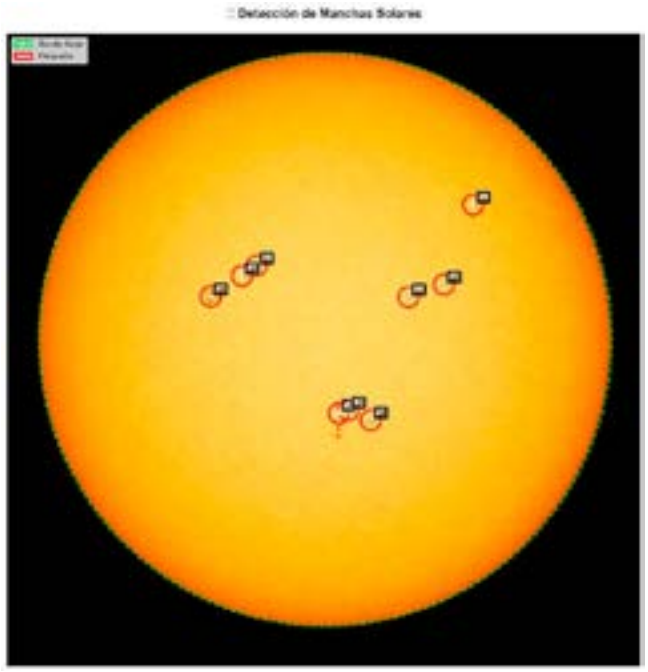


Fig. 4. Detección automática de manchas solares sobre el disco fotosférico con Python y SunPy.

Los resultados obtenidos muestran variaciones importantes en las dimensiones de las manchas detectadas. La mancha solar #5 presentó el mayor tamaño registrado, con un área aproximada de 401,636,951 km² y un diámetro cercano a 22,614 km, lo que indica una región activa de mayor extensión en comparación con las demás manchas detectadas.

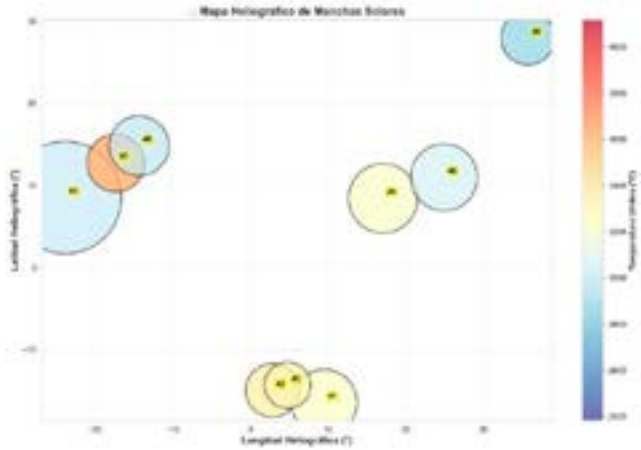


Fig. 5. Mapa Heliografico en la detección de manchas por SunPy

Por otro lado, la mancha #3 correspondió a la menor área registrada, con aproximadamente 67,636,453 km² y un diámetro de 9,280 km. En cuanto a la ubicación heliográfica, las manchas solares se encontraron distribuidas tanto en latitudes positivas como negativas, lo que evidencia presencia de actividad solar en diferentes hemisferios del Sol. Asimismo, las longitudes obtenidas indican una dispersión relativamente amplia de las manchas sobre la superficie observada disco solar**.**

TABLA I

Resultados del análisis computacional de manchas solares con Sunpy

ID	Tipo	Área (km²)	D (km)	Lat°	Long °	T Umbra (°C)	T Pen. (°C)
#1	Peq.	137.3M	13.2k	-16.4	9.5	3233	4784
#2	Peq.	91.0M	10.8k	-14.9	2.8	3348	4932
#3	Peq.	67.6M	9.3k	-14.3	4.8	3292	479
#4	Peq.	152.4M	13.9k	8.5	17.1	3233	4862
#5	Peq.	401.6M	22.6k	8.6	-23.8	3035	4808
#6	Peq.	141.6M	13.4k	11.0	24.9	3071	4658
#7	Peq.	105.6M	11.6k	12.8	-17.3	3618	4887
#8	Peq.	113.8M	12.0k	14.8	-14.3	2999	4801
#9	Peq.	91.1M	10.8k	28.0	35.7	2881	4825

Respecto al análisis térmico, los valores estimados de temperatura muestran que la región de umbra presentó temperaturas considerablemente menores que las regiones de penumbra en todas las manchas analizadas. Este comportamiento coincide con la teoría física de las manchas solares, ya que la umbra corresponde a la zona más oscura y fría debido a la intensa actividad magnética que reduce el transporte de energía desde el interior solar.

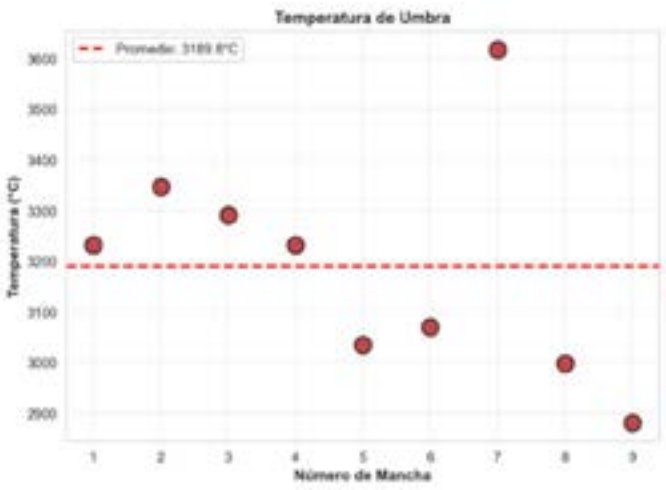


Fig. 6. Temperatura promedio de la Umbra de cada una de las manchas detectadas por el sotfware SunPy

Las temperaturas de umbra registradas oscilaron aproximadamente entre 2881 °C y 3618 °C, mientras que las temperaturas de penumbra se mantuvieron en rangos cercanos entre 4658 °C y 4932 °C. Estas diferencias térmicas permiten evidenciar el contraste existente entre ambas regiones de cada mancha solar.

Además, las representaciones gráficas permitieron visualizar de manera más clara la distribución de áreas, diámetros y temperaturas obtenidas. La figura 7 y 8 muestran diferencias significativas entre algunas manchas, especialmente en el caso de la mancha #5, mientras que la figura 6 de temperatura permitió observar que la mayoría de valores de umbra se mantienen alrededor de un promedio cercano a 3190 °C.

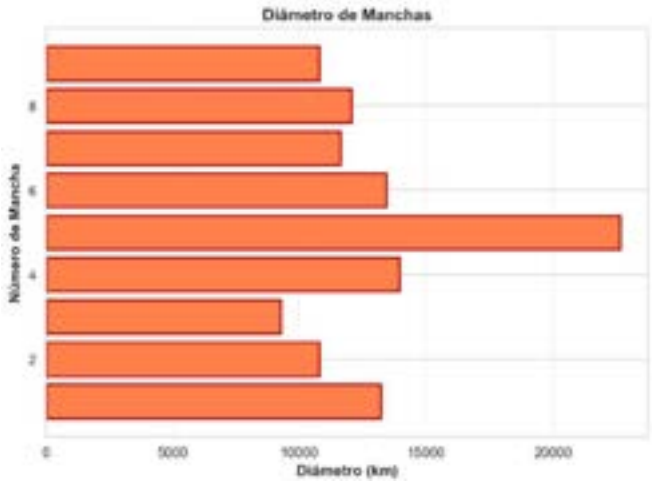


Fig. 7. Diametros de las manchas detectadas por el SunPy

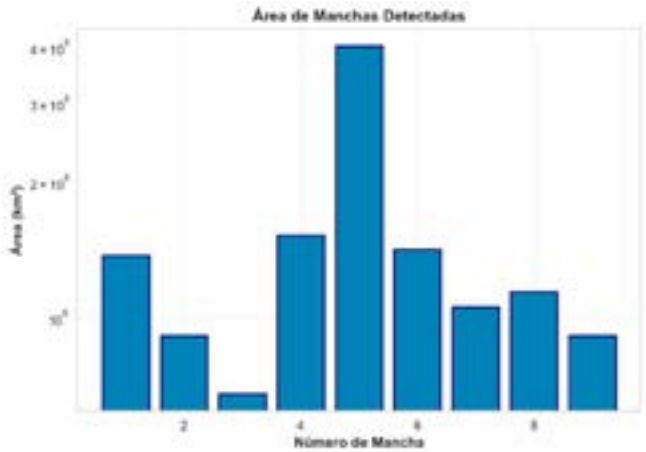


Fig. 8. Area aproximada de las machas detectadas por SunPy

Finalmente, la detección automática realizada mediante Python y SunPy demostró ser una herramienta eficiente para el reconocimiento y caracterización de manchas solares, permitiendo obtener parámetros físicos relevantes a partir del procesamiento digital de imágenes astronómicas.

C. Experiencia del Semillero: Formando Líderes en Ciencia

Más allá de los logros técnicos, este proyecto ha sido un motor de transformación para los integrantes del Semillero de Astronomía y Astrofotografía Científica de la UMNG. Durante el proceso de procesado y análisis, los estudiantes no solo aplicaron conocimientos de procesado astronómico, sino que asumieron el liderazgo en la resolución de problemas técnicos y científicos en astrometría

V. Conclusiones

A partir del desarrollo y validación del flujo de trabajo integral presentado en este estudio, se derivan las siguientes conclusiones:

1. Eficacia de la metodología integral: Se demostró que la convergencia entre la astrofotografía de alta resolución, el procesamiento digital avanzado y la computación científica con Python/SunPy constituye un protocolo robusto y reproducible. Esta metodología permite transformar registros observacionales terrestres en datos con valor científico, facilitando el estudio de la dinámica solar desde un entorno universitario con infraestructura técnica accesible.
2. Optimización del registro observacional: La implementación de la técnica de *Lucky Imaging* resultó fundamental para mitigar las limitaciones impuestas por el *seeing* local. El flujo de procesamiento secuencial permitió reducir drásticamente el ruido aleatorio y mejorar la relación señal-ruido (S/N), logrando recuperar detalles morfológicos finos de la fotosfera —como la granulación y la estructura compleja de las manchas— que permanecían latentes en los fotogramas originales.
3. Trascendencia del análisis cuantitativo: El uso de la librería SunPy permitió trascender la inspección cualitativa de las imágenes al transformarlas en mapas solares calibrados. La incorporación de metadatos físicos y coordenadas heliográficas hizo posible la ejecución de mediciones morfométricas directas en kilómetros, dotando a la investigación previa del semillero SAAC de una dimensión cuantitativa necesaria para la caracterización física de las regiones activas.
4. Validación de resultados físicos: El análisis computacional permitió identificar y caracterizar estructuras de umbra y penumbra con alta precisión. Los resultados obtenidos en cuanto a la distribución de temperaturas y dimensiones físicas de las manchas solares guardan plena consistencia con los modelos teóricos establecidos y los datos de referencia internacional [13], validando la fiabilidad de las herramientas utilizadas.
5. Democratización de la ciencia solar: El uso exclusivo de software libre y herramientas de código abierto reafirma que no es estrictamente necesario el acceso a plataformas espaciales o licencias de software de alto costo para desarrollar investigación solar de rigor. Este enfoque promueve la soberanía tecnológica y el fortalecimiento de la investigación formativa, demostrando que la ingeniería y la astronomía pueden converger en soluciones de alta calidad científica a partir de recursos optimizados.

Referencias

[1] C. R. Kitchin, *Solar Observing Techniques*. Springer Nature, 2020.
[2] X. Huang, H. Wang, L. Xu, J. Wang, F. Jiao, and X. Feng, "Deep learning–based solar flare forecasting model. III. Extracting precursors from EUV images," *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2023, doi: 10.3847/1538-4365/acaee9.
[3] M. Stix, *The Sun: An Introduction*, 2.ª ed. Springer-Verlag, 2002. ISBN: 3-540-42886-0.
[4] S. León, S. Rincón, and J. H. Vargas, "Protocolo de adquisición y procesamiento digital de imágenes mediante Lucky Imaging para el análisis morfológico de la actividad solar," *XXIII Encuentro Regional de Semilleros de Investigación RedCOLSI Nodo Bogotá–Cundinamarca*, Universidad Militar Nueva Granada, 2025.
[5] M. Jin and A. Pevtsov, "Solar imaging data analytics: A selective overview of challenges and opportunities," *Journal of Data Science*, 2024, doi: 10.1080/29979676.2024.2391688.
[6] J. Jurčák, R. Rezaei, N. B. González, R. Schlichenmaier, and J. Vomlel, "The magnetic nature of umbra-penumbra boundary in sunspots," *Astronomy & Astrophysics*, 611, L4, 2018, doi: 10.1051/0004-6361/201732528.
[7] D. H. Hathaway, "The solar cycle," *Living Reviews in Solar Physics*, 12(1), 4, 2015, doi: 10.1007/lrsp-2015-4.
[8] W. T. Barnes et al., "The SunPy project: Open source development and status of the version 1.0 core package," *The Astrophysical Journal*, 890(1), 68, 2020, doi: 10.3847/1538-4357/ab4f7a. (Acompañado de: The SunPy Community, "SunPy Documentation," 2026. [En línea]. Disponible: https://docs.sunpy.org/en/stable/).
[9] W. T. Thompson, "Coordinate systems for solar image data," *Astronomy & Astrophysics*, 449(2), 791–803, 2006, doi: 10.1051/0004-6361:20054262.
[10] Astronomy.tools, "CCD suitability: Find the optimum camera/telescope combination for your skies". [En línea]. Disponible: https://astronomy.tools/calculators/ccd_suitability. [Accedido: 10-mayo-2026].
[11] E. Kraaikamp, "AutoStakkert! 3: User manual and stacking algorithms for solar and planetary imaging," 2023. [En línea]. Disponible: https://www.autostakkert.com/. [Accedido: 10-mayo-2026].
[12] GIMP, "GNU Image Manipulation Program". [Software]. Disponible: https://www.gimp.org/. [Accedido: 10-mayo-2026].
[13] W. D. Pesnell, B. J. Thompson, and P. C. Chamberlin, "The Solar Dynamics Observatory (SDO)," *Solar Physics*, 275(1–2), 3–15, 2012, doi: 10.1007/s11207-011-9841-3.

Diagnóstico comparativo de la cultura organizacional en las empresas TSP Ltda. y TTC S.A.S del sector transporte ubicadas en el municipio de Yopal: Características, Semejanzas y diferencias.

1st Constanza Fernanda Barinas Sicuariza
Estudiante Ingeniería Industrial,
Grupo investigativo GISPA
Universidad Santo Tomás
Tunja, Colombia
constanza.barinas@usantoto.edu.co

2nd Nycoll Valentina Vega Barrera
Estudiante ingeniería Industrial
Grupo investigativo GISPA
Universidad Santo Tomás
Tunja, Colombia
nycoll.vega@usantoto.edu.co

3rd Cristian Alejandro Aguilar Tovar
Docente ingeniería Industrial
Grupo investigativo GISPA
Universidad Santo Tomás
Tunja Colombia
cristian.aguilart@usantoto.edu.co

***Abstract*— Este artículo presenta un diagnóstico comparativo de la cultura organizacional en dos empresas del sector transporte ubicadas en el municipio de Yopal, Colombia. El estudio se desarrolla en el contexto del transporte de hidrocarburos, un sector caracterizado por condiciones de alta exigencia donde el factor humano influye directamente en la seguridad y el desempeño organizacional. Para este estudio se hizo una revisión bibliográfica con el fin de comprender como se comporta e influye la cultura organizacional en una organización posteriormente se empleó un enfoque mixto mediante la aplicación del instrumento Organizational Culture Assessment Instrument mediante un muestreo tipo censo con la participación de los colaboradores de ambas empresas. Los resultados evidencian diferencias significativas en los modelos culturales, identificando una orientación al mercado en una organización y una cultura jerárquica en la otra. Estos hallazgos permiten comprender la influencia de la cultura organizacional en la toma de decisiones, la gestión del riesgo y el desempeño operativo.**

Keywords*— *cultura organizacional, competitividad, sector transporte.

I. Introduction

El sector transporte de hidrocarburos en Colombia constituye un componente estratégico para el desarrollo económico del país, especialmente en regiones como el departamento de Casanare, donde esta actividad representa una importante fuente de empleo y dinamización productiva. Un factor importante en este tipo de empresas son las condiciones en la que se trabaja ya que estas son altamente exigentes, debido al riesgo inherente en la manipulación y transporte de sustancias peligrosas, lo que implica garantizar altos estándares de seguridad, eficiencia operativa y cumplimiento normativo. En este contexto, el factor humano adquiere un papel determinante, debido a que el comportamiento de los trabajadores influye directamente en la ocurrencia de incidentes y en el desempeño organizacional [1].

La cultura organizacional se entiende como el conjunto de valores, creencias y prácticas compartidas que orientan el comportamiento de los miembros en una organización [2]. Su análisis resulta especialmente relevante en sectores operativos, donde la ejecución de tareas y la toma de decisiones están estrechamente relacionadas con la seguridad y la productividad. En este sentido, la cultura organizacional influye en la forma en que se estructuran los procesos, se gestiona el talento humano y se toman decisiones dentro de la organización [3].

A pesar de su importancia, en el municipio de Yopal existe limitada evidencia empírica sobre las características de la cultura organizacional en empresas del sector transporte y su influencia en la gestión del riesgo y el comportamiento de los trabajadores. Esta situación dificulta la formulación de estrategias orientadas al fortalecimiento organizacional y a la optimización de los procesos operativos. Por ello, se hace necesario desarrollar estudios comparativos que permitan analizar las dinámicas culturales en organizaciones que operan dentro de un mismo sector económico.

La relevancia de esta investigación radica en su aporte al conocimiento aplicado sobre la cultura organizacional en un sector poco explorado, permitiendo comprender su influencia en variables como la competitividad, la eficiencia y la seguridad. Asimismo, los resultados constituyen un insumo para el diseño de estrategias orientadas al fortalecimiento del desempeño organizacional y la gestión de riesgos en contextos de alta exigencia. Trabajando con empresas que tienen gran relevancia en este contexto como lo es T.S.P Ltda. Que cuenta con más de 30 años de trayectoria en el sector transporte e

hidrocarburos, Y TTC S.A.S. la cual cuenta con 17 años de trayectoria estas consolidándose como empresas importantes en operaciones logísticas y transporte especializado en el departamento del Casanare.

II. MARCO TEORICO

En el contexto colombiano, la industria de los hidrocarburos ha sido reconocida como un motor clave del crecimiento económico, [4] así mismo se pudo identificar que el sector enfrenta diversos desafíos relacionados con la infraestructura, la seguridad operativa y la relación con el entorno social y ambiental, aspectos especialmente críticos en el transporte de hidrocarburos debido a los riesgos asociados [5]. Diversos estudios han señalado que las actividades vinculadas a los hidrocarburos generan tanto impactos positivos como negativos en los territorios donde se desarrollan, destacando la necesidad de implementar prácticas organizacionales responsables que integren la sostenibilidad ambiental y la gestión del riesgo [6]. En consecuencia, las empresas del sector deben fortalecer no solo sus capacidades técnicas, sino también sus dinámicas internas, dentro de las cuales la cultura organizacional juega un papel determinante.

En el ámbito empírico, se ha evidenciado que las organizaciones experimentan procesos de transformación cultural, especialmente en contextos donde existen nuevas exigencias de competitividad, eficiencia y adaptación a cambios normativos [7]. Este aspecto resulta particularmente relevante en el sector transporte de hidrocarburos, donde las empresas deben ajustarse constantemente a estándares técnicos, regulatorios y ambientales.

Asimismo, diferentes investigaciones coinciden en que una cultura organizacional sólida impacta positivamente variables como la productividad, la innovación, la sostenibilidad y la competitividad empresarial [8], [9]. De igual manera, se ha identificado una relación directa entre cultura organizacional y motivación laboral, lo que influye en el compromiso de los trabajadores y en su permanencia dentro de la organización [10].

A partir de la revisión de la literatura, se evidencia que existe un amplio desarrollo teórico sobre la cultura organizacional y su influencia en el desempeño empresarial. Sin embargo, se identifica una limitada articulación entre estos estudios y el sector específico del transporte de hidrocarburos, donde la mayoría de las investigaciones se centran en aspectos técnicos, operativos o ambientales, dejando de lado el análisis de variables organizacionales.

III. METODOLOGIA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, integrando componentes cuantitativos y cualitativos con el fin de obtener una comprensión integral de la cultura organizacional en las empresas T.S.P. Ltda. (Tanques y Suministros Petroleros Ltda.) y TTC S.A.S (Tanques y Transportes del Casanare S.A.S)

Desde el enfoque cuantitativo, se realizó una revisión bibliográfica de más de 45 investigaciones enfocadas en temas de cultura organizacional, talento humano y transporte de hidrocarburos esta información nos permitió identificar el instrumento más adecuado para la recolección de información. Como resultado, se seleccionó el Organizational Culture Assessment Instrument (OCAI), Este instrumento permite diagnosticar el tipo de cultura organizacional predominante, clasificándola en cuatro tipologías: clan, adhocrática, de mercado y jerárquica.

El OCAI evalúa seis dimensiones organizacionales: características dominantes, liderazgo organizacional, gestión del talento humano, cohesión organizacional, énfasis estratégico y criterios de éxito. Cada dimensión es valorada mediante una escala que permite distribuir puntuaciones, facilitando el análisis comparativo entre las organizaciones objeto de estudio.

La recolección de la información se llevó a cabo mediante encuestas digitales aplicadas a través de la plataforma Survio, lo que permitió la sistematización de los datos y la participación de los colaboradores de manera eficiente. Posteriormente, los datos fueron exportados y procesados utilizando el lenguaje de programación Python, lo que garantizó un análisis estadístico riguroso y confiable.

En cuanto al componente cualitativo, este se orientó a la interpretación de los resultados obtenidos, con el propósito de comprender las percepciones de los trabajadores respecto a la cultura organizacional

La población objeto de estudio estuvo conformada por la totalidad de los trabajadores de las empresas T.S.P. Ltda. y TTC S.A.S. En el caso de T.S.P. Ltda., la población estuvo compuesta por 77 colaboradores, distribuidos en personal operativo, administrativo y directivo. Por su parte, TTC S.A.S. contó con una población de 17 colaboradores con características similares de distribución organizacional.

Dado el tamaño de la población, se empleó un muestreo tipo censo, Asimismo, se contó con el apoyo de áreas estratégicas como talento humano y HSEQ lo que facilitó el acceso a los participantes y la adecuada aplicación del instrumento.

IV. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación sobre la cultura organizacional de las empresas TTC S.A.S. Y T.S.P. Ltda. El análisis de los resultados permitió comprender cómo los valores, prácticas y comportamientos presentes en las empresas influyen en su funcionamiento interno y en el desempeño general como lo es su productividad.

A. Aplicar un instrumento de medición que permita diagnosticar el tipo de cultura predominante en cada empresa.

La aplicación de este instrumento OCAI fue desarrollado durante el periodo comprendido entre enero y marzo del 2026,

este permitió recolectar información cuantitativa relacionada con la percepción de los trabajadores sobre la cultura organizacional.

Posteriormente de la recolección de datos estos fueron exportados en Excel y procesados utilizando el lenguaje de programación Python lo que nos permitió organizar los datos, crear tablas y graficas para su análisis. Durante el proceso de toda la información recolectada se evidenció que los datos cumplieran con lo establecido del instrumento de que cada dimensión sumara un total de 100 puntos.

B. Identificar los principales aspectos que conforman la cultura organizacional en T.S.P. Ltda. y TTC S.A.S considerando las dimensiones evaluadas en el instrumento.

Para entender mejor los aspectos clave que forman la cultura organizacional en las empresas T.S.P. Ltda. y TTC S.A.S., comenzamos caracterizando a la población que participó en el estudio. Tuvimos en cuenta variables como lo son el género, el cargo que ocupan y su antigüedad en cada empresa. Este análisis nos ayudó a conocer la estructura organizacional de ambas empresas.



Fig 1. *Distribución de la población según género, cargo y antigüedad laboral en T.S.P. Ltda. y TTC S.A.S. Elaboración propia con base en datos procesados mediante Python.*

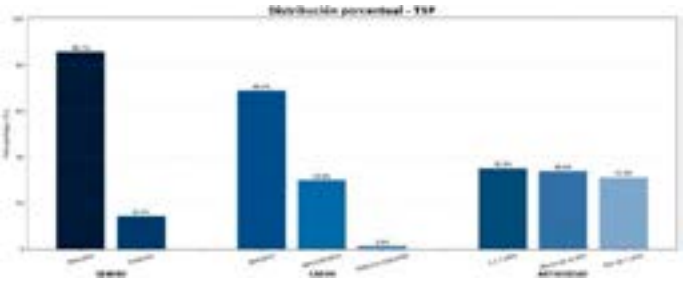


Fig 2. *Distribución de la población según género, cargo y antigüedad laboral en T.S.P. Ltda. Elaboración propia con base en datos procesados mediante Python.*

La caracterización de la población que participa en la empresa T.S.P. Ltda. mostró un notable predominio del género masculino el cual representa el 85,7 % de los trabajadores, mientras que el género femenino abarca el 14,3 %. Estos datos indican las dinámicas tradicionales del sector del transporte, especialmente en áreas relacionadas con operaciones logísticas y el transporte de hidrocarburos, donde históricamente ha habido una mayor participación masculina en roles operativos. En cuanto a los cargos desempeñados, el 68,8 % de los participantes se encontraba en el área operativa, el 29,9 % en el área administrativa y solo el 1,3 % ocupaba puestos directivos. Esto indica que la estructura organizacional de la empresa está principalmente enfocada en el desarrollo de actividades operativas, lo cual es de suma importancia en las necesidades del sector del transporte y la base de todos sus procesos productivos. En términos de antigüedad laboral, el 35,1 % de los trabajadores tenía entre 1 y 3 años en la organización, el 33,8 % contaba con menos de un año y el 31,2 % tenía más de 3 años de antigüedad. Esta distribución relativamente equilibrada da a entender que la empresa mantiene trabajadores con experiencia y al mismo tiempo, incorpora nuevo personal de manera constante.

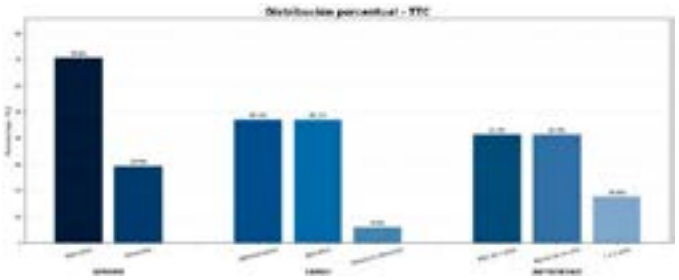


Fig 3. *Distribución de la población según género, cargo y antigüedad laboral en TTC S.A.S. Elaboración propia con base en datos procesados mediante Python.*

En la empresa TTC S.A.S., se observó una clara predominancia del género masculino el cual representa el 70,6 % de la población participante, mientras que el género femenino abarca el 29,4 %. Aunque la representación masculina sigue siendo mayor, la participación femenina es notablemente más significativa en comparación con la otra empresa T.S.P. Ltda. En lo que respecta a los cargos, tanto el área operativa como la administrativa constituyeron cada una el 47,1 % de la población, mientras que los cargos directivos representaron el 5,9 %. Esta distribución indica una estructura organizacional más compacta y equilibrada, donde las funciones administrativas y operativas tienen una participación similar dentro de la empresa. En cuanto a la antigüedad laboral, el 41,2 % de los trabajadores tenía más de 3 años en la organización, otro 41,2 % contaba con menos de un año, y el 17,6 % tenía entre 1 y 3 años de antigüedad. Estos datos reflejan una estabilidad laboral, pero al mismo tiempo la inducción de nuevos miembros a la empresa constantemente.



Fig 4. *Tabla sobre la distribución porcentual de la cultura organizacional en ambas empresas. Elaboración propia con base en datos procesados mediante Python.*

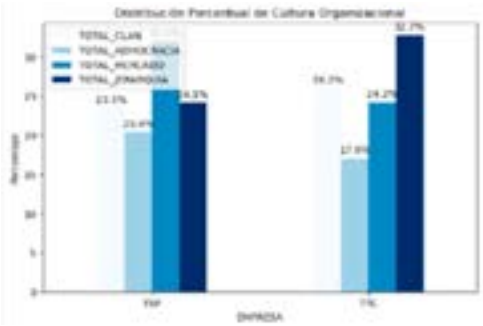


Fig 5. *Tabla y grafica sobre la distribución porcentual de la cultura organizacional. Elaboración propia con base en datos procesados mediante Python.*

Los resultados obtenidos al aplicar el instrumento OCAI nos permitieron detectar diferencias notables en los tipos de cultura organizacional que predominan en las empresas T.S.P. Ltda. y TTC S.A.S. A partir del análisis de las dimensiones evaluadas, se hicieron evidentes distintas orientaciones culturales vinculadas a la estructura organizacional, la gestión interna y el enfoque estratégico de cada empresa. En T.S.P. Ltda., la cultura de mercado fue la más destacada, con un 32%, seguida de la cultura jerárquica con un 24,1 %, la cultura clan con un 23,5 % y, por último, la cultura adhocrática con un 20,4 %. Estos resultados reflejan una organización que se centra principalmente en cumplir objetivos, ser competitiva y mantener un buen desempeño operativo. La predominancia de la cultura de mercado muestra un enfoque en la productividad, el logro de metas y la eficiencia organizacional, aspectos que son coherentes con las exigencias del sector del transporte de hidrocarburos, donde el cumplimiento de ciertos indicadores y resultados es fundamental. Además, la presencia de la cultura jerárquica como el segundo componente más representativo indica que hay procesos estructurados, control interno y cumplimiento de procedimientos organizacionales. Esto es especialmente relevante en actividades operativas de alto riesgo, donde hay diversas normas y protocolos esenciales para garantizar la seguridad y minimizar la probabilidad de incidentes. Por otro lado, la cultura clan mostró un porcentaje del 23,5 %, lo que sugiere que existen relaciones laborales basadas en la colaboración y la integración entre los trabajadores. Finalmente, la cultura adhocrática tuvo el porcentaje más bajo, con un 20,39 %, lo que indica una menor inclinación hacia la innovación y la flexibilidad organizacional.

En contraste, en TTC S.A.S. se observa una clara predominancia de la cultura jerárquica la cual alcanza un promedio del 32,7 %. Le sigue la cultura clan con un 26,04 %, la cultura de mercado con un 24,18 % y, por último, la cultura adhocrática con un 17,05 %. Estos resultados muestran que la organización se centra principalmente en el control interno, la estabilidad y el cumplimiento de todas las normativas. La fuerte presencia de la cultura jerárquica sugiere que la empresa valora la supervisión de procesos y el seguimiento de procedimientos establecidos, aspectos importantes que tambien son cruciales en el sector del transporte y especialmente importantes para la gestión del riesgo operativo. La cultura clan, que ocupa el segundo lugar refleja relaciones más cercanas entre los miembros y un ambiente laboral que fomenta el trabajo en equipo y la cooperación. Aunque la cultura de mercado tiene un porcentaje significativo, no es el enfoque principal de la organización. Por último, la cultura adhocrática, con un 17.0 %, muestra una menor inclinación hacia la innovación y la toma de riesgos.

C. Comparar los resultados obtenidos en ambas empresas respecto al tipo de cultura predominante y las dimensiones evaluadas, con el fin de identificar similitudes, diferencias y posibles acciones de mejora.

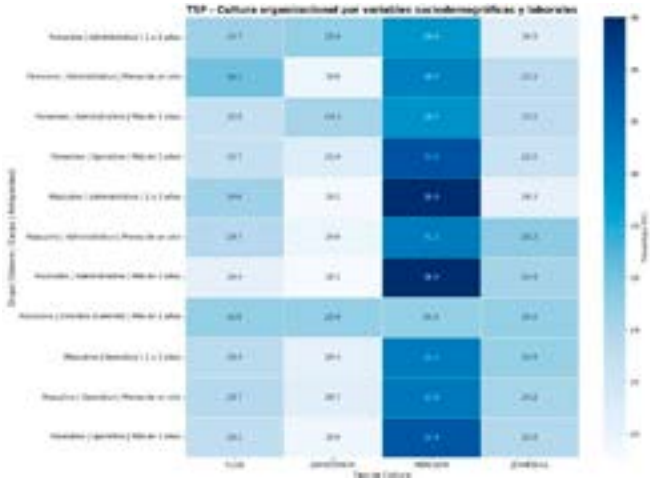


Fig 6. *Cultura organizacional según variables sociodemográficas y laborales en T.S.P. Ltda. Elaboración propia con base en datos procesados mediante Python.*

La Figura 6 muestra cómo se distribuyen los diferentes tipos de cultura organizacional en T.S.P. Ltda., teniendo en cuenta factores sociodemográficos y laborales como lo son el género, el cargo y la antigüedad en el trabajo. Los resultados indican que la cultura de mercado es la más común entre los grupos analizados, superando a las otras tipologías culturales evaluadas. Este patrón sugiere que la organización está principalmente enfocada en alcanzar metas, ser competitiva y mejorar su desempeño operativo. En el caso del personal masculino en el área administrativa con más de 3 años de antigüedad, se observó el mayor porcentaje de cultura de mercado, alcanzando un 36,0 %. Le sigue el grupo masculino administrativo con entre 1 y 3 años, que llegó al 35,9 %. De manera similar, en el personal operativo masculino con más de 3 años de antigüedad, la cultura de mercado alcanzó un 33,4 %, mientras que los trabajadores operativos con menos de un año y entre 1 y 3 años registraron valores de 31,4 % y 31,2 %, respectivamente. En cuanto a la participación femenina, también se notó un predominio de la cultura de mercado en los grupos analizados. En el personal operativo femenino con más de 3 años de antigüedad, esta cultura alcanzó un 33,8 %, mientras que en las trabajadoras administrativas con menos de un año se registró un 30,8 %. Estos resultados reflejan una orientación organizacional centrada en la productividad y el cumplimiento de objetivos. Por otro lado, la cultura adhocrática mostró los porcentajes más bajos en la mayoría de los grupos, lo que indica una menor inclinación hacia la innovación y la

flexibilidad organizacional. Además, las culturas clan y jerárquica presentaron valores intermedios, lo que sugiere relaciones de trabajo colaborativo y la existencia de procesos estructurados y supervisión organizacional.

Finalmente, el equipo directivo presentó una distribución equilibrada entre las cuatro tipologías culturales, con valores que rondan el 25 % en cada una de ellas.

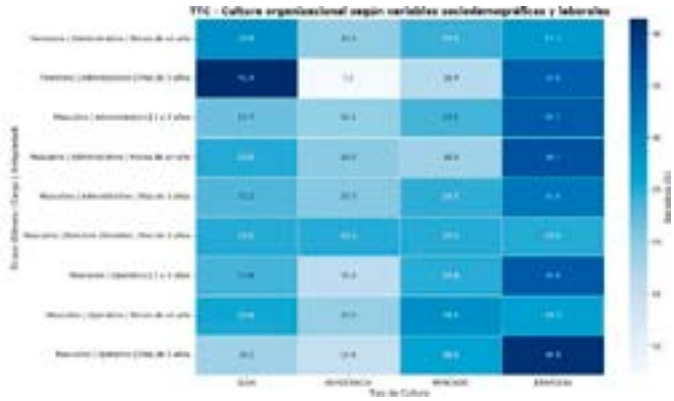


Fig 7 . *Cultura organizacional según variables sociodemográficas y laborales en TTC S.A.S. Elaboración propia con base en datos procesados mediante Python.*

La Figura 7 muestra cómo se distribuyen los diferentes tipos de cultura organizacional en TTC S.A.S., teniendo en cuenta factores sociodemográficos y laborales como el género, el cargo y la antigüedad en el trabajo. Los resultados revelan que la cultura jerárquica predomina en la mayoría de los grupos analizados lo que indica que la organización se enfoca en el control interno, el cumplimiento de normas y la estabilidad. Es relevante mencionar que el número de grupos observados en TTC S.A.S. fue menor en comparación con T.S.P. Ltda. debido al tamaño reducido de trabajadores en esta empresa y a cómo se distribuyen los trabajadores según género, cargo y antigüedad. Por esta razón, algunas combinaciones sociodemográficas y laborales no estaban representadas en la organización ya que son inexistentes. Entre el personal masculino operativo con más de 3 años de antigüedad, se encontró el mayor porcentaje de cultura jerárquica, alcanzando un 40,8 %. Además, en los trabajadores masculinos administrativos, los valores superaron el 35 % para este tipo de cultura, lo que evidencia una organización bien estructurada y enfocada en seguir procedimientos y mantener el control operativo. En cuanto a la participación femenina, el grupo administrativo con más de 3 años de antigüedad mostró un predominio de la cultura clan, alcanzando un 41,4 %, lo que refleja que hay relaciones laborales en términos de colaboración y dinámicas de integración. Sin embargo, en términos generales, la cultura jerárquica siguió siendo una de las más representativas dentro de la empresa. Por otro lado, la cultura de mercado mostró porcentajes intermedios, mientras que la cultura adhocrática registró los valores más bajos en la mayoría de los grupos evaluados, lo que indica una limitada orientación hacia la innovación y la flexibilidad organizacional. Finalmente, en el nivel directivo, se observó una distribución homogénea entre las cuatro tipologías culturales, con valores cercanos al 25 % en cada una, similar a lo que pasa en la empresa de T.S.P. Ltda.

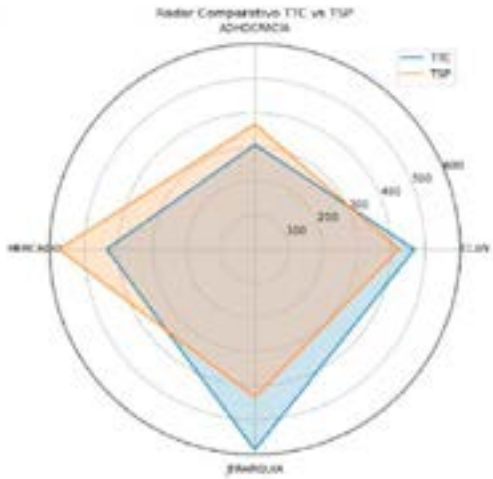


Fig 8. *Gráfico Radar comparativo de los tipos de cultura organizacional entre T.S.P. Ltda. y TTC S.A.S. Elaboración propia con base en datos procesados mediante Python.*

La Figura 8 ofrece una visión general de los perfiles culturales que predominan en ambas organizaciones. Los resultados muestran diferencias notables en la orientación cultural de las empresas, destacando una fuerte inclinación hacia la cultura de mercado en T.S.P. Ltda. y una clara preferencia por la cultura jerárquica en TTC S.A.S. Estas diferencias reflejan enfoques organizacionales distintos en la gestión de procesos y las dinámicas laborales. Mientras que T.S.P. Ltda. se enfoca más en el rendimiento, la productividad y el logro de objetivos, TTC S.A.S. tiene una estructura que prioriza el control interno, la supervisión y el cumplimiento de procedimientos. Además, en ambas empresas, la cultura adhocrática mostró los valores más bajos, lo que sugiere una escasa inclinación hacia la innovación. En contraste, la cultura clan presentó valores intermedios en las dos organizaciones, lo que indica que existen relaciones colaborativas y trabajo en equipo dentro de sus dinámicas internas.

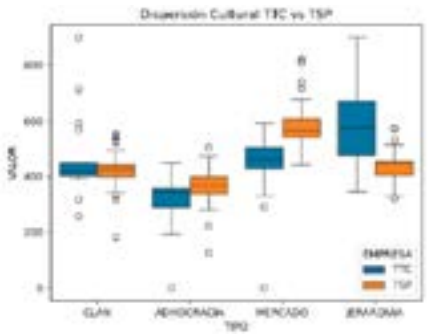


Fig 9. *Boxplot sobre la distribución de los tipos de cultura organizacional en T.S.P. Ltda. y TTC S.A.S. Elaboración propia con base en datos procesados mediante Python.*

La Figura 9 respalda lo anteriormente estipulado de la distribución y variación de las respuestas obtenidas para cada tipo de cultura. En T.S.P. Ltda., se notó una mayor concentración

de respuestas en la cultura de mercado, lo que sugiere que los trabajadores tienen una percepción organizacional más uniforme. Por otro lado, TTC S.A.S. mostró una mayor dispersión en la cultura jerárquica, lo que indica que hay diferencias en cómo los colaboradores perciben aspectos relacionados con el control y la estructura organizativa. Estos resultados nos dan a entender que, aunque ambas empresas operan en el mismo sector económico, tienen dinámicas culturales distintas que están ligadas a sus enfoques operativos y organizacionales.

V. DISCUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron identificar que las empresas T.S.P. Ltda. y TTC S.A.S. presentan perfiles culturales diferentes, cumpliendo así el objetivo de comparar la cultura organizacional y las dimensiones evaluadas mediante el instrumento OCAI, Estos hallazgos coinciden con lo planteado por Kim S. Cameron y Robert E. Quinn, quienes afirman que las organizaciones del modelo mercado suelen orientarse a resultados y productividad La predominancia de la cultura de mercado en T.S.P. Ltda. puede relacionarse con las exigencias del sector transporte y de hidrocarburos, donde el cumplimiento de indicadores, tiempos de operación y productividad son aspectos prioritarios. Por otra parte, la cultura jerárquica encontrada en TTC S.A.S. podría explicarse por la necesidad de mantener control operativo, supervisión constante y cumplimiento estricto de protocolos de seguridad, características comunes en empresas con procesos operativos estructurados.

Además, el análisis sociodemográfico mostró que hay una mayor participación de hombres en ambas organizaciones, especialmente en los roles operativos. Esta tendencia se alinea con la composición de género típica del sector del transporte, donde históricamente han predominado los hombres. Según el Boletín Estadístico del Registro Central de Personal (2022), en este sector, los hombres constituyen el 60,62 % y las mujeres el 39,38 % [14], un patrón que se refleja también en las empresas que se han estudiado. Esta predominancia masculina podría tener un impacto en las dinámicas organizacionales observadas, especialmente en culturas que se centran en el rendimiento operativo, el control y el logro de objetivos.

Como aspecto positivo, ambas organizaciones presentan culturas organizacionales claramente definidas y coherentes con sus dinámicas operativas. Además, se evidencian niveles moderados de cultura clan, lo cual favorece el trabajo en equipo y la integración laboral. Sin embargo, uno de los aspectos menos desarrollados en ambas empresas fue la cultura adhocrática, indicando una baja orientación hacia la innovación, creatividad y flexibilidad organizacional.

VI. CONCLUSIONES

La investigación evidenció que, aunque T.S.P. Ltda. y TTC S.A.S. pertenecen al mismo sector y operan en contextos similares, sus culturas organizacionales presentan enfoques claramente diferentes. T.S.P. Ltda. se caracteriza por una cultura de mercado orientada a la productividad, competitividad y cumplimiento de resultados, mientras que TTC S.A.S. refleja una cultura jerárquica enfocada en el control, la estabilidad y el seguimiento de procesos.

Los resultados permitieron confirmar que la cultura organizacional influye directamente en la forma en que se gestionan las dinámicas laborales y operativas dentro de las organizaciones prestadoras de servicio. Asimismo, se identificó una alta predominancia del género masculino y operativa en ambas organizaciones, característica propia del sector transporte de hidrocarburos, aunque con leves diferencias en la percepción cultural según género, cargo y antigüedad.

Finalmente, esta investigación nos demostró que, más allá de las diferencias estructurales, ambas empresas presentan una baja orientación hacia la innovación y la flexibilidad organizacional, evidenciando la oportunidad de fortalecer estrategias que promuevan mayor adaptación, participación y equilibrio entre desempeño operativo y desarrollo humano.

REFERENCIAS

[1] Agencia Nacional de Hidrocarburos, *Estadísticas del sector hidrocarburos en Colombia*. Bogotá, Colombia, 2024.

[2] S. P. Robbins y T. A. Judge, *Organizational Behavior*, 15th ed. Boston, MA: Pearson, 2013.

[3] K. S. Cameron y R. E. Quinn, *Diagnosing and Changing Organizational Culture: Based on the Competing Values Framework*, 2nd ed. San Francisco, CA: Jossey-Bass, 2006. **[4]** Agencia Nacional de Hidrocarburos, "Informe anual del sector hidrocarburos en Colombia," Bogotá, 2016.

[5] J. Monroy Neira, "Impactos socioambientales de la industria de hidrocarburos en Colombia," *Revista Ambiente y Desarrollo*, vol. 12, no. 1, pp. 33–50, 2018.

[6] A. Grimson, *Los límites de la cultura: Crítica de las teorías de la identidad*. Buenos Aires: Siglo XXI, 2013.

[7] Y. Yopan Fajardo, C. Pérez y D. Torres, "Transformaciones culturales en organizaciones contemporáneas," *Revista de Ciencias Sociales*, vol. 25, no. 2, pp. 78–92, 2019.

[8] R. Carro, M. Sarmiento y J. Rosano, "La cultura organizacional y su impacto en la sostenibilidad empresarial," *Revista Innovar*, vol. 27, no. 64, pp. 45–58, 2017.

[9] J. Martínez, L. Gómez y P. Rojas, "Cultura organizacional y motivación laboral en empresas

latinoamericanas," *Revista Administración y Desarrollo*, vol. 49, no. 1, pp. 90–105, 2019.

[10] D. R. Denison, *Organizational Culture and Effectiveness*. New York, NY: Wiley, 1990.

[11] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, "La mujer en el MITMA: diagnóstico de la situación actual," *Estrategia por la Igualdad del MITMA 2023-2026*, 2023.

Desarrollo y evaluación de un material de compuesto híbrido semiflexible con incorporación de residuos termoplásticos de cascos de motocicleta para la implementación de componentes de infraestructura

Miler Andres Rocha Suares
Programa de ingenieria civil
Universidad Piloto de Colombia
seccional del Alto magdalena
Girardot, Cundinamarca
miler-rocha@upc.edu.co

Mauricio Andrés Rivear Soto
Docente del programa ing civil
Universidad Piloto de Colombia
seccional del Alto magdalena
Girardot, Cundinamarca
mauricio-rivera1@unipiloto.edu.co

***Resumen*— En la actualidad, existe una gran necesidad de encontrar materiales de construcción que no solo sean duraderos, sino también más sostenibles y eficientes en su rendimiento dentro del campo de la Ingeniería Civil. Los pavimentos tradicionales y el concreto tienen algunas restricciones en la actualidad: por un lado, el concreto tiende a ser rígido y a fisurarse con facilidad; por otro lado, los pavimentos asfálticos son más flexibles, pero pueden tener problemas de mantenimiento y deformación a largo plazo. Esta circunstancia ha permitido proponer ideas diferentes que hagan posible la combinación de lo mejor de ambos materiales.**

El propósito de esta investigación es crear y analizar un material híbrido con propiedades semiflexibles que combine las características de los pavimentos y del concreto, incluyendo además residuos termoplásticos de cascos de motocicleta como una manera de utilizar este tipo de desechos.

Para ello, se propone una metodología basada en el diseño de mezclas a partir de un concreto convencional, al cual se le incorporan aditivos poliméricos y fibras, con el fin de mejorar y reforzar su comportamiento frente a la fisuración y aumentar su capacidad de deformación en la aplicación del pavimento. De igual manera, se plantea reemplazar parcialmente el agregado fino, en proporciones entre el 5% y el 10%, por material plástico triturado proveniente de cascos de motocicleta, previamente seleccionado y procesados correctamente como material de construcción. Las diferentes mezclas serán evaluadas mediante ensayos de laboratorio tanto en estado fresco como endurecido, incluyendo pruebas de asentamiento, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y comportamiento a fatiga.

Se espera obtener un material con un comportamiento intermedio, es decir, que no sea tan rígido como lo es el concreto tradicional, pero que tampoco pierda su capacidad de soportar cargas. Además, se prevé que presente una menor tendencia a la fisuración y un mejor desempeño frente a cargas repetidas, lo cual es importante en aplicaciones de pavimentos. También se considera que el uso de estos residuos puede contribuir a reducir el impacto ambiental.

A partir de lo anterior, este material se perfila como una alternativa para la implementación innovadora en elementos como adoquines, andenes, ciclo rutas o vías de bajo y medio tráfico en la cual se integran con beneficios mecánicos y ambientales.

El proyecto concuerda con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, contribuyendo con los siguientes con el ODS 12, al utilizar desechos plásticos de cascos de motocicleta; con el ODS 9, al crear un material novedoso para pavimentar; y con el ODS 11, al ofrecer soluciones sostenibles para la infraestructura de las ciudades. Adicionalmente, ayuda a alcanzar el ODS 13 al disminuir el efecto ambiental por medio de la reutilización de materiales y la gestión los recursos.

Palaras clave; Hibrido, Pavimentación, Termoplásticos, Dosificación, Sostenible

I. Introduction

En la ingeniería civil moderna, es prioritario encontrar materiales de construcción que logren un balance y una interacción entre sostenibilidad, rendimiento y durabilidad. Específicamente, la infraestructura vial, que requiere soluciones novedosas que sean capaces de reducir los problemas de fisuración y la ruptura de los tramos viales restricciones propias de los materiales convencionales, esto a su vez implica en tramos realizados con concreto, que pese a su resistencia, presenta rigidez y propensión a la fisuración, lo que puede poner en peligro la duración de las estructuras que pasan por ciclos de carga y descarga. Mientras que los pavimentos asfálticos, si bien son más flexibles, estos frecuentemente pueden afrontar dificultades con las deformaciones que pueden presentarse en condiciones extremas y el mantenimiento a largo plazo que si no se realiza puede generar fallos en su estructura.

En la búsqueda de estrategias que posibiliten la síntesis de los beneficios de ambos tipos de métodos y de materiales ha sido impulsada por este dilema entre rigidez y flexibilidad, dando lugar a la creación de materiales de compuestos híbridos. Estos con el fin de combinar las propiedades deseables del asfalto y el concreto en un único material que podría proporcionar una solución más adaptable y resistente para varios usos de elementos viales.

Además de que el hecho de que la preocupación por el impacto en el medio ambiente y de la acumulación de desechos esté aumentando a propulsado las investigaciones relacionadas con la valorización de residuos en la construcción.

Los residuos termoplásticos, que se producen en grandes cantidades y se descomponen lentamente, constituyen un sector importante para la economía circular. En este escenario, los cascos para motociclistas, al llegar al término de su vida útil, representan una fuente de desechos plásticos que, si reciben un tratamiento apropiado, tienen la posibilidad de convertirse en un recurso valioso para la construcción sostenible en Colombia.

El presente trabajo de investigación se centra en la el desarrollo y el análisis de un material compuesto híbrido semiflexible que utiliza desechos termoplásticos extraídos de cascos de motocicleta. No solo se busca optimizar las propiedades mecánicas y la resistencia a la fatiga del material resultante, sino también brindar una opción sostenible para el manejo de desechos, en consonancia con los principios de la ingeniería sostenible y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Esta trabajo describe la metodología sugerida, los ensayos a llevarse a cabo y las expectativas de rendimiento, delineando el potencial de este material para múltiples usos en la infraestructura vial tanto urbana como periurbana.

II. OBJETIVOS

II.I. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y evaluar un material compuesto híbrido semiflexible mediante la incorporación de residuos termoplásticos provenientes de cascos de motocicleta, con el fin de analizar su comportamiento físico y mecánico para su posible aplicación en elementos de infraestructura vial sostenibles.

II.II. OBJETIVO GENERAL

- Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los residuos termoplásticos provenientes de los cascos de motocicleta para determinar su viabilidad como un material de sustitución parcial para la mesclas cementantes.
- Diseñar mezclas experimentales de un material de compuesto hibrido semiflexible que incorpore residuos termoplásticos triturados y aditivos poliméricos en una matriz de concreto convencional.
- Evaluar el comportamiento físico y mecánico de las mezclas mediante ensayos de laboratorio en estado fresco y endurecido, incluyendo resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y comportamiento frente a fisuración.
- Análisis de la viabilidad técnica y ambiental del material desarrollado para su posible implementación en elementos de infraestructura vial como pavimentos, andenes, ciclo rutas o adoquines.

III. DEFINICION DEL PROBLEMA

Hoy en día, las vías y obras urbanas tienen varios problemas importantes, y uno de los más grandes es que los materiales que se usan habitualmente se dañan mucho antes de lo que deberían. Por ejemplo, el concreto hidráulico es muy fuerte y aguanta bien el peso, pero es muy rígido: si pasa mucho tráfico, cambia mucho la temperatura o se le aplica fuerza que lo estire, termina agrietándose con facilidad. Por el otro lado, los pavimentos flexibles se adaptan mejor y se deforman un poco sin romperse, pero con el tiempo se hunden o se desgastan muy rápido, y terminan costando mucho dinero en reparaciones y mantenimiento a largo plazo.

Al mismo tiempo, tenemos un problema ambiental cada vez más grave: la gran cantidad de plásticos y materiales termoplásticos que se generan y tardan muchísimos años en degradarse. Un caso muy particular es el de los cascos de motocicleta que ya no sirven. Están hechos principalmente de polímeros como el policarbonato y el ABS, y la mayoría de las veces se tiran a la basura sin reutilizarse ni aprovecharse para nada; terminan acumulados en los rellenos sanitarios y contaminando el entorno porque tardan siglos en desaparecer.

En Colombia, esto se ha vuelto un tema que requiere atención urgente. Como cada vez hay más motos circulando, la cantidad de cascos que se desechan cada año ha crecido muchísimo, lo que complica mucho la forma en que manejamos nuestros residuos. Lo curioso es que estos materiales tienen cualidades muy buenas y resistentes, pero hasta ahora casi no se les ha dado ningún uso dentro del sector de la construcción, a pesar de todo lo que podrían aportar.

Por todo esto, es muy necesario buscar opciones más sostenibles que nos permitan incorporar estos residuos termoplásticos en nuevos materiales para construir nuestras vías. Sin embargo, todavía sabemos muy poco sobre cómo funcionan realmente las mezclas o materiales compuestos semiflexibles que se hacen aprovechando los restos de estos cascos. No tenemos suficiente información sobre sus características físicas ni sobre qué tan fuertes o duraderos pueden ser.

Por eso, con esta investigación queremos crear y probar un nuevo material compuesto híbrido y semiflexible. La idea es mezclar una base de cemento modificada con trozos triturados de estos residuos de cascos. Lo que buscamos es analizar qué tan fuerte es, qué tanto resiste que se le formen grietas y ver si sirve realmente para construir obras viales más amigables con el ambiente, como pavimentos, aceras, ciclorrutas o adoquines.

IV. MARCO CONCEPTUAL

Este estudio nace de la necesidad de crear materiales para construcción que sean más eficientes y respetuosos con el medio ambiente, pensados especialmente para nuestras vías y obras públicas. Hoy en día, los pavimentos que usamos habitualmente tienen fallas importantes: el concreto hidráulico es muy duro, pero demasiado rígido, por lo que se agrieta con facilidad; en cambio, los pavimentos flexibles se adaptan mejor, pero terminan deformándose con el uso y terminan siendo muy costosos de mantener y reparar.

Por otro lado, también tenemos un gran reto ambiental: cada año se acumulan muchísimos residuos termoplásticos, entre ellos los cascos de motocicleta que ya no sirven. Estos objetos tardan muchísimo tiempo en degradarse y casi no se les da ninguna reutilización, aunque están hechos de materiales como el policarbonato y el ABS —muy resistentes y capaces de aguantar golpes y fuerzas fuertes— cualidades que serían muy útiles si se integraran en nuevos materiales para construir.

Por eso, con este proyecto queremos crear un material nuevo: una mezcla híbrida y semiflexible, hecha a partir de una base de cemento a la que le agregaremos trozos triturados de estos residuos plásticos. La meta es lograr algo que sea más dúctil, que no se agriete tan fácil y que aguante mucho mejor el paso constante de vehículos y el desgaste del día a día.

Además de ofrecer una alternativa innovadora para la ingeniería civil, este trabajo busca darle un uso valioso a esos residuos que normalmente terminan tirados, apoyando así modelos de economía circular y el cuidado del entorno. Este nuevo material podría servir perfectamente para hacer pavimentos para calles con tráfico liviano o medio, aceras, caminos para bicicletas o adoquines.

V. MARCO TEORICO

En la actualidad, se ha realizado múltiples implementaciones en la creación de materiales renovables para la construcción en la ingeniería civil esto es un gran significado, particular mente en la sostenibilidad y en el uso de desechos sólidos. En este contexto, los compuestos híbridos semiflexibles constituyen una opción novedosa, porque fusionan las características mecánicas de materiales rígidos, como el concreto, con la habilidad de deformarse y absorber energía de materiales poliméricos.

Es te tipo de materiales son considerados como materiales compuestos o de función por ser la unión de dos materiales o más, con propiedades químicos o físicas distintas. Cuando estas se unen, producen un material con rasgos que superan a los de sus partes individuales (Neville, 2011). En lo que respecta a los compuestos híbridos, se procura mejorar características como la durabilidad, la resistencia al impacto, la ductilidad y la resistencia mecánica; elementos esenciales para las aplicaciones de infraestructura urbana y vial teniendo en cuenta las normativas que especifica la (INVIAS , 2013)

Por otro lado, los desechos termo plásticos que contienen los cascos de motos se pueden considerar como un material reutilizable y también como una fuente de material prima secundaria para implementación de materiales constructivos.

Estos recursos suelen ser procesados con polímeros como el policarbonato o el acrilonitrilo butadieno, que lo ase una sólida estabilidad estructural como resistencia a los impactos, esto los hace ideal para su utilización en matrices compuestas. No solo ayuda a reducir el impacto ambiental de su disposición final la inclusión de estos desechos, sino que además hace posible que se mejoren algunas características del material resultante, por ejemplo, la resistencia a fisuración y la tenacidad (Sperling, 2005)

VI. MARCO CONCEPTUAL

Materiales hidridos semiflexibles

Son considerados como un conjunto de materiales que forman un solo grupo que está compuesto por métodos de función de materiales con la habilidad de resistir los sistemas rígidos y flexibles, permitiendo una mejor distribución de esfuerzos y mayor resistencia a la fatiga. Su desarrollo ha sido

impulsado por la necesidad de mejorar el desempeño de pavimentos sometidos a cargas repetitivas y son capases de deformarse sin romperse disminuyendo las rupturas o agrietamientos. (Cabeza, 2020)

Incorporacion de polimeros en concretos

La resistencia a la fisuración y la tenacidad del hormigón pueden incrementarse al agregarle materiales poliméricos. Investigaciones han evidenciado que estos materiales funcionan como disipadores de energía en la matriz cementante, lo cual incrementa de manera significativa la durabilidad, la adherencia y la resistencia a la flexión, disminuyendo así las fisuras. Se incorporan en proporciones convencionales del concreto polimérico (PC) o como aditivo modificador (PMC), lo que genera una red interior que sella los poros y hace más flexible el material (Adeshina & Mohamed, 2024).

Tenacidad y ductilidad

La tenacidad de acuerdo a (Olanrewaju, 2023) es la capacidad de un material para absorber energía antes de fracturarse evitando fallos y haciendo que solo se desgaste, mientras que la ductilidad corresponde a la habilidad de deformarse sin presentar ruptura inmediata haciendo que su durabilidad se a larga. Estas propiedades son fundamentales en materiales destinados a infraestructura vial, ya que permiten soportar esfuerzos dinámicos y variaciones de carga sin que ocurran fallos frágiles.

En la actualidad, el concreto convencional, la baja ductilidad genera comportamientos rígidos y una alta susceptibilidad a la fisuración. Por esta razón, se ha realizado numerosas innovaciones en la creación de mejorar el concreto convencional, la incorporación de materiales poliméricos y fibras sintéticas se ha convertido en una estrategia importante para mejorar el comportamiento mecánico del concreto, estos procesos incrementan la capacidad de deformación y resistencia al impacto.

VII. Metodologia

En esta investigación, se llevará a cabo un diseño experimental que tiene como objetivo evaluar el comportamiento mecánico y físico de un material de tipo compuesto híbrido semiflexible. Este procedimiento consiste principal mente aprovechando un material reutilizable considerado como un desecho termoplástico de cascos de motocicleta a una mezcla de concreto híbrido. La investigación tiene como objetivo examinar la factibilidad técnica de este material como opción para aplicaciones en infraestructura vial, considerando elementos vinculados a la sostenibilidad, la resistencia mecánica y el comportamiento frente a cargas repetitivas. Todo esto se realiza tomando en consideración las normas relacionadas con el diseño de mezclas de concreto ACI y de invias para la construcción de vías.

El diseño experimental se plantea a partir de una mezcla de concreto convencional, la cual servirá como referencia para comparar las propiedades obtenidas en las mezclas modificadas. A partir de esta base, se realizarán sustituciones parciales del agregado fino mediante incorporación de material termoplástico triturado proveniente de cascos de motocicleta en proporciones aproximadas entre el 5 % y el 10 %, porcentajes definidos con base en antecedentes técnicos y estudios relacionados con concretos modificados con polímeros reciclados.

La investigación no se limitará únicamente a evaluar la sustitución del material, sino también la influencia que tiene el tratamiento y procesamiento del residuo termoplástico sobre las propiedades del compuesto híbrido. Para ello, el material plástico será sometido a procesos de limpieza, trituración y clasificación granulométrica antes de ser incorporado a la mezcla.

La metodología se encuentra en una etapa experimental en la cual se estructurará en diferentes fases de desarrollo, las cuales permitirán obtener información progresiva sobre el desempeño del material y establecer comparaciones entre las mezclas modificadas y el concreto convencional de referencia. Para ello, se elaborarán probetas cilíndricas y prismáticas que serán sometidas a diferentes ensayos de laboratorio en estado fresco y endurecido.

Entre los ensayos contemplados a realizar se encuentran:

- Ensayo de asentamiento.
- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la flexión.
- Módulo de elasticidad.
- Evaluación de fisuración.
- Comportamiento frente a fatiga y cargas repetitivas.

Mediante estos ensayos se buscara la determinación del desempeño estructural del material como de la posible aplicación en soluciones.

A través de estos ensayos se buscará determinar el desempeño estructural del material y su posible aplicación en soluciones constructivas sostenibles relacionadas con pavimentos, andenes, ciclo rutas y elementos urbanos prefabricados.

VII.I. ENFOQUE DE LA INVESTIGACION

El componente cuantitativo se centrará en examinar las propiedades del concreto común en comparación con las mezclas que han sido alteradas al añadir residuos termoplásticos

de cascos de motocicletas. Para tal fin, se examinarán las variables que estén relacionadas con:

- Resistencia a nivel mecánico.
- Desfiguración.
- Inflexibilidad.
- Capacidad de trabajo.
- Resistencia.
- Conducta ante cargas que se repiten.

Los resultados que se determinar con los laboratorios posibilitarán la identificación del impacto de los residuos termoplásticos en su implementación con respeto en el rendimiento estructural del material y establecer si hay una mejora en lo que respecta a la ductilidad y a la resistencia a las fisuras.

Asimismo, el estudio esta también ligado con la protección del medio ambiente y la sostenibilidad del propuesta. En esta línea, se analizará la viabilidad de utilizar residuos sólidos que son difíciles de degradar en materiales de construcción, lo que contribuiría a las estrategias de economía circular y a disminuir el impacto medioambiental causado por los desechos plásticos. Según la investigación de (Nuñez & Feijo, 2007) y sus colegas acerca de las metodologías empleadas en la investigación, los enfoques mixtos posibilitan que se combinen datos experimentales y descriptivos para entender no solo el comportamiento técnico, sino también el efecto social y medioambiental de una propuesta de investigación. A pesar de que la investigación es mayormente cuantitativa, se incluye en este caso un análisis descriptivo sobre la sostenibilidad del material y su posible utilización en soluciones constructivas innovadoras.

VI.II. RECOLECION Y PROCESAMIENTO DE RESIDUOS TERMOPLASTICOS

En la primera etapa del desarrollo del proyecto se realizará con la obtención del material de sustitución de la mezcla que son los cascos de motocicleta desechables que se pueden conseguir directamente en talleres, centros comerciales, tiendas de lujos de motocicletas, centros de reciclaje y basureros de residuos plásticos. Posteriormente, se desarrollará una clasificación de los tipos de cascos que se obtuvieron, determinando la cantidad de materiales reutilizables que se pueden reutilizar y descartar elementos contaminados o deteriorados que puedan alterar el comportamiento de las mezclas.

De acuerdo con los cascos de motocicleta contienen generalmente polímeros termoplásticos como policarbonato (PC) y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), estos materiales son la causa que permite que los cascos sean resistentes ante impactos y son duraderos estos presentan también buena estabilidad estructural, razón por la cual resultan adecuados para investigaciones relacionadas con materiales compuestos. Diversos estudios como el de han demostrado que los residuos plásticos incorporados en mezclas cementantes pueden contribuir a mejorar la absorción de energía y disminuir la propagación de fisuras dentro del concreto.

Después de la clasificación, los residuos serán sometidos a un proceso de limpieza manual y mecánica para retirar impurezas, pintura deteriorada, espumas internas y componentes metálicos. Después, el plástico será triturado a través de métodos mecánicos hasta que se logren partículas de tamaño parecido a las que se usan en los agregados finos tradicionales, para luego almacenar el material triturado bajo condiciones secas y controladas para evitar contaminación o alteraciones físicas antes de su incorporación en las mezclas experimentales.

VIII. RESULTADOS ESPERADOS

A. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL MATERIAL

Con todo el trabajo y las pruebas que haremos en esta investigación, el objetivo es lograr un material híbrido y semiflexible que reúna lo mejor de dos mundos: la gran resistencia mecánica del concreto que usamos habitualmente, y la capacidad de adaptarse y absorber impactos que nos dan los residuos termoplásticos que sacamos de los cascos de moto.

Vamos a probar distintas fórmulas y mezclas en el laboratorio, y evaluaremos cómo se comporta este material ante situaciones idénticas a las que enfrenta cualquier obra vial en la vida real. Así podremos comparar su rendimiento con el del concreto tradicional, para ver si realmente logramos mejorarlo en aspectos clave: que sea más fuerte, más flexible y, sobre todo, que se agriete mucho menos.

También queremos saber exactamente cómo cambian las características del material al agregarle estos residuos: por ejemplo, qué tan fácil es trabajarlo al momento de construir, cuánto puede deformarse sin romperse y qué tan bien aguanta el paso constante de vehículos y el desgaste del tiempo. Todo esto nos dirá si es realmente viable y útil para construir de forma más sostenible.

B. DELIMITACIÓN DEL MATERIAL Y APLICACIÓN

Este proyecto está centrado en la creación de un material compuesto híbrido semiflexible, en la cual está diseñado fundamentalmente para ser usado en obras de infraestructura vial de las ciudades, así como en vías con niveles de tráfico bajos o medios.

El trabajo de investigación se enfocará en probar mezclas donde se reemplaza parte del agregado fino —uno de los componentes habituales del concreto— por partículas trituradas de material termoplástico extraídas de cascos de motocicleta

que ya no se utilizan. Estas sustituciones se harán en proporciones que irán aproximadamente del 5 % al 10 % del volumen total.

Con base a todo esto se obtendrá las pruebas y análisis, en la cual se buscará establecer cuáles son las cantidades más adecuadas para lograr un buen equilibrio: que el material sea resistente, que tenga la flexibilidad necesaria y que, al mismo tiempo, sea una opción amigable con el medio ambiente. Además, el estudio permitirá identificar en qué elementos constructivos se puede emplear este nuevo material, entre ellos:

- Andenes para el tránsito de peatones.
- Vías exclusivas para bicicletas.
- Adoquines para pavimentación.
- Calzadas con tráfico liviano o medio.
- Piezas prefabricadas para uso urbano.

C. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental estará basado principal mente en la elaboración y comparación de diferentes mezclas modificadas en la cual mediante la incorporación de residuos termoplásticos y aditivos poliméricos dentro de una matriz cementante convencional,

C.A. Preparación del material termoplástico

Los residuos de cascos de motocicleta serán recolectados por medios propios en el cue ubicarán los lugares en donde haya mayor flujo de obtención de él, seleccionados y triturados mecánicamente hasta obtener partículas con tamaño adecuado para su incorporación parcial dentro de la mezcla. Posteriormente, el material será clasificado y acondicionado para garantizar uniformidad granulométrica.

C.B. Elaboración de mezclas

Las mezclas experimentales serán desarrolladas tomando como referencia una dosificación convencional de concreto. Sobre esta mezcla base se incorporarán porcentajes controlados de material termoplástico triturado, además de fibras y aditivos poliméricos que permitan mejorar la ductilidad y resistencia a la fisuración.

C.C. Ensayos en estado fresco

En esta etapa se espera evaluar propiedades relacionadas con trabajabilidad y manejabilidad del material mediante ensayos de asentamiento y consistencia, permitiendo identificar el efecto que genera la incorporación del material termoplástico sobre el comportamiento inicial de la mezcla.

C.D. Ensayos mecánicos

Una vez que las mezclas ya estén secas y endurecidas, se llevarán al laboratorio para someterlas a distintas pruebas y medir sus cualidades principales:

- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la flexión.
- Módulo de elasticidad.
- Comportamiento frente a fisuración.
- Respuesta ante cargas repetitivas.

Con todos estos datos, se podrá saber cuál es la mezcla que mejor rendimiento tiene y la que más sirve para usarla en proyectos de infraestructura vial.

C.E. Comportamiento sostenible del material

Desde el punto de vista ambiental, lo que se quiere demostrar es que darles una nueva utilidad a estos residuos plásticos de los cascos ayuda mucho a reducir el impacto negativo que generan, ya que son materiales que tardan muchísimo en degradarse y suelen acumularse en grandes cantidades.

En general, este estudio busca impulsar modelos de economía circular dentro de la ingeniería civil, mostrando cómo se pueden reutilizar materiales reciclados para crear nuevos productos útiles para la construcción.

Como resultado final de todo este trabajo, se espera dejar definida una propuesta técnica inicial, que sirva de guía para empezar a usar este material híbrido semiflexible en distintas obras y elementos de nuestras ciudades y vías.

Este nuevo material tiene gran potencial para ser empleado en lugares como calles con tráfico liviano, caminos peatonales, andenes, vías para bicicletas o en la fabricación de adoquines; espacios donde es fundamental encontrar un punto medio entre que sea lo suficientemente fuerte, que pueda adaptarse sin romperse y que, además, sea una opción respetuosa con el medio ambiente.

Por otro lado, todo lo que se logre averiguar y comprobar con este estudio servirá como una base sólida para que otros investigadores o profesionales sigan avanzando en el futuro, trabajando en nuevos materiales sostenibles y buscando más formas útiles de reutilizar residuos termoplásticos dentro del sector de la construcción.

D. PROTOTIPO Y POSIBLE IMPLEMENTACIÓN

Como resultado final de todo este trabajo, se espera dejar definida una propuesta técnica inicial, que sirva de guía para empezar a usar este material híbrido semiflexible en distintas obras y elementos de nuestras ciudades y vías.

Este nuevo material tiene gran potencial para ser empleado en lugares como calles con tráfico liviano, caminos peatonales,

andenes, vías para bicicletas o en la fabricación de adoquines; espacios donde es fundamental encontrar un punto medio entre que sea lo suficientemente fuerte, que pueda adaptarse sin romperse y que, además, sea una opción respetuosa con el medio ambiente.

Por otro lado, todo lo que se logre averiguar y comprobar con este estudio servirá como una base sólida para que otros investigadores o profesionales sigan avanzando en el futuro, trabajando en nuevos materiales sostenibles y buscando más formas útiles de reutilizar residuos termoplásticos dentro del sector de la construcción.

IX. CONCLUCIONES

Elaborar este material compuesto híbrido semiflexible, usando residuos termoplásticos que salen de cascos de motocicleta, es sin duda una propuesta innovadora para la ingeniería civil y para construir obras viales más amigables con el ambiente. Al mezclar materiales de uso habitual como el cemento con estos componentes plásticos reciclados, logramos una solución que une dos cosas muy importantes: que sea fuerte y resistente, que pueda adaptarse y deformarse sin romperse, y al mismo tiempo, que les dé un buen uso a unos residuos que de otra forma tardarían muchísimo tiempo en degradarse.

Definir bien todos los criterios técnicos y los pasos experimentales nos permitió organizar cómo se harían las mezclas, todo pensado para analizar cómo funciona este material en la práctica: cómo reacciona cuando se le carga peso muchas veces seguidas, qué tan fácil se le forman grietas y qué tanto dura con el paso del tiempo. La idea de agregar estos restos plásticos triturados es precisamente lograr que sea más flexible, que absorba mejor los impactos y que las grietas no se extiendan tan rápido, ventajas que no se ven con tanta claridad en el concreto tradicional.

Mirándolo desde el lado ambiental, este proyecto es una forma inteligente de darle valor a esos cascos que ya no sirven. Se trata de aplicar lo que se conoce como economía circular: en lugar de que se acumulen y contaminen, se vuelven materia prima nueva. Así, ayudamos a reducir un poco el daño que genera la gran cantidad de plásticos que desechamos cada día.

Por eso, este estudio no solo busca crear un material que sirva para las vías, sino también aportar soluciones reales para cuidar el entorno y manejar mejor nuestros residuos.

Todas las pruebas que se harán en el laboratorio nos dirán con seguridad si es viable usarlo en distintas obras de la ciudad: por ejemplo, en calles con tráfico liviano o medio, en andenes, caminos para bicicletas o adoquines. Son espacios donde se necesita justo eso: que aguanten bien, que no se dañen fácil y que duren mucho tiempo.

Por lo que este trabajo es una propuesta de investigación que une innovación, cuidado del ambiente y creación de nuevos materiales para construir. Lo que se logre aquí servirá como base técnica para que en el futuro se siga estudiando este tipo de mezclas con material reciclado, y para que poco a poco se empiecen a usar en obras de construcción y vías en todo Colombia.

X. REFERENCIAS

Adeshina, A., & Mohamed, I. (4 de JULIO de 2024). Hormigón reforzado con polímeros: una revisión exhaustiva de las innovaciones y las vías para obtener materiales resistentes y sostenibles. *ELSEVIER*.Cabeza, M. (2020). *Enciclopedia de materiales renovables y sostenibles.* Bogota: Copyright.

INVIAS . (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras.* Bogota : Ministerio de Transporte de Colombia .

Neville, M. A. (2011). *Tecnología del concreto (2ª ed.).* Mexico : Trillas .

Nuñez, S., & Feijo, F. (2007). *Introducción a la investigación cualitativa.* Bogota : Morata .

Olanrewaju, S. (27 de 02 de 2023). FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA: Repaso: Ductilidad, Deformación y Tenacidad. *Fictiv*, pág. 11.

Sperling, L. (2005). *Introducción a la ciencia física de los polímeros (4.ª ed.).* Estados Unidos : WILEY-Interscience.

Aprendizaje Basado en Problemas como Estrategia para el Desarrollo de Competencias de Orden Superior en Ingeniería Industrial: una Propuesta para la Universidad de Córdoba

1st Sebastián Hernández Mestra
Dept. de Ingenieria Industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
shernandezmestra72@correo.unicordoba.edu.co.

2nd María Mercedes Vertel Ramos
Dept. de Ingenieria Industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
mvertelramos64@correo.unicordoba.edu.co.

3rd Heidi Maria Echeverri Florez
Dept. De Ingenieria Industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
hecheverri@correo.unicordoba.edu.co

Resumen— La educación en ingeniería continúa enfrentando un desafío estructural: a pesar de la evidencia sobre la efectividad de las metodologías activas, persisten modelos tradicionales de enseñanza centrados en la transmisión de conocimientos, lo que limita el desarrollo de competencias de orden superior, como el pensamiento crítico, el análisis de sistemas y la resolución de problemas en contextos reales.

Este estudio propone el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) como una estrategia pedagógica para fortalecer estas competencias en los estudiantes de Ingeniería Industrial de la Universidad de Córdoba, promoviendo además la creatividad y la motivación hacia el aprendizaje.

La propuesta se fundamenta en una revisión sistemática de la literatura publicada entre 2020 y 2024, con el objetivo de identificar evidencia sobre el impacto del ABP en el rendimiento académico, la motivación estudiantil y el desarrollo de competencias en ingeniería. Los resultados de la revisión muestran que el ABP favorece el aprendizaje activo, posiciona a los estudiantes como agentes centrales del proceso de aprendizaje y contribuye al desarrollo tanto de competencias técnicas como de habilidades blandas, a pesar de las limitaciones asociadas a su implementación en contextos tradicionales.

Con base en estos hallazgos, se propone un diseño metodológico que incluye la formulación de problemas basados en contextos industriales reales, el trabajo colaborativo y la evaluación formativa centrada en los procesos de aprendizaje.

Se concluye que el ABP constituye una estrategia pertinente para transformar las prácticas pedagógicas en ingeniería, proporcionando tanto un fundamento conceptual como aplicado para su implementación en el programa de Ingeniería Industrial de la Universidad de Córdoba.

Palabras clave— Aprendizaje Basado en Problemas, educación en ingeniería, competencias de orden superior, metodologías activas.

I. INTRODUCCION

La educación en ingeniería enfrenta una tensión estructural bien documentada: aunque las metodologías activas han demostrado ser más efectivas para el desarrollo de competencias profesionales, el modelo magistral sigue predominando en una parte importante de los programas de ingeniería en Colombia y Latinoamérica [8], [9]. Esta realidad tiene consecuencias concretas: un ingeniero industrial que egresa sin experiencia real en la resolución de problemas complejos llega al mundo laboral con herramientas insuficientes. Fernández y Duarte [5] describieron esta brecha como una «poca incidencia de los futuros ingenieros en la solución de problemas del entorno», evidenciando la distancia entre lo que el mundo laboral exige y lo que la universidad forma.

El Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) ha emergido como una de las respuestas pedagógicas más sólidamente fundamentadas para cerrar esta brecha. A diferencia del método tradicional donde primero se expone la información y luego se busca su aplicación, en el ABP el problema es el punto de partida del proceso: el estudiante identifica lo que ya sabe, lo que necesita aprender y cómo obtener esa información, trabajando de manera colaborativa en grupos pequeños con el docente en rol de facilitador [10]. Este esquema activa de forma natural las competencias de orden superior análisis, evaluación y creación según la Taxonomía de Bloom revisada que el modelo magistral difícilmente puede desarrollar.

Este trabajo presenta una propuesta de intervención pedagógica basada en el ABP orientada a la asignatura de Investigación de Operaciones I del programa de Ingeniería Industrial de la Universidad de Córdoba. La elección de esta asignatura responde a tres razones: su naturaleza orientada a la optimización y toma de decisiones encaja de forma natural con la lógica del ABP; sus contenidos programación lineal, teoría de colas, simulación, gestión de inventarios tienen aplicación directa en el sector productivo de Córdoba y la región Caribe; y es la asignatura con mayor índice de repitencia del programa, lo que evidencia una necesidad pedagógica urgente.

La propuesta no implica modificar el syllabus ni la estructura curricular existente. Incorpora el ABP como estrategia complementaria, articulando el contenido disciplinar con escenarios problemáticos reales del entorno industrial regional, sin sustituir los mecanismos evaluativos actuales de la asignatura. Este artículo documenta la fundamentación teórica, el diseño metodológico y los resultados esperados de la propuesta, con el objetivo de contribuir a la transformación de las prácticas pedagógicas en el programa y aportar evidencia contextualizada a un vacío identificado en la literatura: la escasez de estudios sobre ABP en programas de ingeniería de universidades regionales colombianas, particularmente en la Costa Caribe [2], [11].

II. Justificacion

A. Relevancia del Problema Pedagógico

La brecha entre las competencias que la industria exige a los ingenieros industriales y las que el modelo magistral desarrolla efectivamente es un problema documentado en múltiples latitudes. En Colombia, estudios como el de Fernández y Duarte [5] han evidenciado que los egresados de programas de ingeniería presentan limitaciones en la resolución de problemas complejos y en la integración interdisciplinar de conocimientos, justamente las competencias que el ejercicio profesional más demanda. Esta limitación es particularmente crítica en el contexto de Córdoba y la región Caribe, donde el desarrollo productivo regional exige ingenieros capaces de analizar sistemas complejos logística agroindustrial, gestión de residuos, optimización en PYMES y proponer soluciones pertinentes y factibles.

El modelo magistral, centrado en la transmisión de contenidos, limita estructuralmente el desarrollo de competencias de orden superior. El estudiante recibe información, la memoriza y la aplica en ejercicios predefinidos, pero raramente enfrenta la incertidumbre, la ambigüedad y la complejidad propias de los problemas reales del entorno industrial. El ABP, al plantear problemas abiertos vinculados a situaciones reales, activa de forma natural los procesos cognitivos de análisis, evaluación y creación que estas situaciones requieren [1], [8].

B. Beneficiarios y Relevancia Social

La propuesta tiene tres categorías de beneficiarios directos. Los estudiantes de Investigación de Operaciones I son los beneficiarios inmediatos: desarrollan competencias de orden superior al aplicar modelos de optimización a problemas auténticos del entorno industrial regional, fortaleciendo su motivación intrínseca y su capacidad de aprendizaje autónomo. Los docentes del programa cuentan con un modelo estructurado de intervención que reduce la incertidumbre frente al cambio metodológico, con fases claras, instrumentos de evaluación definidos y evidencia empírica que lo respalde. El sector productivo y la sociedad de Córdoba y la región Caribe se benefician de egresados mejor preparados para contribuir al desarrollo regional, capaces de identificar, formular y resolver problemas reales del entorno industrial.

C. Vacío en la Literatura y Aporte Teórico

La revisión sistemática realizada evidenció un vacío específico en la literatura: aunque abundan las revisiones globales y latinoamericanas sobre ABP en ingeniería [2], [6], [11], los estudios empíricos sobre su implementación en programas de ingeniería de universidades regionales colombianas y especialmente en la Costa Caribe son escasos. Esta investigación contribuye a llenar ese vacío, aportando evidencia contextualizada que puede generalizarse a programas similares en otras universidades regionales y enriqueciendo la teoría constructivista del aprendizaje con evidencia empírica en un contexto aún poco explorado [1], [8].

D. Utilidad Metodológica

La propuesta aporta dos instrumentos concretos replicables. El diseño de la intervención pedagógica con sus tres momentos, cuatro puntos de control y el sistema de evaluación tripartita constituye un modelo estructurado adaptable a otras asignaturas y programas afines. Los indicadores propuestos para medir el impacto sobre las competencias de orden superior permiten evaluar de forma sistemática variables que habitualmente se valoran de manera subjetiva, en línea con lo que García [4] denomina evaluación auténtica orientada al aprendizaje.

III. Marco Teorico

A. El ABP en la Formación de Ingenieros

El Aprendizaje Basado en Problemas es una pedagogía centrada en el estudiante en la que el aprendizaje se construye a partir de la experiencia de resolver un problema abierto vinculado preferentemente a situaciones reales. A diferencia del método tradicional, en el ABP el problema es el punto de partida del proceso: el estudiante identifica lo que ya sabe, lo que necesita aprender y cómo obtener esa información, trabajando de manera colaborativa en grupos pequeños con el docente en rol de facilitador [10]. Este proceso no se centra en la resolución de problemas con una solución definida, pero permite el desarrollo de otras habilidades y atributos deseables como la adquisición de conocimientos, la mejora de la colaboración grupal y la comunicación [2].

Razo-Abundis, Dibut-Toledo y Portal-Gallardo [8], artículo base de esta investigación, argumentan desde una perspectiva constructivista que el ABP posiciona al estudiante como constructor activo de su propio conocimiento, enfrentando retos que le permiten desarrollar habilidades de pensamiento crítico, creatividad e innovación, trabajo en equipo y construcción conjunta del conocimiento. Esta perspectiva conecta con el constructivismo piagetiano y vygotskiano, que plantea que el aprendizaje no es una transferencia de información sino una construcción activa de significados, potenciada cuando el estudiante interactúa con problemas auténticos y con sus pares [1].

Barak [1] precisa que el ABP se distingue del aprendizaje basado en proyectos (PjBL) y del aprendizaje basado en diseño (DBL) en que su énfasis central es la creación y aplicación de conocimiento a través de la indagación ante un problema abierto, no necesariamente la construcción de un artefacto o sistema. Esta claridad conceptual delimita el alcance de la presente propuesta: no se trata de un proyecto de diseño de ingeniería, sino de un proceso pedagógico estructurado en el que el problema real del entorno industrial actúa como detonante del aprendizaje disciplinar e interdisciplinar.

En el campo de la ingeniería, la lógica del ABP resulta especialmente pertinente, ya que el ejercicio profesional del ingeniero es, en esencia, un proceso continuo de identificación y resolución de problemas complejos del entorno [5]. Rösiö y Andersen [10] lo han aplicado con éxito en programas de ingeniería de manufactura, confirmando que el ABP en educación continua de ingeniería mejora significativamente la capacidad de los profesionales para transferir conocimiento a nuevos contextos productivos.

B. Competencias de Orden Superior en Ingeniería Industrial

Las competencias de orden superior corresponden a las capacidades que, según la Taxonomía de Bloom revisada, se ubican en los niveles de análisis, evaluación y creación. Incluyen el pensamiento crítico, el análisis sistémico, la resolución de problemas complejos, la toma de decisiones fundamentadas y la comunicación técnica efectiva [6]. El ingeniero industrial en el entorno productivo de la región Caribe colombiana debe ser capaz no solo de conocer y comprender conceptos, sino de aplicarlos, analizarlos y crear soluciones pertinentes en contextos reales y cambiantes.

La revisión sistemática de literatura realizada entre 2020 y 2024 confirma que el ABP produce mejoras significativas precisamente en estas competencias. Mayorga-Ases et al. [6] señalan que enfoques como el ABP ofrecen beneficios significativos en el rendimiento académico y en el desarrollo de habilidades blandas trabajo en equipo, comunicación, liderazgo que el modelo magistral difícilmente puede desarrollar. Las revisiones de literatura latinoamericana [2], [11] añaden que el ABP promueve mayor autonomía, motivación y pensamiento crítico en estudiantes universitarios cuando es aplicado de manera contextualizada y con soporte institucional adecuado.

En el contexto específico de la ingeniería industrial, el desarrollo de competencias de orden superior adquiere una dimensión adicional: el ingeniero debe integrar conocimientos de múltiples disciplinas producción, logística, gestión, estadística, economía para analizar sistemas complejos y proponer mejoras. El ABP, al plantear problemas que no tienen una solución única ni predefinida, activa de forma natural esta integración interdisciplinar, de tal modo que el aprendizaje no se da en fracciones sino de manera integral y dinámica [5].

C. Evaluación Formativa como Componente Integral del ABP

El diseño metodológico de esta propuesta contempla mecanismos de evaluación formativa que permitan valorar no solo los productos, sino los procesos de aprendizaje. Esta distinción es esencial: la evaluación formativa no busca calificar un resultado final, sino acompañar y orientar el proceso de aprendizaje mediante retroalimentación oportuna y continua [4]. García [4] señala que la evaluación auténtica aquella que valora desempeños en contextos similares a los de la práctica profesional y la retroalimentación formativa son las herramientas más poderosas para mejorar el aprendizaje en educación superior.

En el modelo ABP adaptado de Fernández y Duarte [5] para ingeniería colombiana, el componente evaluativo contempla tres modalidades complementarias articuladas como sistema: la autoevaluación, donde el propio estudiante reflexiona sobre su desempeño y proceso; la coevaluación, evaluación entre pares que fomenta el pensamiento crítico y la responsabilidad compartida; y la heteroevaluación, valoración docente del informe escrito y la sustentación oral. Esta triada no solo genera información más completa sobre el aprendizaje, sino que en sí misma constituye una experiencia formativa que desarrolla metacognición y capacidad de análisis crítico. Ramírez-Quintero y Rojas-Gámez [7] añaden que los sistemas de evaluación contextualizados en Latinoamérica han mostrado mayor capacidad para revelar la brecha entre competencias declaradas y competencias en uso, lo que refuerza la pertinencia de este modelo tripartito en el contexto colombiano.

D. El ABP en el Contexto Colombiano y Regional

La implementación del ABP en programas de ingeniería colombianos tiene antecedentes documentados con resultados positivos. Fernández y Duarte [5] documentaron mejoras medibles en todas las competencias evaluadas tras la implementación del ABP en ingeniería electromecánica en Colombia, con un modelo de tres momentos que ha servido de referente para múltiples propuestas posteriores. Más recientemente, Rodríguez Serrano, Maya Restrepo y Jaén Posada [9] han analizado la transición de las clases magistrales hacia pedagogías del aprendizaje activo en ingeniería colombiana, confirmando que el cambio metodológico enfrenta resistencias institucionales pero genera transformaciones sostenibles cuando se implementa de forma incremental y con soporte docente adecuado.

En el contexto latinoamericano más amplio, Caballero Meneses et al. [2] y Seguel-Arriagada, Torres-Valderrama y Jiménez Pérez [11] aportan revisiones sistemáticas recientes que confirman el impacto positivo del ABP en el aprendizaje significativo en ingeniería, identificando como factores de éxito la contextualización de los escenarios problemáticos, la formación del docente como facilitador y la coherencia entre la metodología y el sistema evaluativo. Estos hallazgos orientan directamente el diseño de la propuesta presentada en este trabajo

IV. Metodologia

A. Enfoque y Diseño de Investigación

La investigación adopta un enfoque proyectivo, apoyado en un diseño de investigación documental. El componente documental se concreta en la revisión sistemática de literatura, que proporciona la base empírica y teórica de la propuesta; el componente proyectivo se expresa en el diseño estructurado de una intervención pedagógica orientada a su futura implementación en la asignatura de Investigación de Operaciones I.

B. Revisión Sistemática de Literatura (2020–2024)

La revisión sistemática se realizó siguiendo los principios del protocolo PRISMA, con búsqueda en las bases de datos SciELO, Scopus, Dialnet, ScienceDirect y Google Scholar. Los descriptores utilizados fueron: «aprendizaje basado en problemas», «educación en ingeniería», «competencias de orden superior», «metodologías activas» y «enseñanza-aprendizaje». Se incluyeron artículos publicados entre 2020 y 2024, privilegiando estudios empíricos en contextos de ingeniería y particularmente en Colombia y Latinoamérica. Se complementó la revisión con el antecedente clave de Fernández y Duarte [5] por su relevancia directa en el contexto colombiano.

A partir de la revisión se identificaron 11 artículos de alta pertinencia, organizados en tres grupos: estudios sobre ABP y metodologías activas en ingeniería; revisiones sistemáticas y análisis bibliométricos sobre el tema; y artículos sobre evaluación formativa y competencias de orden superior. El artículo base de Razo-Abundis, Dibut-Toledo y Portal-Gallardo [8] ancla la perspectiva constructivista de la propuesta, mientras los trabajos de Mayorga-Ases et al. [6], Rösiö y Andersen [10] y Fernández y Duarte [5] aportan el respaldo empírico y metodológico central.

C. Población y Muestra

La propuesta está dirigida a los estudiantes matriculados en la asignatura de Investigación de Operaciones I del programa de Ingeniería Industrial de la Universidad de Córdoba. Dado que es la asignatura con mayor índice de repitencia del programa, la población objetivo corresponde a los estudiantes activos de esta asignatura en cualquier corte. Para efectos de una futura implementación piloto, se contempla un grupo de entre 20 y 35 estudiantes, conformando subgrupos colaborativos de 3 a 4 integrantes.

Para la fase de validación por juicio de expertos, la muestra estará conformada por un mínimo de 5 expertos seleccionados mediante muestreo intencional con los siguientes criterios: ser docente activo con mínimo cinco años de experiencia en educación en ingeniería; contar con formación o experiencia en metodologías activas de aprendizaje o en Investigación de Operaciones; y pertenecer a una institución de educación superior colombiana o latinoamericana.

D. Operacionalización de Variables

Las competencias de orden superior objeto de esta propuesta se operacionalizan a través de los indicadores medibles presentados en la Tabla I, articulados con el contenido de Investigación de Operaciones I:

TABLA I OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES — COMPETENCIAS DE ORDEN SUPERIOR

Variable	Dimensión	Indicador medible	Instrumento
Pensamiento crítico	Análisis de supuestos del modelo	El estudiante identifica y cuestiona los supuestos del modelo de IO y justifica su pertinencia en el contexto real	Rúbrica del informe técnico
Análisis sistémico	Selección e integración del modelo	Precisión en la selección del modelo de optimización más pertinente para el escenario industrial planteado	Rúbrica de formulación del modelo
Resolución de problemas	Validación y análisis de sensibilidad	El estudiante ejecuta el análisis de sensibilidad e interpreta cómo la variabilidad del entorno afecta la solución propuesta	Lista de verificación técnica
Comunicación técnica	Presentación de la solución	Claridad, uso de vocabulario técnico y capacidad de presentar la solución ante un interlocutor no experto	Rúbrica de sustentación oral

V. PROPUESTA DE INTERVENCION PEDAGOGICA

La propuesta no implica una modificación estructural del plan de estudios ni del syllabus de la asignatura de Investigación de Operaciones I. El ABP se incorpora como estrategia pedagógica complementaria que articula el contenido disciplinar con escenarios problemáticos reales del entorno industrial regional, enriqueciendo el proceso de aprendizaje sin sustituir sus mecanismos habituales. La propuesta se estructura en tres momentos, adaptados de Fernández y Duarte [5].

A. Momento 1 — Sensibilización

Al inicio de cada unidad temática, el docente presenta un escenario problemático real del entorno industrial de Córdoba y la región Caribe, vinculado directamente al contenido que se va a trabajar. Los escenarios contemplados incluyen: logística agroindustrial (programación lineal aplicada a la distribución de productos del sector ganadero o arrocero de Córdoba), gestión de inventarios en PYMES del sector comercial de Montería, optimización de rutas de distribución en empresas de la región, y programación de producción en empresas manufactureras locales.

En este momento se conforman los grupos colaborativos de 3 a 4 estudiantes y se definen claramente los roles: el estudiante como investigador activo y el docente como facilitador, no como transmisor de respuestas. Este momento no reemplaza la explicación docente; la complementa con un problema que da sentido y contexto al aprendizaje de los conceptos, activando la

motivación intrínseca y el interés por la asignatura desde el inicio de cada unidad.

B. Momento 2 — Seguimiento

A lo largo del desarrollo de la unidad temática, los grupos trabajan progresivamente en la resolución del escenario problemático a través de cuatro puntos de control articulados con el avance del contenido:

- Punto de control 1 Diagnóstico del problema: los grupos identifican las variables relevantes del escenario, establecen los límites del sistema analizado y seleccionan el modelo de Investigación de Operaciones más pertinente, justificando su elección.
- Punto de control 2 Formulación del modelo matemático: los estudiantes estructuran el problema en términos del modelo seleccionado, definiendo la función objetivo, las restricciones y los parámetros extraídos del contexto real del escenario industrial.
- Punto de control 3 Solución, validación y análisis de sensibilidad: los grupos resuelven el modelo, verifican la coherencia de la solución con el contexto real y evalúan cómo la variabilidad del entorno fluctuaciones en la demanda, cambios en costos, restricciones de capacidad impacta la solución propuesta, garantizando la robustez de la recomendación.
- Punto de control 4 Presentación de la propuesta de solución: los grupos presentan su solución asumiendo el rol de consultores que se dirigen a los tomadores de decisión de la empresa del escenario, desarrollando simultáneamente comunicación técnica y argumentación profesional.

Este proceso garantiza que el contenido de la asignatura no se estudia de forma abstracta sino a través de su aplicación a un problema auténtico, desarrollando la transferencia de conocimiento al contexto real que el modelo magistral raramente logra.

C. Momento 3 — Evaluación Formativa Tripartita

- Se implementa el modelo tripartito de evaluación formativa, integrado no superpuesto a los mecanismos evaluativos existentes en la asignatura:
- Autoevaluación (25%): cada estudiante reflexiona sobre su proceso de aprendizaje, su contribución al grupo y las competencias desarrolladas durante el trabajo con el escenario problemático.
- Coevaluación entre pares (25%): los grupos valoran el trabajo y la presentación de sus compañeros con criterios previamente establecidos y compartidos, desarrollando pensamiento crítico y responsabilidad compartida.
- Heteroevaluación docente (50%): valoración del informe escrito de la solución criterios de fondo: pertinencia del modelo, coherencia de la solución, justificación de decisiones; criterios de forma: claridad, vocabulario técnico, normas de presentación y de la sustentación oral ante el grupo.

Este sistema tripartito permite valorar no solo el producto final la solución al problema de Investigación de Operaciones sino el proceso de aprendizaje: cómo los estudiantes identificaron, analizaron y resolvieron el problema real. En sí mismo, el proceso evaluativo constituye una experiencia formativa que desarrolla metacognición, autoconciencia y capacidad de análisis crítico.

D. Diseño de los Escenarios Problemáticos

Los escenarios problemáticos se diseñan con tres características esenciales que garantizan su efectividad pedagógica: están vinculados a empresas o sectores reales del entorno <industrial de Córdoba y la región Caribe, lo que garantiza autenticidad y motivación; tienen solución abierta, es decir, no existe una única respuesta correcta sino múltiples alternativas que los estudiantes deben analizar, comparar y justificar; e integran variables del contexto económicas, sociales, ambientales que van más allá del modelo matemático puro, preparando al estudiante para la complejidad real del ejercicio profesional

VI. Resultados Esperados

A. Competencias de Orden Superior

Al tratarse de una propuesta pedagógica cuya implementación es futura, los resultados se fundamentan en la evidencia empírica identificada en la revisión sistemática de literatura (2020–2024) y en los antecedentes colombianos de aplicación del ABP en ingeniería. Se espera que los estudiantes de Investigación de Operaciones I fortalezcan cuatro competencias centrales:

- Análisis sistémico: capacidad para seleccionar y formular modelos de optimización pertinentes ante problemas industriales reales del entorno de Córdoba y la región Caribe.
- Resolución de problemas: capacidad para ejecutar y validar modelos incluyendo análisis de sensibilidad, interpretando la variabilidad del entorno industrial en la solución.
- Pensamiento crítico: capacidad para cuestionar los supuestos del modelo matemático frente a la complejidad del entorno real, identificando limitaciones y proponiendo ajustes.
- Comunicación profesional: capacidad para presentar propuestas técnicas ante audiencias no expertas con claridad, precisión y argumentación fundamentada.

Las revisiones de Mayorga-Ases et al. [6] y de literatura latinoamericana [2], [11] confirman que el ABP, cuando es aplicado de manera contextualizada y con soporte institucional, produce incrementos significativos en el rendimiento académico y en la motivación e implicación de los estudiantes. Fernández y Duarte [5] documentaron mejoras medibles en todas las competencias evaluadas tras la implementación del ABP en

ingeniería colombiana, aportando el antecedente más directo para el contexto de este trabajo.

B. Impacto Institucional Esperado

Desde la perspectiva institucional, se espera que la propuesta genere evidencia local sobre la viabilidad de incorporar el ABP como estrategia complementaria en asignaturas del área de formación profesional específica del programa, sin requerir reformas curriculares de gran escala. Esto facilita su adopción progresiva por parte de otros docentes del programa y su replicabilidad en asignaturas afines como Simulación, Gestión de la Producción o Logística. La documentación del proceso y los instrumentos diseñados rúbricas, listas de verificación, guías de escenarios constituyen activos pedagógicos transferibles que enriquecen el acervo metodológico del programa de Ingeniería Industrial.

VII. Conclusiones

El Aprendizaje Basado en Problemas representa una alternativa pedagógica sólidamente fundamentada para superar las limitaciones del modelo magistral en la formación de ingenieros industriales. La revisión sistemática de literatura (2020–2024) confirma que el ABP produce mejoras significativas en el rendimiento académico, la motivación estudiantil y el desarrollo de habilidades profesionales en contextos de ingeniería, con resultados especialmente sólidos cuando la metodología se aplica de forma contextualizada y con soporte institucional adecuado [2], [6], [11].

La propuesta presentada demuestra que el ABP puede incorporarse como estrategia complementaria dentro de la asignatura de Investigación de Operaciones I, articulando su contenido disciplinar programación lineal, teoría de colas, simulación, gestión de inventarios con escenarios problemáticos reales del entorno industrial de Córdoba y la región Caribe colombiana, sin modificar el syllabus ni la estructura evaluativa existente. No pretende rediseñar la forma de dictar clases, sino complementarla con una estrategia que le da sentido práctico y contextual al aprendizaje de los modelos de Investigación de Operaciones.

El modelo tripartito de evaluación formativa autoevaluación, coevaluación y heteroevaluación no es únicamente un mecanismo de medición del aprendizaje sino una experiencia formativa en sí misma, que desarrolla metacognición, pensamiento crítico y responsabilidad compartida. Junto con los cuatro puntos de control del Momento 2, constituye el componente más innovador de la propuesta y el que más directamente contribuye al desarrollo de las competencias de orden superior identificadas.

Esta investigación aporta además una contribución a la literatura: evidencia diseñada específicamente para el contexto de un programa de ingeniería regional colombiano en la Costa Caribe, un vacío identificado en las revisiones sistemáticas disponibles. La implementación futura de la propuesta, con la validación por juicio de expertos y la medición de impacto mediante los indicadores propuestos, permitirá generar evidencia empírica local que nutra tanto la práctica pedagógica del programa como la teoría constructivista del aprendizaje en ingeniería

Referencias

[1] G Barak, M. (2020). Problem-, Project- and Design-Based Learning: Their Relationship to Teaching Science, Technology and Engineering in School. Education Sciences, 10(3), 58. doi: 10.3390/educsci10030058

[2] Caballero Meneses, S., Vergara Causo, E., Gardi Melgarejo, V., & Rodriguez-Barboza, J. (2025). Metodologías activas en la educación latinoamericana: una revisión sistemática sobre su impacto en el aprendizaje significativo. Revista Iberoamericana de Educación Superior.

[3] D. Jasso, R., García-Prieto, F., & García-Rojas, A. (2024). Metodologías activas en la universidad: análisis bibliométrico internacional (2003-2023). Revista de Educación Superior, 53(1).

[4] Garcia, G. D. (2024). La evaluación como herramienta para mejorar los aprendizajes: la retroalimentación y la evaluación auténtica. Revista Latinoamericana de Evaluación Educativa, 12(2), 45–62.

[5] H. Fernández, F., & E. Duarte, J. (2013). El Aprendizaje basado en Problemas como Estrategia para el Desarrollo de Competencias Específicas en Estudiantes de Ingeniería. Formación Universitaria, 6(5), 11–22. doi: 10.4067/S0718-50062013000500003

[6] Mayorga-Ases, M., Tagua-Moyolema, A., Muyulema-Muyulema, D., & Velastegui-Hernández, R. (2024). Estudio sobre la implementación de metodologías activas en la educación superior: beneficios y desafíos. Revista Ecuatoriana de Educación, 8(1), 22–38.

[7] Ramírez-Quintero, F., & Rojas-Gámez, C. (2025). Investigación, contexto y aplicaciones de la evaluación educativa: una mirada del desarrollo científico en Latinoamérica. Revista Colombiana de Educación, 84.

[8] Razo-Abundis, I., Dibut-Toledo, L., & Portal-Gallardo, J. (2024). Las metodologías activas de aprendizaje en las carreras de Ingeniería Industrial. Revista Cubana de Ingeniería, 15(1), 1–12.

[9] Rodríguez Serrano, K., Maya Restrepo, M., & Jaén Posada, J. (2012). Educación en Ingenierías: de las clases magistrales a la pedagogía del aprendizaje activo. Revista de Ingeniería, 36, 6–13.

[10] Rösiö, C., & Andersen, A.-L. (2021). Continuing Engineering Education (CEE) in Changeable and Reconfigurable Manufacturing using Problem-Based Learning (PBL). Procedia Manufacturing, 55, 391–398. doi: 10.1016/j.promfg.2021.10.054

[11] Seguel-Arriagada, A., Torres-Valderrama, S., & Jiménez Pérez, L. (2024). Experiencias formativas en ingeniería basadas en metodologías activas: una revisión sistemática de la literatura. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 32(2).

Gestión del conocimiento, sostenibilidad y capital natural en la educación superior: un análisis bibliométrico y cualitativo de sus implicaciones para la formación en ingeniería (2021-2026)

Humberto Andrés Gutiérrez Dávila
Estudiante Ingeniería Industrial)
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
humberto.gutierrez066@pascualbravo.edu.co

Ph d (c) Carlos Alberto Lopera Quiroz
Docente Ocasional
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
c.lopera@pascualbravo.edu.co

***Resumen*—. La integración de la sostenibilidad (S) en la educación superior ha logrado impulsar el desarrollo de estudios orientados a entender su relación con la gestión del conocimiento (GC). Sin embargo, la integración del capital natural (CN) como uno de los ejes estructurales del desarrollo sostenible es limitada en los estudios científicos. En este sentido, esta investigación plantea como objetivo analizar cómo está estructurada la literatura científica que articula la GC, la S y el CN en la educación superior, así como identificar sus impactos para la formación en ingeniería durante los últimos cinco años (2021 – 2026)**

Metodológicamente, el estudio adoptó un enfoque mixto explicativo secuencial en dos fases. En la primera fase se desarrolló un análisis bibliométrico mediante un mapeo de coocurrencia de palabras clave, a partir de una ecuación de búsqueda aplicada a la base de datos Scopus y procesada en el software VOSviewer, lo que permitió identificar la estructura conceptual del campo de estudio. En la segunda fase, los resultados obtenidos fueron contrastados y validados a través de un análisis cualitativo basado en una matriz de extracción de literatura. Para ello, se aplicaron criterios PRISMA adaptados, lo que permitió seleccionar un corpus de 25 artículos, analizados a partir de la triada GC–S–CN y sus implicaciones en la educación superior.

Los hallazgos evidenciaron que la literatura se estructura en torno a la relación entre la GC y el desarrollo sostenible. El capital natural no se encontró en los nodos de la red bibliométrica. Sin embargo, el análisis cualitativo reveló que este concepto se encuentra presente de manera implícita – servicios ecosistémicos, biodiversidad y gestión de recursos naturales – en los estudios. Estas diferencias ponen en evidencia una brecha entre el concepto de capital natural en el campo de investigación y su adecuada aplicación.

Para concluir, el estudio identificó la necesidad de fortalecer la articulación entre la GC, la S y el CN con énfasis en la formación en ingeniería, mediante la promoción de enfoques educativos que integren, de manera explícita la ecología y contribuyan a una comprensión más amplia de los desafíos del desarrollo sostenible.

Palabras clave – *Gestión del conocimiento, sostenibilidad, capital natural, educación en ingeniería, análisis bibliométrico*

I. Introducción

En las últimas décadas, el conocimiento se ha consolidado como uno de los recursos más valiosos para el desarrollo económico y social, al punto de hablar de sociedades y economías basadas en el conocimiento, donde la producción, distribución y uso de saberes se convierten en el eje de la competitividad y la innovación [1]. En este escenario, las instituciones de educación superior (IES) ocupan un lugar central, pues son organizaciones intensivas en conocimiento que producen, transfieren y aplican saber científico y tecnológico a través de sus funciones de docencia, investigación y extensión, en integración permanente con el estado, la empresa y la sociedad [2]. La GC en las IES se ha reconocido como un proceso que permite identificar, crear, distribuir y medir el conocimiento, articulando las dimensiones de capital humano, estructural y relacional con el apoyo de infraestructuras tecnológicas para transformar experiencias individuales en procesos de aprendizajes organizacionales.

En Colombia, y particularmente en las IES, se ha documentado la relevancia de la GC para la calidad académica y la innovación, como la persistencia de desafíos asociados a la falta de estrategias claras, limitaciones tecnológicas, debilidades en la cultura de transferencia del conocimiento y dificultades para consolidar modelos de gobernanza que articulen efectivamente las funciones misionales y la comunidad académica en general.[1].

Paralelamente, el desarrollo sostenible se ha posicionado como orientador de políticas públicas y agendas de educación superior, especialmente a partir de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que demandan transformar los modelos de formación profesional y de generación de conocimiento para enfrentar desafíos ambientales, sociales y económicos de alcance global. Desde la ecología y su economíay el enfoque de capitales se entiende que el desarrollo sostenible depende de la interacción entre tres activos: el capital reproducible, el capital humano y el CN , entendido este último como la suma de recursos naturales renovables y no renovables (suelo, agua, aire, biodiversidad, energía) y los ecosistemas que, como activos de largo plazo, generan flujos de bienes y servicios ecosistémicos fundamentales para el bienestar del ser humano y el desarrollo económico [3]. El CN incluye stocks (bosques, cuerpos de agua, suelos fértiles, especies) como procesos ecológicos (ciclos de nutrientes, regulación climática, provisión de agua, polinización), cuya conservación condiciona la posibilidad de sostener en el tiempo las oportunidades de bienestar para las generaciones presentes y futuras. No obstante, la literatura también evidencia tensiones entre posiciones de sostenibilidad débil –que asumen la sustituibilidad entre CN y otros tipos de capital– y enfoques de sostenibilidad fuerte, que resaltan la existencia de componentes ecológicos críticos, poco sustituibles y susceptibles de colapsos irreversibles, lo cual obliga a considerar límites al uso del CN y marcos como los “espacios operativos seguros” o fronteras planetarias. En este contexto, el concepto de CN adquiere un papel relevante para reorientar las decisiones de política, la contabilidad económica y los marcos educativos hacia la integración explícita de la dimensión ecológica del desarrollo [3, 4]

La triada GC – S y CN plantea retos y oportunidades singulares para las IES especialmente para la formación en ingeniería. De una parte, la GC se configura como mecanismo habilitador de la sostenibilidad en las universidades, al potenciar procesos de investigación, transferencia, innovación abierta, aprendizaje organizacional y articulación que permiten diseñar, implementar y escalar soluciones a problemas complejos asociados a los ODS [5]. De otro lado, el CN, aunque se reconoce conceptualmente como base biofísica del desarrollo y se integra en marcos como la economía del CN, la contabilidad ambiental o los enfoques de servicios ecosistémicos, no siempre aparece de manera relevante y estructurada en las agendas de GC y educación para la sostenibilidad de las IES [6]. Esta vacío es particularmente relevante en la ingeniería, campo llamado a diseñar y operar infraestructuras, tecnologías y sistemas productivos que inciden directa y masivamente sobre los ecosistemas, los flujos de recursos y los servicios ecosistémicos que constituyen el CN. Así, la articulación la triada GC – S – y CN no es solo una cuestión conceptual, sino un asunto estratégico para redefinir las competencias, los modelos de enseñanza y aprendizaje y las prácticas institucionales de la formación en ingeniería, especialmente en contextos donde convergen asuntos ambientales, demandas de innovación y necesidades de desarrollo del territorio.

En este contexto, este artículo se orienta a responder la pregunta de ¿Cómo se configura la producción científica que articula la GC, la S y el CN en las IES y qué implicaciones tiene para la formación en ingeniería? Esta pregunta es relevante por al menos tres razones. Primero, porque la literatura sobre gestión del conocimiento en IES, tanto en Colombia como a nivel internacional, ha avanzado en la caracterización de modelos, fases, actores y desafíos, pero ha prestado menor atención a la manera en que estos procesos se entrelazan con las agendas de sostenibilidad y, en particular, con la conceptualización y gestión del capital natural como eje de la educación para el desarrollo sostenible. Segundo, porque desde los marcos de capital natural se ha enfatizado la necesidad de que las decisiones económicas, las políticas públicas y los instrumentos de contabilidad incorporen explícitamente los stocks y flujos ecológicos, pero poco se ha explorado cómo este enfoque se traduce en prácticas formativas concretas y en procesos de gestión del conocimiento en las universidades. Tercero, porque en la formación en ingeniería se constata una incorporación creciente del discurso de la sostenibilidad y de los ODS, pero no necesariamente una integración sistemática del capital natural como categoría analítica y formativa central, lo que puede limitar la comprensión sistémica de los problemas y la capacidad de los futuros ingenieros para actuar sobre las interdependencias entre sistemas sociales, tecnológicos y ecológicos.

El estudio busca, por tanto, aportar a este vacío de conocimiento mediante un análisis de la configuración de la producción científica que articula gestión del conocimiento, sostenibilidad y capital natural en la educación superior, así como de las implicaciones que dicha configuración tiene para la formación en ingeniería. El objetivo general del trabajo es analizar cómo se estructura y se expresa en la literatura reciente (2021–2026) la tríada gestión del conocimiento–sostenibilidad–capital natural en el contexto de la educación superior, identificando patrones conceptuales y temáticos, la posición relativa del capital natural en esa red y las principales implicaciones que se derivan para los procesos formativos, curriculares y pedagógicos en ingeniería. Para alcanzar este objetivo, se adopta una metodología mixta que combina, en primer lugar, un análisis bibliométrico de coocurrencia de palabras clave sobre un conjunto de artículos indexados en Scopus, con el fin de mapear la estructura conceptual del campo y los clústeres temáticos que emergen de la articulación entre gestión del conocimiento, educación superior y sostenibilidad. El análisis bibliométrico de coocurrencia se realizó con el software VOSviewer, utilizando como unidad de análisis las *keywords*, e incorporando filtros de temporalidad (2021–2026), tipo de documento (artículos), tipo de fuente (revistas), idioma (inglés) y áreas temáticas (ciencias sociales, ambiente e ingeniería), para conformar un corpus actual, relevante y alineado con el foco de estudio.

En segundo lugar, el análisis bibliométrico se contrasta y valida con un componente cuantitativo basado en un flujo tipo PRISMA adaptado, a través del cual se depuró el corpus inicial hasta seleccionar, con criterios de inclusión y exclusión, 25 artículos que abordan, de manera explícita o implícita, la tríada GC – S y CN y sus implicaciones para la formación en ingeniería. Estos artículos fueron examinados mediante lectura analítica y comparativa, considerando tres dimensiones: la forma en que se configura la relación entre gestión del conocimiento y sostenibilidad en cada estudio; el modo en que

se incorpora el CN (explícito, implícito o ausente), en especial a partir de palabras clave como servicios ecosistémicos, biodiversidad, recursos naturales o límites planetarios; y los aportes del estudio a la formación en ingeniería en términos de enfoques curriculares, modelos de enseñanza, - aprendizaje, modelos pedagógicos, competencias y articulación con contextos territoriales y actores múltiples. De este modo, el complementar el análisis bibliométrico con la revisión cualitativa permite ir más allá de una descripción de frecuencias y nodos porcentuales para ofrecer una lectura interpretativa de las tensiones, vacíos y posibilidades del campo.

Los resultados obtenidos evidencian, en primer lugar, que la estructura conceptual del corpus analizado se organiza alrededor de cuatro clústeres principales, en los cuales la GC y el desarrollo sostenible constituyen los núcleos de mayor centralidad y mayor fuerza de enlace. El clúster dominante se articula en torno a términos como “sustainable development” y “knowledge management”, evidenciando que la relación entre GC y S opera como eje vertebral del campo. Un segundo clúster agrupa conceptos vinculados con educación superior, cambio climático y estudiantes, lo que refleja un foco específico en contextos formativos y en la integración de la S en los procesos educativos universitarios. Un tercer clúster se orienta hacia prácticas organizacionales, innovación y gestión institucional de la S, mientras que un cuarto conglomerado, de menor fuerza relativa, se asocia al aprendizaje organizacional como campo emergente. De manera particular y relevante para esta investigación, los términos “engineering” y “natural capital” no aparecen como nodos significativos dentro de la red de coocurrencia, a pesar de haber sido incluidos en la ecuación de búsqueda, lo que indica una baja centralidad de la ingeniería y del CN en la producción científica que enlaza GC yla S en las IES. .

Sin embargo, el análisis cualitativo de los 25 artículos seleccionados permite evidenciar que el CN está presente de forma implícita en un amplio conjunto de estudios, a través de conceptos como servicios ecosistémicos, biodiversidad, recursos hídricos, límites planetarios, crisis ecológica, resiliencia socioecológica, gestión de recursos naturales o economía circular del agua. Esta presencia implícita indica que, aunque el CN no se explicita como categoría analítica central en la mayoría de los trabajos, sí constituye un trasfondo importante de las discusiones sobre S y de muchas de las propuestas formativas para la ingeniería, que enfatizan el aprendizaje basado en problemas reales y territoriales, la integración de saberes interdisciplinarios y transdisciplinarios, el uso de tecnologías digitales e inteligencia artificial para el monitoreo ambiental, la innovación abierta y la co-creación de soluciones con comunidades y actores externos. La combinación de resultados bibliométricos y cualitativos revela así, una brecha entre la visibilidad del CN en la literatura y su relevancia conceptual en los procesos formativos, lo que sugiere la necesidad de avanzar desde una educación en sostenibilidad hacia modelos de formación en ingeniería que incorporen explícitamente el CN como eje estructurante de la comprensión de los sistemas socioecológicos y de la GC en las IES. En este sentido, los hallazgos del estudio son importantes porque ofrecen una base empírica y conceptual para reconfigurar las agendas de investigación y de formación en ingeniería, fortaleciendo la articulación entre gestión del conocimiento, sostenibilidad y capital natural en la educación superior, y abren un espacio para el diseño de modelos educativos que respondan de manera más integral a los desafíos ecológicos y sociales contemporáneos

II. METODOLOGÍA

A. Fase cuantitativa

Esta investigación se desarrolló bajo la metodología mixta. Cuantitativamente bajo un enfoque bibliométrico con el fin de identificar la producción científica en un campo específico de la literatura, identificando patrones, relaciones y tendencias. La bibliometría es ampliamente utilizada para mapear estructuras de conocimiento y áreas emergentes en diferentes disciplinas [7, 8].

El análisis se centró en la técnica de co-ocurrencia de palabras clave, está técnica permite identificar relaciones semánticas entre conceptos y agruparlos en clústeres temáticos. Se utilizó como unidad de análisis las palabras clave (author keywords e indexed keywords). Este análisis permite identificar la frecuencia con que las palabras aparecen conjuntamente en los documentos, revelando relaciones conceptuales dentro del campo [8, 9]. El software utilizado fue VOSviewer, desarrollado por la Universidad de Leiden en los Paises Bajos es ampliamente utilizado en la construcción y visualización de redes bibliométricas

VosViewer genera mapas de red en los que: los nodos representan palabras clave; el tamaño de los nodos indica relevancia y frecuencia de aparición, las líneas entre nodos representan coocurrencia y los clústeres temáticos están indicados con colores.

La búsqueda se realizó, en el mes de marzo de 2026 en la base de datos Scopus, a partir de una ecuación de búsqueda en la que se utilizaron operadores boleanos y respondió a tres bloques conceptuales: 1. Dominio del conocimiento (Gestión del conocimiento hacia un ecosistema real en las organizaciones educativas); 2. Dominio del contexto (Instituciones de Educación Superior); 3. Dominio de la sostenibilidad (enfoque educativo, ambiental y económico). En la ecuación se incluyeron filtros: temporalidad (2021 – 2026), este intervalo permitió garantizar actualidad en el campo de estudio, así como evidenciar efectos post pandemia en la educación para el desarrollo sostenible; tipo de documento (artículos), este filtro aseguró la calidad de los artículos analizados, tipo de fuente (journal), este filtro excluyó la literatura gris y garantizó trazabilidad científica, idioma (Inglés), este filtro buscó maximizar la visibilidad internacional y reducir la ambigüedad del mapa de coocurrencias, áreas temáticas (ciencias sociales, ambiente e ingeniería), este filtro delimitó tres áreas del conocimiento. Las ciencias sociales, porqué en ella encontramos la educación, las políticas educativas y las pedagogías; ambiente, porque nos permite incluir la sostenibilidad y el capital natural; ingeniería por ser uno de los

focos de la pregunta de investigación. La ecuación final utilizada fue la siguiente:

(TITLE-ABS-KEY ("knowledge management" OR "knowledge sharing" OR "knowledge transfer" OR "organizational learning") AND TITLE-ABS-KEY ("higher education" OR universit* OR "educación superior") AND TITLE-ABS-KEY ("education for sustainable development" OR "sustainability education" OR "natural capital" OR "ecosystem services" OR "sustainable development")) AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2027 AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "SOCI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))

Del mapa de coocurrencia se descargaron las palabras clave y se construyó manualmente el porcentaje del Total Link Streght de cada clúster.

B. Fase cualitativa

La fase cualitativa complementó, contrastó y validó el análisis bibliométrico a través de un proceso de selección de literatura basado en criterios tipo prima adaptado (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), método ampliamente utilizado y aceptado para revisiones sistemáticas de literatura transparentes y replicables [8 , 9]. El flujo incluyó cuatro pasos: (1) Identificación de documentos relevantes en la ecuación de búsqueda; (2) filtrado mediante criterios de áreas de conocimiento; (3) elegibilidad, con lectura de textos completos y verificación de criterios de inclusión; y (4) inclusión final de los estudios que integraron la síntesis cualitativa.

Los criterios de inclusión requirieron que los artículos abordarán, de manera explícita o implícita, al menos dos de los tres componentes de la tríada gestión del conocimiento – sostenibilidad – capital natural, y que presentaran implicaciones para procesos formativos en educación superior. Se excluyeron artículos cuyo foco fuera exclusivamente técnico – disciplinar, sin conexión con los procesos de enseñanza – aprendizaje o la gestión institucional del conocimiento.

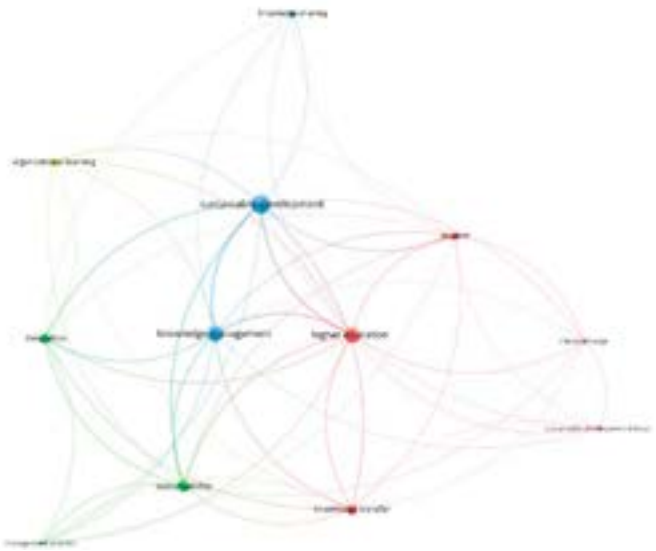
Los 25 artículos seleccionados fueron analizados mediante una matriz categorial que evalúo: la configuración de la relación GC – S, el nivel de integración del capital natural (explícito, implícito o ausente) y las implicaciones para la formación en ingeniería. Este enfoque permitió trascender de lo descriptivo del análisis bibliométrico a contrastar y validar interpretativamente el campo de estudio [10]

III. Resultados

A. Fase cuantitativa

La ejecución de la ecuación derivó un hallazgo de 98 artículos de investigación. Este resultado fue exportado a un archivo .csv en el que se incluyó: la información de citación, la información bibliográfica, el resumen y las palabras claves y el origen de los fondos de financiación. El archivo fue ejecutado en VosViewer, versión 1.6.20. Al mapa resultante se le aplicó un proceso de normalización de palabras clave mediante un tesauro de equivalencias, con el fin de reducir redundancia semánticas y mejorar la interpretabilidad de las redes de co-ocurrencia (Figura 1)

Figura 1
Mapa de coocurrencia de palabras



Fuente: elaboración propia con software VosViewer

El análisis bibliométrico de co-ocurrencia de palabras clave, basado en 98 artículos indexados en Scopus (2021 – 2026), permitió identificar la estructura conceptual del campo mediante la conformación de cuatro clústeres principales.

Tabla 1
Clústeres, palabras clave y fuerza de enlace total

Clúster	Keyword	Total Link Streght	% Strengh Clúster
1	climate change	16	33.6%
	higher education	114	
	knowledge transfer	49	
	stundent	41	
	sustainable development education	11	
2	innovation	54	22.5%
	management practice	23	
	sustainability	78	
3	knowledge management	124	40.4%
	knowledge sharing	10	
	sustainable development	144	
4	organizational learning	24	3.5%

Fuente: elaboración propia

El clúster principal (Clúster 3, con un peso estructural del 40.4%) evidencia que el desarrollo sostenible constituye el eje central de la producción científica, articulado estrechamente con la GC.

El clúster 1 (33.6%) refleja la aplicación de estos conceptos en contextos formativos, particularmente en IES, con palabras claves como educación superior, estudiantes y transferencia del conocimiento.

El clúster 2 (22.5%) indica un enfoque organizacional de la sostenibilidad vinculado a prácticas de gestión e innovación institucional.

El clúster 4 (3.5%) se configura como un campo de baja relevancia y poca integración de la red.

De manera relevante, los términos ingeniería y capital natural no aparecen como nodos dentro de la estructura analizada, a pesar de haber sido incluidos en la ecuación de búsqueda. Este hallazgo constituye el punto de partida para la fase cualitativa

B. Fase cualitativa

El flujo PRIMA adaptado (Figura 2) permitió reducir el corpus inicial de 494 documentos identificados a 98 artículos tras la aplicación de filtros, y finalmente a 25 artículos para el análisis cualitativo, tras la revisión de títulos, resumenes y textos completos.

Figura 2
Flujo de selección tipo PRISMA adaptado



La tabla 2 presenta el análisis de una selección representativa de los 25 artículos, organizados en tres dimensiones: configuración de la traida GC-S-CN y las implicaciones para la formación en ingeniería.

Tabla 2
Análisis cualitativo Gestión del Conocimiento – Sostenibilidad – Capital Natural y su implicación para la formación en ingeniería

Referencia	Tríada GC – S – CN	Implicaciones para la ingeniería
[11]	GC y S vinculadas mediante pluralismo epistémico. CN: implícito (crisis ecológica, servicios ecosistémicos, ODS).	Educación transdisciplinaria; co-desarrollo de tecnologías con comunidades rurales.
[12]	Innovación abierta como nexo GC–S. CN: implícito (naturaleza como entorno real de aprendizaje).	Competencias en ciencia ciudadana; validación de soluciones en entornos naturales reales.
[13]	Preservación del conocimiento ecológico tradicional. CN: implícito (plantas silvestres, servicios ecosistémicos).	Aprendizaje experiencial que conecte con usos prácticos del capital natural.
[14]	GC profesionaliza datos de sostenibilidad. CN: explícito (límites planetarios, sostenibilidad fuerte/débil).	Integrar indicadores técnicos de eficiencia energética y recursos en currículo.
[15]	GC–S vía co-creación ética en sistemas alimentarios. CN: implícito (biodiversidad, servicios ecosistémicos).	Modelo de aprendizaje-servicio; impacto de decisiones técnicas en seguridad alimentaria.
[16]	Inteligencia artificial como puente GC–S. CN: implícito (recursos hídricos, ecosistemas hidrológicos).	Currículo integrado con IA y monitoreo ambiental; ingeniería en ecosistemas inteligentes.
[17]	GC: diversificación del conocimiento para ODS. CN: implícito (ODS 13, 14, 15).	Interdisciplinariedad estratégica; currículo que exponga a combinaciones complejas de ODS.
[18]	Aprendizaje transformador de consumo sostenible. CN: implícito (límites planetarios, regeneración de la biosfera).	Metodologías participativas; soluciones técnicas acompañadas de cambio social.
[19]	Acciones impulsadas por conocimiento ante la crisis climática (pérdida de biodiversidad, emergencias ecológicas).	Comprensión sistémica de límites planetarios; formación técnica y ética integrada.
[20]	Intercambio de conocimientos en diseño urbano sostenible. CN: implícito (espacios verdes urbanos, entorno natural).	Diseño de infraestructura urbana sostenible.

Fuente: elaboración propia

El análisis cualitativo del corpus de 25 artículos evidenció tres patrones importantes. El primero, el predominio de la artículación GC – S: la GC se sitúa como mecanismo habilitador de la S a través de la transferencia de conocimiento, aprendizaje organizacional e innovación abierta. El segundo, la presencia implícita del CN: aunque ausente como nodo bibliométrico el CN aparece en los estudios a través de servicios ecosistémicos, recursos hídricos, límites planetarios y resiliencia socioecológica. El tercero, implicaciones emergentes para la formación en ingeniería: los estudios coinciden con la necesidad de modelos educativos que integren aprendizaje basado en problemas reales, perspectivas sociológicas y uso de tecnologías digitales para la sostenibilidad.

La triangulación cuantitativa (bibliometría) – cualitativa (literatura) revela brecha entre la visibilidad del CN en la literatura y su relevancia conceptual en los procesos formativos, lo que sugiere la necesidad de avanzar hacia modelos de formación en ingeniería que incorporen explícitamente el cn como eje estructurante.

IV. DISCUSIONES

A. Estructura dominante del campo

El análisis bibliométrico reveló que la relación GC – desarrollo sostenible constituye el núcleo articulador del campo estudiado (clúster 3, 40.4% TLS). Este hallazgo es confirma los estudios Raudaliuniene y Matar [21], quienes plantean que la GC es una práctica fundamental para alcanzar el desarrollo sostenible desde las IES, al permitir que el conocimiento sea adquirido, almacenado, compartido y aplicado de manera sistémica. De la misma manera, Trevisan et al [22] argumentan que la transformación de las IES hacia la sostenibilidad es, en esencia un proceso de aprendizaje organizacional donde la gestión del saber institucional debe evolucionar para integrar los principios del desarrollo sostenible.

Los hallazgos articulan también los planteamientos de Kelly et al [19], quienes identifican la necesidad de acciones impulsadas por el conocimiento para abordar las emergencias climáticas y de biodiversidad. La alta centralidad de los términos “knowledge management” y “sustainable development” refleja una madurez conceptual del campo que todavía requiere mayor concreción en modelos formativos específicos para la ingeniería.

B. Ausencia del nodo bibliométrico del capital natural

La ausencia del CN como nodo relevante en la red de coocurrencia, pese a su inclusión en la ecuación de búsqueda, no se debe interpretar como irrelevancia significativa, sino como una brecha entre la centralidad semántica de los términos y su presencia en el discurso científico que domina el campo de conocimiento. Barbier [3] y Bateman y Mace [4] han documentado ampliamente que el CN constituye la base del desarrollo sostenible, y que su falta de visibilidad se debe, en muchos casos, a la adopción implícita de paradigmas de sostenibilidad débil que asumen la sustituibilidad entre CN y otras formas de capital.

Esta condición de invisibilidad semántica es coherente con los hallazgos de análisis cualitativo: el capital aparece de manera implícita a través de servicios ecosistémicos [13, 15], gestión del agua [16, 23, 24], límites planetarios [17, 18] y resiliencia socioecológica [13]. Este patrón es concordante con lo que Jhonson y Mbah [21] determinan ¨gestión del conocimiento des-encarnada¨, donde algunos conceptos estructurantes operan de manera tácita en los marcos educativos sin alcanzar visibilidad formal en los sistemas de producción y clasificación del conocimiento.

C. Implicaciones para la formación en ingeniería

Los resultados de la fase cualitativa evidencian que la formación en ingeniería se beneficiaría de una integración más explícita del CN como eje estructurador. Los estudios analizados demuestran, de manera recurrente la necesidad de: aprendizaje basado en problemas reales y territoriales [20, 26], integración transdisciplinaria e interdisciplinaria [27, 28], uso de tecnologías digitales e IA para el monitoreo ambiental [16, 29], e innovación abierta y co-creación con actores externos [30, 31]

No obstante, estas transformaciones se deben desarrollar dentro del marco general de la S , sin incorporar explícitamente el CN como categoría analítica central. Siguiente los planteamientos de Biloslavo y Schaebs [14] sobre la integración de indicadores técnicos de S, y de Cazorla et al [15] sobre la formación ética en sistemas agroalimentarios, se propone que los programas de ingeniería incorporen: (i) marcos de valoración de servicios ecosistémicos; (ii) análisis de límites planetarios aplicados al diseño técnico; (iii) metodologías de evaluación de impacto sobre ecosistemas; y (iv) enfoques sistémicos que articulen los sistemas sociotécnicos con los ecológicos.

Esta investigación demuestra la importancia de triangular los estudios bibliométricos con el análisis cualitativo para identificar brechas entre lo que es visible semánticamente y la relevancia conceptual de los términos en la literatura científica. El análisis bibliométrico de coocurrencia de palabras tiende a subrepresentar conceptos abordados de manera implícita bajo denominaciones alternativas; la revisión cualitativa permite recuperar estas presencias tácitas y ofrecer una lectura interpretativa más completa. Este hallazgo es congruente con los planteamientos de Deesongkram [10] y Kirby [8] sobre las limitaciones y complementariedades de los métodos bibliométricos, y refuerza la pertinencia de los enfoques mixtos para el estudio de campos de conocimiento en consolidación

.

V. CONCLUSIONES

Esta investigación analizó la configuración de la producción científica que articula la triada GC – S y CN en la educación superior (2021-2026) enfocado en la formación en ingeniería. Los resultados permiten establecer cuatro conclusiones principales.

En primer lugar: la literatura analizada se estructura en torno a la relación GC – desarrollo sostenible como ejes centrales, consolidando a la GC como mecanismo habilitador de la S en las IES. Este patrón es consistente con los marcos teóricos dominantes del campo y sugiere una consolidación conceptual progresiva.

En segundo lugar: el CN es invisible en las redes bibliométricas, lo que contrasta con su reconocida relevancia teórica (tácita) como base del desarrollo sostenible. Esta diferencia evidencia una brecha entre los marcos de la economía ecológica y los discursos dominantes en la literatura sobre GC y S. El análisis cualitativo, sin embargo, revela su presencia implícita a través de servicios ecosistémicos, biodiversidad, recursos hídricos y límites planetarios.

En tercer lugar: la formación en ingeniería muestra una incorporación creciente de enfoques pedagógicos orientados a la S, pero sin contemplar de manera explícita el CN como categoría analítica central, lo que limita la comprensión sistémica de las interdependencias entre sistemas sociales, tecnológicos y ecológicos.

Finalmente: la triangulación entre lo cuantitativo (bibliometría) y lo cualitativo (literatura) demostró ser una estrategia valiosa para identificar brechas conceptuales que no son visibles desde ninguno de los dos enfoques por separado.

Se plantea la necesidad de trabajar y fortalecer la articulación entre gestión GC, S y CN en la educación superior, especialmente en ingeniería, avanzando hacia modelos formativos que integren explícitamente la dimensión ecológica del desarrollo. Como líneas futuras de investigación se recomienda: (i) diseñar y validar modelos curriculares con el CN como eje estructurante; (ii) ampliar el análisis a otras bases de datos y contextos geográficos; (iii) profundizar en los factores que determinan la invisibilización del CN en los marcos de GC; y (iv) explorar metodologías de evaluación del aprendizaje que midan la integración efectiva del CN en las competencias de los estudiantes de ingeniería.

REFERENCES

[1] J. Escorcia y D. Barros, "Gestión del conocimiento en Instituciones de Educación Superior: Caracterización desde una reflexión teórica", *Revista Ciencias Sociales*, vol. 26, no. 3, pp. 83-97, 2020.

[2] A. Y. Chaparro y R. Perdomo Vargas, "La gestión del conocimiento en la educación superior colombiana: un análisis documental", *e-Ciencias de la Información*, vol. 14, no. 2. 2024. https://doi.org/10.15517/eci.v14i2.56588

[3] E.B. Barbier. "The concept of natural capital", *Oxford Review of Economic,* vol. 35. No. 1. pp. 14 – 36, 2019. https://doi.org/10.1093/oxrep/gry028

[4] K. Bateman y G. Mace, "The natural capital framework for sustainability efficiente and equitable decisión making", *Nature sustainability,* vol. 3. pp. 776-786, 2020. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0552-3

[5] E. Chaleta, M. Saraiva, F. Leal, I. Fialho & A. Borralho. "Higher education and sustainable development goals (SDG) – potencial contribution of the undergraduate courses of the school of social sciences of the University of Évora, *Sustainability*, vol. 13, no. 4. pp. 1828, 2021. https://doi.org/10.3390/su13041828

[6] G. Montufar, R. Paredes, A. Carpio y M. Erazo. "Education, communication and environmental management: complementary strategies for the construction of sustainable universities", *International Journal of Environmental Sciences*, vol. 11, no. 11s, 2025. https://theaspd.com/index.php/ijes/article/view/1475/1184

[7] Y. Lui, Z. Cui, S. Jia, J. Wang, X. tian, L. Guo y Z. Wang. "A bibliometric analysis of global landscape and emerging frontieres of nanogels from 2000 t0 2024", *Discover nano*, vol. 20, no. 21, 2026. https://doi.org/10.1186/s11671-026-04453-5

[8] A. Kirby. "Exploratory bibliometrics: using Vosviewer as a preliminary research tool", *Publications,* vol 11, no. 10. 2023. https://doi.org/10.3390/publications11010010 .

[9] D.F. Al Husaeni y A.B. Nandiyanto. "Bibliometric using Vosviewer with publish or perish (using google scholar data): From step by – step proccesing for users to the practical examples in the analysis of digital learning articles in pre and post covid-19 pandemic", *Journal of Science and Engineering*, vol 2, no. 1. pp. 19-46, 2022. https://doi.org/10.17509/ajse.v2i1.37368

[10]] M. Deesongkram, "Bibliometric analysis of STEAM integration in chemistry learning at the secondary education level," *Online Learning in Educational Research*, vol. 5, no. 2, pp. 289-303, 2025. https://doi.org/10.58524/oler.v5i2.555

[11] A. E. Olagunju, "Exploring the Relationship between Knowledge and Power in Transformative Education," *Foresight and STI Governance*, vol. 20, no. 1, p. 30108, 2026. https://doi.org/10.17323/fstig.2026.30108

[12] S. Serrate, M. T. Silva y B. M. Gutiérrez, "Innovación abierta para la transición ecosocial," *Revista Española de Educación Comparada*, no. 49, pp. 424-448, 2026. https://doi.org/10.5944/reec.49.2026.45860

[13] A. Nowak-Olejnik, "Wild plant knowledge, ecosystem services, and social-ecological resilience," *Ecology and Society*, vol. 30, no. 4, p. 31, 2025. https://doi.org/10.5751/ES-16761-300431

[14] R. Biloslavo y D. S. Schaebs, "Joint Sustainability Reports (JSRs) to Promote the Third Mission of Universities," *Sustainability*, vol. 17, no. 21, p. 9587, 2025. https://doi.org/10.3390/su17219587

[15] A. Cazorla, A. Cáceres y C. Lavalle, "Toward a Metauniversity for Sustainable Development," *Sustainability*, vol. 17, no. 21, p. 9698, 2025. https://doi.org/10.3390/su17219698

[16] B. Gurler, F. Bhatti y A. Sari, "Integrating knowledge management practices in higher education with sustainable smart hydrological ecosystems," *Hydrology Research*, vol. 56, no. 9, p. 817, 2025. https://doi.org/10.2166/nh.2025.147

[17] O. Y. Romero, G. Heimeriks y F. Arroyave, "How Uncertain is the Emergence of Knowledge Related to the United Nations Sustainable Development Goals?," *Sustainable Development*, pp. 1-19, 2025. https://doi.org/10.1002/sd.3392

[18] G. Kiss, O. Lanzányi, T. Taxner, T. Veress y A. Neulinger. "The transformation of sustainable lifestyle practices in ecoclubs". *Cleaned and responsible consumption,* vol. 13. pp. 100189. https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100189

[19] O. Kelly et al., "Education in a warming world: Trends, opportunities and pitfalls for institutes of higher education," Frontiers in Sustainability, vol. 3, p. 920375, 2022. https://doi.org/10.3389/frsus.2022.920375

[20] T. Bradecki, A. Hallova y M. Stangel, "Concretization of Sustainable Urban Design Education in the Project Based Learning Approach," *Sustainability*, vol. 14, no. 12, p. 6971, 2022. https://doi.org/10.3390/su14126971

[21] J. Raudeliuniene e I. Matar, "Knowledge Management Practice for Sustainable Development in Higher Education Institutions: Women Managers' Perspective," *Sustainability*, vol. 14, no. 19, p. 12311, 2022. https://doi.org/10.3390/su141912311

[22] L. V. Trevisan, W. L. Filho y E. Á. Pedrozo, "Transformative organisational learning for sustainability in higher education," *Journal of Cleaner Production*, vol. 447, pp. 141634, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141634

[23] A. M. Barreiros et al., "Higher Education Institutions' Students' Literacy in Sustainable Use of Potable Water," *Sustainability*, vol. 16, no. 12, p. 5217, 2024. https://doi.org/10.3390/su16125217

[24] M. K. Burke et al., "The engaged university delivering social innovation," *The Journal of Technology Transfer*, vol. 49, pp. 2056-2079, 2024. https://doi.org/10.1007/s10961-024-10091-9

[25]] A. T. Johnson y M. F. Mbah, "Disobedience, (dis)embodied knowledge management, and decolonization," *Higher Education*, vol. 88, pp. 1909-1926, 2024. https://doi.org/10.1007/s10734-024-01192-3

[26] E. Marchigiani e I. Garofolo, "Italian Universities for Territorial Sustainable Development and Responsible Communities," Sustainability, vol. 15, no. 3, p. 2325, 2023. https://doi.org/10.3390/su15032325

[27] S. Bespalyy et al., "Sustainable development awareness and integration in higher education," Discover Sustainability, vol. 5, no. 346, 2024. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00562-2

[28] F. M. AlQhtani, "Knowledge Management for Research Innovation in Universities for Sustainable Development," Sustainability, vol. 17, no. 6, p. 2481, 2025. https://doi.org/10.3390/su17062481

[29] T. Dzhuguryan et al., "Supply Chain Ecosystem for Smart Sustainable City Multifloor Manufacturing Cluster," Sustainability, vol. 17, no. 19, p. 8882, 2025. https://doi.org/10.3390/su17198882

[30] S. Serrate, M. T. Silva y B. M. Gutiérrez, "Innovación abierta para la transición ecosocial," Revista Española de Educación Comparada, no. 49, pp. 424-448, 2026. https://doi.org/10.5944/reec.49.2026.45860

[31] A. E. Olagunju, "Exploring the Relationship between Knowledge and Power in Transformative Education," Foresight and STI Governance, vol. 20, no. 1, p. 30108, 2026. https://doi.org/10.17323/fstig.2026.30108

Diseño de pavimentos flexibles en Aguascalientes, México: comparación entre las metodologías INVIAS, AASHTO 93 y la normativa mexicana

Nicolás Báez Alarcón
Facultad de Ingeniería
Universidad de La Sabana
Chía, Colombia
nicolasbae@unisabana.edu.co

Este trabajo presenta el diseño comparativo de pavimentos flexibles para tres tramos viales en la ciudad de Aguascalientes, México, mediante la aplicación de las metodologías AASHTO 93, INVIAS y criterios mecanicistas utilizados por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El estudio se desarrolló en el marco de una experiencia de Aprendizaje Colaborativo Internacional en Línea (COIL) entre estudiantes de ingeniería de la Universidad de La Sabana y la UNAM. La metodología incluyó ensayos de laboratorio para determinar valores de CBR bajo diferentes condiciones de compactación, posteriormente convertidos a módulo de resiliencia mediante correlaciones AASHTO. El análisis computacional se apoyó en herramientas de IA generativa basadas en modelos de lenguaje de gran escala (Large Language Models, LLM), utilizadas para el desarrollo iterativo y validación del código en Python. El algoritmo implementado permitió automatizar el cálculo del Número Estructural (SN), evaluar más de 700 configuraciones estructuralmente viables y seleccionar alternativas mediante una función de costo relativo. Los resultados evidencian diferencias significativas entre las metodologías evaluadas, especialmente en suelos de baja capacidad portante, donde la metodología INVIAS produjo estructuras más conservadoras y mayores costos relativos frente a AASHTO 93. Asimismo, la automatización computacional permitió explorar de forma sistemática múltiples alternativas de diseño y apoyar la toma de decisiones técnico-económicas de manera más transparente y eficiente.

***Palabras clave*—Diseño de pavimentos flexibles, AASHTO 93, INVIAS, CBR, módulo de resiliencia, automatización computacional, IA generativa, LLM, Python.**

I. Introducción

El diseño de pavimentos flexibles constituye una de las actividades centrales de la ingeniería vial, y su correcta ejecución depende tanto del dominio de las metodologías normativas como de la capacidad de integrar herramientas computacionales que amplíen el alcance del análisis técnico. En este contexto, la comparación entre diferentes metodologías de diseño resulta relevante debido a que variaciones en parámetros, criterios estructurales y consideraciones de drenaje pueden conducir a soluciones significativamente distintas para una misma condición de tráfico y subrasante.

El presente trabajo surge de una experiencia de Aprendizaje Colaborativo Internacional en Línea (COIL) desarrollada entre estudiantes de ingeniería de la Universidad de La Sabana (Colombia) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en el marco de una asignatura de énfasis de semestres avanzados. El estudio tuvo como propósito comparar el diseño de pavimentos flexibles para tres tramos viales ubicados en la ciudad de Aguascalientes, México, mediante la aplicación de la metodología colombiana del INVIAS [2], la norma AASHTO 93 [1] y criterios mecanicistas empleados por el equipo de la UNAM utilizando los softwares DISPAV-2014 y MT-PAVE 3.0 [3].

El objetivo de este trabajo es comparar los diseños de pavimento flexible obtenidos mediante las metodologías AASHTO 93, INVIAS y herramientas mecanicistas mexicanas bajo diferentes condiciones de subrasante, incorporando herramientas computacionales basadas en IA generativa y modelos de lenguaje de gran escala (LLM) como apoyo al análisis, automatización del cálculo y evaluación sistemática de alternativas estructuralmente viables.

Como apoyo al proceso de diseño, se desarrolló una herramienta computacional en Python orientada a automatizar el cálculo del Número Estructural (SN), explorar múltiples combinaciones de espesores y comparar alternativas mediante una función de costo relativo. Esta aproximación permitió ampliar la exploración del espacio de soluciones técnicamente viables frente al enfoque manual convencional, facilitando la evaluación sistemática de configuraciones estructurales bajo diferentes metodologías de diseño.

El alcance del estudio corresponde a un ejercicio académico aplicado y comparativo orientado al análisis técnico de alternativas de diseño, sin pretender establecer calibraciones regionales ni desarrollar una nueva metodología normativa de pavimentos. Asimismo, el artículo presenta los resultados comparativos obtenidos, las implicaciones técnicas derivadas de las diferencias entre metodologías y las posibilidades que

ofrecen las herramientas computacionales como apoyo al proceso de ingeniería vial.

II. Marco Teórico

II-A. Metodología AASHTO 93

La Guía AASHTO 93 constituye el estándar empírico-mecanicista más influyente para el diseño de pavimentos flexibles a nivel mundial [1]. Se fundamenta en el concepto de serviciabilidad de la vía y relaciona el número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 t (W_{18}) con el Número Estructural (SN), el módulo de resiliencia de la subrasante (M_R), la confiabilidad (Z_R), la desviación estándar combinada (S_0) y la pérdida de serviciabilidad (ΔPSI). Al ser una ecuación implícita, la resolución del SN históricamente se realizaba mediante nomogramas, con los errores de lectura que ello implica.

El M_R se obtiene del CBR mediante la correlación condicional AASHTO: M_R = 1500·CBR para CBR $\leq$ 7 %, y M_R = 3000·CBR para CBR $>$ 7 %. Esta discontinuidad genera un salto significativo en la rigidez estimada al cruzar ese umbral, lo que se traduce en estructuras considerablemente más delgadas y económicas para suelos de media resistencia.

II-B. Normativa INVIAS

El Manual de Diseño de Pavimentos del INVIAS adopta la estructura metodológica de la AASHTO 93 con ajustes para las condiciones colombianas [2]. En particular, ajusta los coeficientes estructurales (a_i) y los factores de drenaje (m_i) para climas tropicales de alta humedad. Al reducir la capacidad de aporte estructural de las capas granulares (susceptibles a la saturación), el INVIAS produce estructuras más conservadoras, con mayor espesor de carpeta asfáltica y de subbase para alcanzar el mismo SN. Esta diferencia es pertinente para Colombia, pero puede representar sobredimensionamiento en zonas semiáridas como Aguascalientes, México.

II-C. Herramientas mecanicistas mexicanas (DISPAV-2014)

El equipo de la UNAM empleó DISPAV-2014, programa de esa institución que evalúa el desempeño mediante teoría multicapa elástica [3]. A diferencia del enfoque empírico-mecanicista, el método mecanicista puro previene fallas específicas: fatiga en la base de la capa asfáltica y ahuellamiento en la subrasante. Complementariamente, se utilizó MT-PAVE 3.0 (Universidad Panamericana) para análisis espectral. Esta aproximación mecanicista contrasta con el enfoque empírico-mecanicista de AASHTO e INVIAS, lo que enriquece la comparación del proyecto COIL.

III. Metodología

III-A. Ensayos de laboratorio y caracterización del suelo

Los estudiantes de la Universidad de La Sabana realizaron directamente la extracción de muestras de suelo representativas y los ensayos de CBR bajo tres condiciones de compactación. La Tabla I resume los resultados obtenidos y su valor correspondiente al Módulo de Resiliencia (M_R), aplicando la correlación AASHTO.

Tabla I
Valores de CBR y Módulo de Resiliencia por escenario de suelo

Escenario	CBR (%)	M_R (psi)	Categoría
1	4.65	6,975	Baja – Suelo Blando
2	14.66	43,980	Media
3	36.58	109,734	Alta – Suelo Firme

Tabla II
Factores de daño vehicular por categoría

Clasificación	Tipo de vehículo	Factor de Daño (FD)
M, A	Motos y autos ligeros	0.00
B	Buses de pasajeros	1.00
C2	Camión rígido 2 ejes	1.01
C3	Camiones rígidos pesados	3.72
T3S2	Articulados (5 ejes)	4.88
T3S3, T3S2R4	Configuraciones pesadas (>5 ejes)	5.23

El salto de M_R entre los escenarios 1 y 2 es de 37,005 psi, lo que representa un incremento de 531 %, producto de la discontinuidad de la correlación AASHTO al cruzar CBR = 7 %. Este resultado implica que pequeñas mejoras en la compactación del suelo blando pueden generar reducciones significativas en el espesor total del pavimento y, por tanto, ahorros importantes en el costo total de la obra.

III-B. Análisis de tráfico y cálculo de W_{18}

Los datos de tráfico provienen de censos vehiculares de la red vial de Aguascalientes (INEGI [6]). La clasificación vehicular mexicana (A, B, C, T) fue traducida a factores de daño equivalentes para la metodología AASHTO/INVIAS. La Tabla II presenta los factores de daño asignados a cada tipo de vehículo.

El Factor Camión (FC) ponderado se calculó dividiendo el aporte de daño total entre el porcentaje de vehículos pesados en el flujo. La Tabla III consolida los parámetros de tráfico y los W_{18} acumulados resultantes para los tres tramos.

Destaca que el Tramo 3, pese a tener el menor TPD (5,040 veh/día), presenta el Factor Camión más elevado (FC = 2.26) por una mayor proporción de vehículos pesados T3S3, lo que resulta en un W_{18} muy similar al de los tramos con mayor volumen. Esto evidencia que la composición del tráfico es tan determinante como su volumen absoluto.

III-C. Desarrollo de la herramienta computacional en Python

La metodología desarrollada integró procedimientos tradicionales de diseño de pavimentos flexibles con herramientas computacionales orientadas a automatizar el análisis y evaluación de alternativas estructurales. El flujo metodológico general comprendió la caracterización geotécnica de los materiales de subrasante, la estimación de tránsito de diseño, el cálculo del Número Estructural (SN) requerido y la generación sistemática de configuraciones estructurales mediante programación en Python. Con el fin de ampliar la exploración de alternativas de diseño, se desarrolló un algoritmo computacional en Python orientado a generar múltiples combinaciones de espesores para

Tabla III
PARÁMETROS DE TRÁFICO Y EJES EQUIVALENTES POR TRAMO

Variable	T1	T2	T3
TPD inicial	6,387	6,387	5,040
Crecimiento	6.70%	6.70%	7.50%
Veh. pesados	6.50%	6.40%	4.50%
Factor Camión	1.74	1.96	2.26
W_{18} acumulado	1,650,422	1,950,568	1,811,466
Período diseño	10	10	10
Z_R	−1,645	−1,645	−1,645
S_0	0.35	0.35	0.35
ΔPSI	2.0	2.0	2.0

capas asfálticas, bases y subbases, verificando automáticamente el cumplimiento del SN requerido y las restricciones mínimas adoptadas para cada metodología. El desarrollo computacional se apoyó en herramientas de IA generativa basadas en modelos de lenguaje de gran escala (LLM), incluyendo ChatGPT y Gemini, utilizadas como asistencia para el refinamiento iterativo del código, depuración de errores y estructuración lógica del algoritmo en Python.

Fase 1 – Mapeo vehicular: construcción de tablas de equivalencia entre la clasificación mexicana y las categorías AASHTO/INVIAS; cálculo del Factor Camión ponderado (FC).

Fase 2 – Cálculo de W_{18}: proyección del tráfico acumulado con factor de crecimiento compuesto para el período de 10 años.

Fase 3 – Resolución numérica del *SN*: conversión del CBR al valor equivalente de M_R y resolución de la ecuación implícita de AASHTO 93 mediante `scipy.optimize.fsolve()`, función que implementa el método de Newton-Raphson para ecuaciones sin solución analítica directa.

Fase 4 - Exploración combinatoria: el algoritmo itera sobre rangos discretos de D1 (carpeta asfáltica) y D2 (base granular), calculando para cada combinación el D3 mínimo de subbase que satisface el SN requerido. La automatización permitió evaluar más de 700 configuraciones estructuralmente viables mediante un proceso de búsqueda sistemática de alternativas.

Fase 5 - Evaluación mediante función de costo relativo: cada combinación válida se evalúa con la función de costo relativo:

$$\text{Costo} = D_1 \times 10 + D_2 \times 4 + D_3 \times 1 \qquad (1)$$

La función de costo relativo fue definida mediante ponderaciones proporcionales asociadas al comportamiento económico esperado de cada capa estructural, asignando mayor peso relativo a las capas asfálticas y menor peso a materiales granulares. Esta aproximación no pretende representar costos reales de construcción ni análisis de ciclo de vida, sino facilitar la comparación sistemática entre alternativas estructuralmente viables dentro del alcance académico y comparativo del estudio.

Fase 6 – Ajuste normativo: los coeficientes y factores de drenaje se alternan entre AASHTO e INVIAS, ejecutando el mismo flujo y generando reportes comparativos automáticos bajo ambas metodologías.

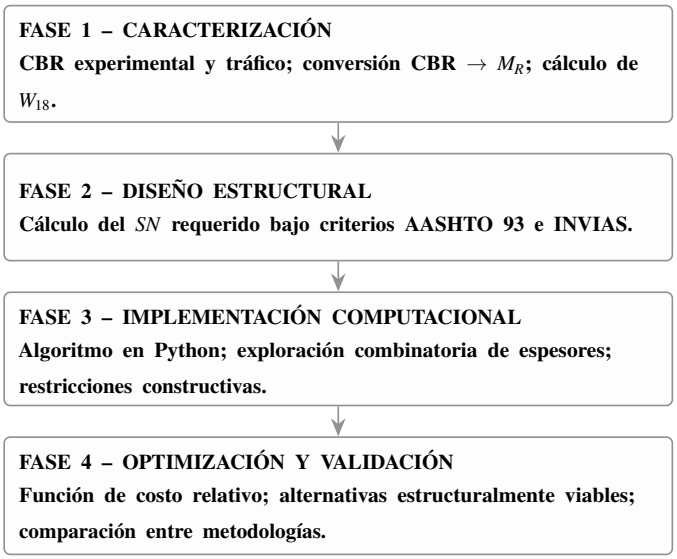


Figura 1. Metodología general para el diseño y optimización del pavimento flexible.

III-D. Proceso iterativo con inteligencia artificial

La colaboración con herramientas de IA generativa no sustituyó el criterio técnico del equipo. Durante el desarrollo del algoritmo, los modelos generaron propuestas que debieron ser revisadas, corregidas y ajustadas por los autores, especialmente cuando omitían restricciones constructivas o sugerían espesores técnicamente posibles desde la ecuación, pero inviables en términos de diseño y construcción. El equipo impuso restricciones mínimas de espesores y verificó que las combinaciones generadas cumplieran los criterios estructurales adoptados. Este proceso permitió utilizar la IA como apoyo al desarrollo y depuración del código, manteniendo la validación técnica bajo responsabilidad del equipo de ingeniería. Como mecanismo de validación, los resultados obtenidos mediante el algoritmo desarrollado fueron contrastados con cálculos manuales ejecutados paso a paso para algunos casos representativos, verificando la coherencia del cálculo del SN y de las configuraciones estructurales generadas por el modelo computacional.

La Fig. 1 presenta el diagrama general del flujo metodológico implementado, incluyendo las etapas de caracterización geotécnica, estimación de tránsito, automatización computacional y evaluación comparativa de alternativas de diseño.

IV. RESULTADOS

La Tabla IV consolida los espesores óptimos y costos relativos para los tres tramos bajo AASHTO 93 e INVIAS, para los tres valores de CBR evaluados.

Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias importantes entre las metodologías de diseño evaluadas, particularmente en escenarios con baja capacidad portante de la subrasante. Para valores reducidos de CBR, la metodología INVIAS generó estructuras considerablemente más conservadoras que las obtenidas mediante AASHTO 93, reflejándose en mayores

Tabla IV
ESPESORES ÓPTIMOS (CM) Y COSTO RELATIVO POR TRAMO, METODOLOGÍA Y CBR

CBR (%)	Metod.	Tramo	D_1	D_2	D_3	*SN* req.	Costo
4.65	AASHTO	T1	8.9	15.2	38.1	4.18	74.0
4.65	INVIAS	T1	10.2	15.2	49.5	4.18	83.5
4.65	AASHTO	T2	8.9	15.2	31.8	3.86	71.5
4.65	INVIAS	T2	8.9	15.2	47.0	3.86	77.5
4.65	AASHTO	T3	8.9	15.2	25.4	3.63	69.0
4.65	INVIAS	T3	8.9	15.2	40.6	3.63	75.0
14.66	Ambas	T1–T3	8.9	15.2	15.2	2.39–2.78	65.0
36.58	Ambas	T1–T3	8.9	15.2	0.0	1.68–1.97	59.0

espesores totales y mayores costos relativos asociados a las capas estructurales.

En el escenario de suelo blando ($CBR = 4{,}65\,\%$) se registró la mayor divergencia entre metodologías. En el Tramo 1, INVIAS requiere una subbase de 49,5 cm frente a 38,1 cm de AASHTO 93, con una diferencia de 11,4 cm, además de un mayor espesor de carpeta asfáltica. Este comportamiento se asocia principalmente a los criterios de drenaje y a los coeficientes estructurales empleados por cada metodología.

Para condiciones intermedias y altas de CBR, las metodologías mostraron una tendencia a converger hacia configuraciones estructurales más similares. En estos casos, las restricciones mínimas de espesor y la mayor capacidad portante de la subrasante reducen las diferencias entre alternativas de diseño. Los resultados también evidenciaron la alta sensibilidad del diseño frente a las correlaciones utilizadas entre CBR y módulo resiliente (MR). Aunque las correlaciones empíricas adoptadas permitieron homogenizar parámetros de entrada entre metodologías, debe considerarse que este tipo de aproximaciones presenta dispersión inherente y constituye una simplificación del comportamiento real de los materiales de subrasante. Desde el punto de vista computacional, la automatización desarrollada permitió explorar más de 700 configuraciones estructuralmente viables en tiempos significativamente menores frente a procedimientos manuales convencionales. La implementación del algoritmo facilitó la verificación sistemática de restricciones de diseño, la comparación de alternativas y la evaluación rápida de diferentes combinaciones de espesores para capas asfálticas, bases y subbases.

El equipo de la UNAM, mediante DISPAV-2014 y MT-PAVE 3.0, obtuvo configuraciones con mayor espesor de carpeta asfáltica para condiciones medias de soporte. Esta diferencia refleja la distinción conceptual entre enfoques mecanicistas, orientados al control de estados de esfuerzo y deformación, y métodos empírico-mecanicistas como AASHTO 93 e INVIAS, basados en relaciones de desempeño acumulado y serviciabilidad, permitiendo estructuras más delgadas con mantenimiento periódico.

V. DISCUSIÓN

V-A. Diferencias entre normativas y contexto de aplicación local

La divergencia entre AASHTO 93 e INVIAS en suelos de baja capacidad portante confirma la importancia de contextualizar los parámetros de diseño a las condiciones locales de tránsito, drenaje y subrasante. El enfoque INVIAS adopta criterios conservadores asociados a condiciones de humedad propias del contexto colombiano, lo que reduce el aporte estructural de capas granulares y exige mayores espesores para alcanzar el mismo desempeño estructural.

En zonas semiáridas como Aguascalientes, este conservadurismo puede generar diseños más robustos, pero también potencialmente sobredimensionados si no se calibran adecuadamente los factores de drenaje y las condiciones locales. Por tanto, la comparación no indica que una metodología sea intrínsecamente superior, sino que sus parámetros deben interpretarse dentro del contexto para el cual fueron concebidos.

V-B. Impacto de la IA en la toma de decisiones de ingeniería

La automatización computacional permitió ampliar la exploración de alternativas estructurales y sistematizar la comparación entre configuraciones de diseño. Su principal aporte no radica en sustituir el juicio del ingeniero, sino en acelerar cálculos repetitivos, verificar restricciones y hacer más transparente la selección de alternativas bajo una función de costo relativo. La validación mediante cálculos manuales paso a paso permitió verificar la coherencia de los resultados generados por el algoritmo, reduciendo el riesgo de utilizar la herramienta como una caja negra. En este sentido, la IA generativa se empleó como apoyo al desarrollo del código y no como mecanismo autónomo de decisión técnica.

V-C. Metodología COIL como amplificador del aprendizaje

La experiencia COIL aportó un contexto académico de colaboración internacional que permitió contrastar enfoques normativos y computacionales distintos. Dentro del alcance del artículo, su valor principal fue facilitar una comparación técnica entre metodologías aplicadas en contextos institucionales diferentes, manteniendo el foco del análisis en el diseño de pavimentos flexibles.

VI. CONCLUSIONES

El trabajo permitió identificar diferencias relevantes entre metodologías tradicionales y enfoques mecanicistas de diseño de pavimentos, evidenciando el carácter más conservador de la metodología INVIAS bajo condiciones de baja capacidad portante de la subrasante.

La calidad del suelo de subrasante resultó determinante en la configuración estructural y en el costo relativo de las alternativas evaluadas. En escenarios de suelo blando, las diferencias entre metodologías fueron mayores, mientras que en condiciones de soporte medio y alto los diseños tendieron a converger por efecto de las restricciones mínimas y de la mayor capacidad estructural disponible.

La automatización computacional desarrollada en Python permitió sistematizar el cálculo del SN, evaluar más de 700 configuraciones estructuralmente viables y apoyar la comparación técnico-económica de alternativas. La validación mediante cálculos manuales paso a paso respaldó la coherencia del procedimiento implementado.

La incorporación de herramientas de IA generativa basadas en modelos LLM aportó principalmente al refinamiento iterativo del código, la depuración de errores y la organización lógica del algoritmo, sin sustituir el criterio técnico de ingeniería requerido para validar restricciones, parámetros y resultados.

Como trabajo futuro se propone incorporar análisis de sensibilidad paramétrica, utilizar costos reales de construcción para análisis de ciclo de vida y explorar calibraciones regionales que permitan adaptar las metodologías a condiciones locales de tránsito, clima y materiales.

Referencias

[1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.: AASHTO, 1993.

[2] Instituto Nacional de Vías (INVIAS), *Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para Vías con Bajos Volúmenes de Tránsito*. Bogotá: INVIAS, 2007.

[3] S. Corro Caballero, *DISPAV-2014: Software para diseño de pavimentos flexibles mediante teoría multicapa elástica*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

[4] P. Virtanen et al., "SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python," *Nature Methods*, vol. 17, pp. 261–272, 2020.

[5] R. Fidalgo Valverde y M. Á. Tesouro Díez, "Aprendizaje Colaborativo Internacional en Línea (COIL): una estrategia pedagógica para la internacionalización de la educación superior," *Revista de Educación a Distancia*, vol. 21, no. 66, 2021.

[6] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Aforo vehicular en carreteras y vialidades urbanas, Aguascalientes," México, 2023.

[7] Cesel SA, "Inteligencia artificial en infraestructura de transporte: aplicaciones avanzadas en la gestión de pavimentos de carreteras y aeropuertos," Lima: Cesel SA, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.cesel.com.pe/inteligencia-artificial-en-infraestructura-de-transporte-aplicaciones-avanzadas-en-la-gestion-de-pavimentos-de-carreteras-y-aeropuertos/

[8] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Aspectos geográficos de Aguascalientes. Compendio 2023," México: INEGI, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463916680.pdf

[9] J. I. Cárdenas Capcha, "Diseño empírico mecanicista en pavimentos asfálticos," [Video]. YouTube, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=u6ub-4pW9Oc

[10] Ministerio de Obras Públicas (MOP), "Algunas consideraciones sobre el parámetro confiabilidad (R) utilizado en el diseño de pavimentos según AASHTO 1993," San Salvador: MOP, 2010. [En línea]. Disponible en: https://www.mop.gob.sv/wp-content/uploads/2010/03/confiabili.pdf

[11] Arrow@TU Dublin, "Análisis por confiabilidad del modelo de diseño de pavimentos," Dublín: Technological University Dublin, 2014. [En línea]. Disponible en: https://arrow.tudublin.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1007&context=engschivbk

[12] CivilGeeks, "Método AASHTO 93 para diseño de pavimentos flexibles," [Video]. YouTube, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=7tIcIqx3bro

[13] J. A. Rodríguez y L. F. Villalobos, "Diseño de la estructura de pavimento flexible mediante el método AASHTO – 93 para un tramo de la vía 7506GV14," Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada (UMNG), 2017. [En línea]. Disponible en: https://repository.umng.edu.co/handle/10654/16120

[14] Instituto de Ingeniería de la UNAM, "DISPAV-5-versión 3.0. Actualización del sistema para el diseño estructural de pavimentos asfálticos," México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2022. [En línea]. Disponible en: https://aplicaciones.iingen.unam.mx/consultasspii/DetallePublicacion.aspx?id=4972

[15] Scribd, "Diseño empírico-mecanicista de pavimentos," [Presentación]. 2018. [En línea]. Disponible en: https://es.scribd.com/presentation/382288908/METODO-EMPIRICO-MECANISTICO

[16] B. E. Solórzano Lindao, "Análisis estructural y comparativo para diseño de pavimentos flexibles mediante los softwares IMT-PAVE y WINDEPAV 2.6 del método mecanicista empírico, con el método AASHTO 93," La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.upse.edu.ec/items/dcff7ba0-581c-41ff-b72c-ed6f1d05faed

[17] G. Geotecnia, "Webinar: manejo de información geotécnica con Python," [Video]. YouTube, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=U34iNdyT9cg

[18] J. C. Henríquez Menjívar y E. A. Vásquez Mejía, "Análisis comparativo para diseño de pavimentos flexibles mediante las alternativas IMT PAVE y CR ME del método mecanicista empírico, con el método AASHTO 93," San Salvador: Universidad de El Salvador (UES), 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ues.edu.sv/items/7a812125-73c0-46ce-9b53-cf05e2271215

Definición de un Modelo Operacional de Firewall Mediante Tecnologías de Software Libre para el Fortalecimiento de la Seguridad de Red en el Grupo de Investigación GRID

1st Santiago Londoño Gaviria
Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
santiago.londonog@uqvirtual.edu.co

2nd Diego Alejandro López Grajales
Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
diegoa.lopezg@uqvirtual.edu.co

3rd Luis Eduardo Sepúlveda Rodríguez
Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
lesepulveda@uniquindio.edu.co

***Resumen*— La infraestructura que soporta las tecnologías de la información (TI) en diversos entornos enfrenta desafíos constantes para garantizar la seguridad perimetral frente a amenazas, además de lidiar frecuentemente con altos costos de licenciamiento y con herramientas de gestión que afectan la eficiencia de los procesos de negocio. Además, las tecnologías necesarias para responder a esta necesidad de gestión de la seguridad suelen presentar curvas de aprendizaje pronunciadas y tienden a centralizar el conocimiento operativo en líderes técnicos, lo que genera un punto único de fallo y pone en riesgo la continuidad de los servicios que soportan los procesos organizacionales. Para abordar esta problemática, este trabajo propone un modelo operacional de firewall basado en software libre, validado mediante un caso de estudio en el Grupo de Investigación GRID de la Universidad del Quindío. El desarrollo integra marcos de referencia internacionales y, a la fecha, ha avanzado en el diagnóstico de necesidades, problemas y oportunidades, así como en el análisis del estado del arte mediante un mapeo sistemático. La selección tecnológica se realizará posteriormente mediante el proceso de Análisis y Resolución de Decisiones, con el fin de orientar las fases futuras de diseño arquitectónico modelado en ArchiMate e implementación de un prototipo en laboratorio. Con ello, se busca consolidar una plataforma flexible que descentralice la administración, mejore la visibilidad y el monitoreo del tráfico, y ofrezca una propuesta sostenible y replicable para fortalecer la seguridad de red en organizaciones que requieren proteger activos críticos y optimizar la gestión de su infraestructura tecnológica.**

Palabras clave*— *Firewall, seguridad perimetral, software libre.

I. Introducción

La infraestructura que soporta las tecnologías de la información (TI) se ha consolidado como el pilar operativo de las organizaciones modernas, garantizando la continuidad de los procesos de negocio, la gestión de servicios y la integridad de los activos de información [1]. Proteger estos ecosistemas frente a un panorama de ciberamenazas en constante evolución exige soluciones de seguridad perimetral robustas. No obstante, una proporción significativa de las organizaciones del país enfrenta restricciones presupuestales que dificultan la adquisición y el mantenimiento de licencias para sistemas comerciales de Gestión Unificada de Amenazas (UTM) [7], [8], generando una brecha crítica entre las capacidades de protección disponibles y las amenazas reales a las que están expuestas.

Como alternativa a estos costos, es común la adopción de herramientas de gestión estática de código abierto basadas en el filtrado de paquetes tradicional y en la administración manual de reglas de red. Sin embargo, estas soluciones convencionales carecen de la dinamicidad necesaria para realizar la inspección profunda de paquetes en la capa de aplicación (Capa 7 del modelo OSI), limitando severamente la visibilidad del tráfico en tiempo real frente a los vectores de ataque modernos [2]. Más allá de las limitaciones técnicas, la complejidad inherente a la edición manual de scripts impone una curva de aprendizaje pronunciada que tiende a centralizar el conocimiento operativo en un único líder tecnológico, convirtiéndolo en un punto único de fallo (Single Point of Failure). Ante la indisponibilidad de dicho administrador, la organización pierde su capacidad de respuesta oportuna ante incidentes, poniendo en riesgo la continuidad de sus servicios [3].

Esta problemática dual, tecnológica y operativa, afecta transversalmente a diversas organizaciones, incluyendo instituciones académicas y grupos de investigación que requieren autonomía en su infraestructura [7], [8]. Para el desarrollo de esta investigación, el Grupo de Investigación de Redes, Información y Distribución (GRID) de la Universidad del Quindío se define como caso de estudio para la validación del modelo propuesto. El diagnóstico inicial en este entorno confirmó la presencia de los patrones descritos: dependencia de una solución de filtrado estático, ausencia de visibilidad en tiempo real y concentración del conocimiento operativo en un único administrador. Resolver este desafío representa un reto de ingeniería que trasciende la instalación de un software, requiriendo una aproximación metodológica que garantice la trazabilidad de las decisiones y la sostenibilidad a largo plazo [5].

Para abordar esta problemática, este trabajo propone la definición de un modelo operacional de firewall basado en tecnologías de software libre. El aporte de esta propuesta radica en que no se limita a una configuración de red, sino que articula una convergencia metodológica de marcos de referencia internacionales: PMBOK para la gestión estructurada del ciclo de vida [6], la norma ISO/IEC 27001 para la alineación con las mejores prácticas de seguridad y riesgo operacional [3], y

TOGAF con modelado en ArchiMate para el diseño cohesivo de la arquitectura [5]. Al integrar estos referentes, se proyecta una plataforma capaz de descentralizar la administración, fortalecer la visibilidad del tráfico y ofrecer una propuesta replicable y sostenible, directamente transferible tanto a entornos de investigación como al tejido empresarial colombiano [7], [8].

El resto de este documento se organiza de la siguiente manera: la Sección II describe el contexto del problema y la pertinencia de la investigación. La Sección III expone la justificación teórica y socioeconómica del estudio. La Sección IV detalla el marco metodológico integrado empleado. La Sección V presenta los resultados preliminares obtenidos del diagnóstico NN.PP.OO. y el avance del Estudio de Mapeo Sistemático (SMS). La Sección VI esboza el trabajo futuro planificado para las fases de diseño e implementación del prototipo. La Sección VII abre un espacio de discusión sobre los retos identificados en la gestión de servicios, y la Sección VIII consolida las conclusiones preliminares de este trabajo en desarrollo.

II. Contexto del Problema y Pertinencia

En diversos entornos organizacionales, y en particular en aquellos orientados a la investigación y la experimentación tecnológica, la seguridad perimetral no debe interpretarse únicamente como una barrera de protección, sino como un facilitador de la continuidad operativa y la visibilidad de los servicios [1]. Estos entornos requieren mecanismos de protección que, además de cumplir con los principios de confidencialidad, integridad y disponibilidad, permitan una administración ágil y documentada [3]. La ausencia de un modelo operacional estandarizado suele derivar en una gestión reactiva que compromete la integridad de los activos de información y expone la infraestructura a vectores de ataque modernos que operan en la capa de aplicación [2].

El caso del Grupo de Investigación GRID de la Universidad del Quindío permite observar esta problemática en un escenario real y representativo. El grupo gestiona una infraestructura compleja que soporta laboratorios de virtualización, bases de datos y servicios en la nube para procesos de docencia, investigación y extensión. El diagnóstico técnico realizado evidenció que la seguridad perimetral se fundamenta en un esquema de filtrado estático basado en scripts manuales de reglas de red, lo que limita la capacidad institucional en tres dimensiones críticas. En primer lugar, la inspección de tráfico se restringe a las capas de red y transporte, generando un punto ciego operativo ante amenazas que se camuflan en tráfico aparentemente legítimo [2]. En segundo lugar, la complejidad de la administración manual ha consolidado un punto único de fallo (Single Point of Failure), donde la respuesta ante incidentes depende exclusivamente de un único administrador sin procedimientos documentados que garanticen la continuidad operativa [3]. En tercer lugar, la carencia de mecanismos de alerta automática y monitoreo en tiempo real impide una gestión proactiva de la seguridad, exponiendo los servicios a posibles degradaciones sin capacidad de detección oportuna [1].

La pertinencia de este trabajo se sostiene en tres dimensiones. Primero, aborda un problema real de gobernanza de TI donde la protección efectiva de activos debe equilibrarse con el uso eficiente de recursos presupuestales, un desafío transversal al tejido empresarial y académico colombiano [7], [8]. Segundo, la propuesta trasciende la implementación de una herramienta técnica al estructurar el modelo bajo estándares internacionales de arquitectura empresarial y seguridad de la información [5], [3], permitiendo que el trabajo sea un caso de estudio sobre cómo la ingeniería de sistemas puede producir soluciones sostenibles, auditables y documentadas. Tercero, el resultado proyectado no se limita a una configuración local sino que busca consolidar un marco operacional transferible, ofreciendo una hoja de ruta replicable para organizaciones que enfrentan retos similares de seguridad perimetral con restricciones presupuestales [7], [8].

III. Justificación

La relevancia de esta investigación trasciende la actualización tecnológica y se fundamenta en la necesidad de establecer un modelo de gestión de seguridad resiliente, adaptable y alineado con los estándares de la industria. Desde una perspectiva operativa, la definición de este modelo permite superar las limitaciones de observabilidad presentes en infraestructuras basadas en filtrado estático tradicional. La integración de capacidades de inspección profunda de paquetes no solo fortalece la detección de amenazas avanzadas, sino que habilita la generación de métricas analíticas para la toma de decisiones informada. Esto garantiza que la infraestructura de red soporte flujos de datos críticos sin comprometer la integridad de los activos científicos, permitiendo una visibilidad detallada de los servicios en tiempo real [2].

Desde el ámbito organizacional, el modelo propuesto justifica su implementación al formalizar procesos que mitigan los riesgos asociados a la centralización del conocimiento. La dependencia de gestiones empíricas y scripts personalizados representa una vulnerabilidad crítica para la continuidad operativa. Al estructurar el marco de trabajo bajo estándares internacionales como TOGAF [5] y la norma ISO/IEC 27001 [3], se asegura que la seguridad perimetral se convierta en un activo institucional documentado y auditable. Este enfoque reduce los tiempos de respuesta ante incidentes, facilita la transferencia de conocimiento y elimina la existencia de puntos únicos de fallo técnico, asegurando una administración sostenible en el tiempo [5], [3].

Finalmente, desde una dimensión estratégica y socioeconómica, el modelo responde a la realidad del entorno productivo nacional. Según la clasificación empresarial del Decreto 957 de 2019 [7] y los análisis de entorno económico de la ANDI [8], el tejido empresarial colombiano está compuesto mayoritariamente por Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (MiPymes). Para este segmento, los costos de licenciamiento, soporte y renovación de sistemas UTM comerciales resultan financieramente inviables. En este escenario, validar alternativas basadas en software libre no es únicamente una medida de ahorro, sino un ejercicio de autonomía tecnológica. La implementación en el Grupo de Investigación GRID busca evidenciar cómo organizaciones con restricciones presupuestales pueden alcanzar niveles de ciberseguridad de grado empresarial, aprovechando sus recursos mediante una arquitectura de seguridad abierta y robusta [7], [8].

IV. Marco Metodológico

La estructuración del modelo operacional propuesto se rige por un enfoque sistémico que integra estándares internacionales de gestión y seguridad, asegurando que la solución tecnológica trascienda la mera configuración de software y se convierta en un activo estratégico. Para orquestar este proceso de manera rigurosa, la dirección del proyecto adopta los principios fundamentales del *Project Management Body of Knowledge* (PMBOK) [6]. Esta base administrativa garantiza una ejecución organizada, la trazabilidad de los entregables y el cumplimiento de los objetivos institucionales a través de un ciclo de vida claramente definido.

Bajo este sustento de gestión, el núcleo de la estrategia de defensa se diseña sobre la base de la norma ISO/IEC 27001 [3], priorizando la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la red. Para materializar estos principios en controles operativos tangibles, se integran las directrices complementarias de la norma ISO/IEC 27002 [10] junto con las funciones críticas del *NIST Cybersecurity Framework 2.0* (Identificar, Proteger, Detectar, Responder y Recuperar) expuesto en [1]. Consecuentemente, el firewall transita de ser un simple filtro de paquetes a convertirse en el eje dinámico de una arquitectura de defensa en profundidad.

Para asegurar que la herramienta de software libre seleccionada satisfaga estas rigurosas exigencias de seguridad, se emplea el proceso de Análisis y Resolución de Decisiones (DAR) de CMMI [11], el cual proporciona un mecanismo estructurado, objetivo y auditable para la evaluación de alternativas tecnológicas. Finalmente, la integración de la solución elegida se estandariza mediante el marco de trabajo TOGAF [5], utilizando el lenguaje de modelado ArchiMate [5] para representar de forma cohesiva la interacción entre las capas de negocio, aplicación y tecnología.

Como resultado de este entramado metodológico, el proyecto se operativiza a través de las cinco fases secuenciales que se ilustran en la Fig. 1. La primera fase, denominada Diagnóstico de Necesidades, Problemas y Oportunidades (NN. PP. OO.), se centra en caracterizar la postura de seguridad perimetral actual del caso de estudio. En esta etapa se emplean instrumentos de recolección de datos y la triangulación con estándares internacionales para identificar brechas técnicas y operativas, estableciendo así los requerimientos fundamentales que debe satisfacer el modelo propuesto.

La segunda fase consiste en la ejecución de un Estudio de Mapeo Sistemático (SMS) para la selección tecnológica. Esta fase científica permite identificar y evaluar el estado de la práctica en tecnologías de firewall de código abierto y marcos de gestión de servicios de TI. La selección final de la plataforma tecnológica se realiza mediante la aplicación del método DAR, garantizando que la decisión se fundamente en criterios técnicos objetivos y en el máximo respaldo de la literatura especializada.

La tercera fase aborda el diseño de la arquitectura del modelo operacional. En este punto, se utiliza el marco de trabajo TOGAF para estructurar la solución en sus diferentes niveles de abstracción. Se definen formalmente los procesos de gobernanza, las políticas de seguridad y la configuración lógica de servicios avanzados como la inspección profunda de paquetes (DPI) y redes privadas virtuales (VPN), modelando cada componente mediante el lenguaje ArchiMate para asegurar la documentación técnica permanente del activo.

La cuarta fase corresponde a la implementación de un prototipo funcional en un entorno de laboratorio controlado. El diseño arquitectónico se materializa mediante la instalación y configuración de la tecnología de software libre seleccionada, simulando las condiciones operativas reales de la infraestructura del caso de estudio. En esta etapa se integran además herramientas de visualización y monitoreo continuo que permiten centralizar la gestión de eventos de seguridad.

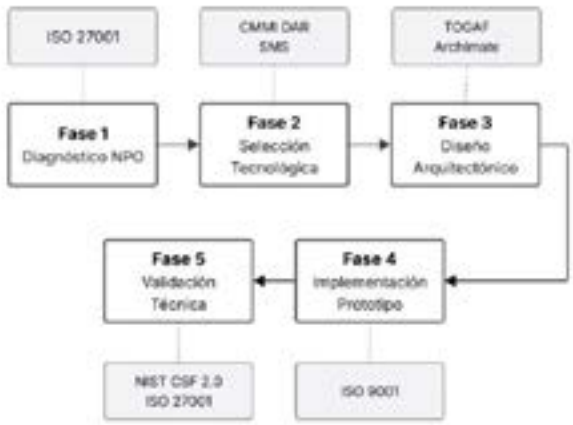


Fig. 1. Flujo metodológico

Finalmente, la quinta fase se dedica a la validación técnica mediante pruebas de tráfico en la capa de aplicación. Se ejecutan protocolos experimentales de carga y estrés para evaluar el rendimiento del prototipo y su eficacia frente a posibles vectores de amenaza. Los resultados de estas pruebas permiten verificar la estabilidad del modelo y su capacidad para fortalecer la seguridad perimetral sin degradar la disponibilidad de los servicios de red críticos para la organización.

V. Resultados Preliminares

Para establecer una línea base objetiva sobre la postura de ciberseguridad en el entorno de red de las organizaciones, la fase inicial de la investigación exigió una caracterización exhaustiva mediante la triangulación metodológica de datos. Este levantamiento de información en el caso de estudio seleccionado se articuló mediante dos instrumentos de evaluación: el diagnóstico previo sobre la seguridad de la infraestructura en la nube documentado por García y Caicedo en [9] (empleado como línea base tecnológica de soporte), y una entrevista estructurada diseñada específicamente para auditar detalladamente los controles de seguridad perimetral vigentes. El procesamiento sistemático y la correlación de ambos instrumentos frente a las directrices de la norma ISO/IEC 27002 [10] y el *NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0* [1] permitieron la extracción y estructuración de las Necesidades, Problemas y Oportunidades (NN. PP. OO.) consolidadas en la Tabla I.

El análisis técnico derivado de este diagnóstico evidenció brechas críticas en la infraestructura perimetral. Se determinó que el sistema actual opera bajo la herramienta Shorewall (versión 5.2.8), administrando nueve zonas de red empíricas y gestionando accesos remotos mediante OpenVPN (versión 2.6.3). No obstante, la entrevista perimetral constató que las políticas de filtrado se configuran enteramente de forma manual a través de la interfaz de línea de comandos (CLI). Esta operatividad carece de un procedimiento formal de gestión de cambios (incumpliendo el Control 8.32 de ISO/IEC 27002 [10]) y, al depender de un único administrador técnico, centraliza el riesgo operativo y eleva la probabilidad de errores humanos en la definición de políticas.

Adicionalmente, se identificaron vulnerabilidades en el monitoreo y gestión de eventos de seguridad. La administración y notificación de incidentes se ejecutan de manera manual mediante correo electrónico, debido a que la plataforma perimetral no posee un tablero de control unificado. Esta ausencia de alertas tempranas y de análisis dinámico de registros (*logs*) dificulta la detección de anomalías y limita la visibilidad en la capa de aplicación (Capa 7), demostrando la urgencia de migrar hacia una solución ágil que permita la inspección profunda de paquetes (DPI) sin degradar el rendimiento operativo de la red.

Frente a este escenario de brechas, la segunda fase de la investigación aborda la planificación y ejecución del Estudio de Mapeo Sistemático (SMS) bajo las estructuras PICOC y GQM, formulando preguntas de investigación (RQs) orientadas a la identificación de marcos de gestión (G1) y soluciones tecnológicas de código abierto (G2). La ejecución de las ecuaciones de búsqueda en las bases de datos científicas seleccionadas arrojó un volumen bibliográfico inicial masivo de 390.522 registros (335.401 en IEEE Xplore, 42.540 en Springer, 11.688 en ScienceDirect y 893 en Taylor & Francis), garantizando un espectro de exploración sumamente amplio.

Con el fin de refinar este universo de datos y extraer únicamente literatura con un alto nivel de pertinencia, se aplicó el protocolo de filtrado basado en criterios de exclusión predefinidos. Este riguroso proceso de depuración sistemática permitió descartar los registros duplicados y no alineados, reduciendo la muestra final a un consolidado de 192 estudios primarios elegibles (distribuidos en 137 registros de Springer, 47 de ScienceDirect, 7 de IEEE Xplore y 1 de Taylor & Francis). Actualmente, este portafolio seleccionado se encuentra en fase de extracción de datos y evaluación de calidad. Los hallazgos resultantes constituirán las alternativas de entrada formales para el método de Análisis y Resolución de Decisiones (DAR) de CMMI, asegurando que la selección tecnológica definitiva para el modelo operacional cuente con un respaldo científico transparente, auditable y libre de sesgos de conveniencia.

VI. Trabajo Futuro

Al concebirse esta investigación como un trabajo en curso (*Work in Progress*), la ruta de ingeniería posterior se encuentra estructurada para dar continuidad a las fases metodológicas planificadas. Las actividades subsecuentes se orientan a la culminación del estudio del estado del arte, el diseño detallado de la arquitectura bajo estándares internacionales, la implementación del prototipo en laboratorio y la validación técnica del modelo operacional.

A. Culminación de la Selección Tecnológica

El esfuerzo inmediato se centrará en finalizar la extracción de datos y la evaluación de calidad de los 192 estudios primarios consolidados en el Estudio de Mapeo Sistemático (SMS). Con base en esta evidencia científica, se procederá a la aplicación del proceso de Análisis y Resolución de Decisiones (DAR) establecido por el modelo CMMI [11]. Este método formal permitirá evaluar de manera objetiva diferentes plataformas de firewall de código abierto frente a criterios de selección ponderados, derivados directamente del diagnóstico de necesidades (NN. PP. OO.) presentado en la Sección V. Los criterios de selección evaluarán la capacidad nativa de inspección profunda de paquetes (Capa 7), la disponibilidad de interfaces gráficas centralizadas de usuario (GUI), el consumo de recursos de procesamiento y la madurez de su soporte comunitario.

B. Diseño de la Arquitectura del Modelo Operacional

Una vez seleccionada la tecnología idónea mediante el proceso DAR, se dará inicio al diseño de la arquitectura del modelo empleando el marco de arquitectura empresarial TOGAF [5] y el lenguaje de modelado estándar ArchiMate [5]. Esta fase contempla la estructuración de la solución mediante la integración cohesiva de tres capas fundamentales de forma secuencial. En primer lugar, la capa de negocio definirá los procesos operativos, las políticas de ciberseguridad perimetral y los flujos formales de gestión de incidentes y control de cambios bajo las directrices y controles establecidos en la norma ISO/IEC 27001 [3]. En segundo lugar, la capa de aplicación modelará de forma detallada los servicios lógicos de seguridad requeridos (tales como la inspección profunda de paquetes (DPI), redes privadas virtuales (VPN) y filtrado de contenido) además de estructurar el tablero centralizado de monitoreo continuo para el análisis gráfico del tráfico de red. Finalmente, la capa de tecnología abordará el diseño de la infraestructura lógica y física, lo cual permitirá mapear formalmente las nueve zonas de red identificadas en la fase de diagnóstico inicial y determinar de manera precisa la interacción del hardware de soporte.

C. Implementación del Prototipo en Laboratorio

La fase de implementación consistirá en el despliegue del prototipo funcional en un entorno de laboratorio controlado que simule de forma fiel el escenario de producción del caso de estudio. Se configurará el hardware dedicado mediante la instalación de la tecnología seleccionada y se procederá con la segmentación de red en concordancia con el diseño arquitectónico de zonas. En esta etapa se integrará el tablero de control de visualización en tiempo real, permitiendo centralizar la recolección de eventos de seguridad y reportes de rendimiento sin incurrir en costos de licenciamiento comercial

D. Validación Técnica y Pruebas de Tráfico en la Capa de Aplicación

Finalmente, la validación del prototipo se ejecutará mediante un protocolo riguroso de pruebas experimentales en la capa de aplicación. Se diseñarán escenarios de estrés y carga continua para medir el comportamiento del firewall (uso de

TABLA I. SÍNTESIS DE NECESIDADES, PROBLEMAS Y OPORTUNIDADES IDENTIFICADOS

Categoría	Descripción	Relación / Impacto
Necesidad (N)	Monitoreo continuo de ciberseguridad (NIST CSF: DE.CM) para detectar actividades de red inusuales.	Sustenta la visualización de tráfico total, conexiones activas e intentos rechazados en tiempo real.
Necesidad (N)	Monitoreo de la capacidad (ISO 27002: Control 8.6) para prevenir fallos por saturación.	Exige paneles de estado del firewall (CPU, memoria, sesiones activas, uptime).
Problema (P)	Administración manual de reglas por consola, sin un flujo estructurado de control de cambios.	Centraliza el conocimiento en un único líder, creando un punto único de fallo (SLA en riesgo).
Problema (P)	Ceguera en la capa de aplicación (Capa 7), imposibilitando la inspección profunda de paquetes.	Aumenta la exposición ante amenazas modernas que evaden controles tradicionales en Capas 3/4.
Oportunidad (O)	Soberanía tecnológica y optimización financiera mediante el uso de software libre.	Elimina costos de licenciamiento de UTMs comerciales sin comprometer la seguridad perimetral.
Oportunidad (O)	Estandarización y documentación de la arquitectura perimetral mediante marcos internacionales.	Facilita la replicabilidad y la transferencia de conocimiento en la organización mediante TOGAF.

CPU, consumo de memoria y latencia) ante transferencias masivas de datos, evaluando el cumplimiento del Control 8.6 de ISO/IEC 27002 [10]. Asimismo, se realizarán auditorías de seguridad perimetral simuladas, incluyendo escaneos de puertos y pruebas de penetración controladas, con el fin de verificar la efectividad de las reglas de inspección profunda y el sistema de alertas proactivas ante posibles vectores de ataque. Los resultados obtenidos servirán como evidencia empírica para validar la viabilidad, escalabilidad y sostenibilidad del modelo propuesto antes de su eventual transferencia tecnológica al entorno real de operación.

VII. DISCUSIÓN

La estructuración de un modelo operacional de firewall bajo un enfoque de ingeniería formal plantea debates significativos en torno a la viabilidad, el costo de implementación y la complejidad administrativa de los estándares seleccionados. En primer lugar, la integración de marcos de referencia heterogéneos (como PMBOK [6] para la gestión de proyectos, TOGAF [5] para la arquitectura de TI, CMMI [11] para la toma de decisiones y las normas ISO/IEC 27001 [3] y 27002 [10] para la seguridad) podría interpretarse inicialmente como un exceso de formalismo (*overhead*) para infraestructuras con recursos limitados. No obstante, la evidencia recopilada en la fase de diagnóstico técnico sugiere lo contrario. La adopción de gestiones empíricas y rudimentarias en redes de soporte a la investigación no obedece a la falta de herramientas, sino a la carencia de procesos documentados, lo que perpetúa la centralización del conocimiento técnico y consolida el riesgo de punto único de fallo. Por lo tanto, la formalización metodológica propiciada por estos marcos no representa una carga administrativa innecesaria, sino el mecanismo indispensable para garantizar que la transición tecnológica sea sostenible, auditable y transferible en el tiempo.

En segundo lugar, surge un dilema clásico en la ingeniería de seguridad perimetral relacionado con la selección de tecnologías de software libre frente a las plataformas UTM comerciales de nivel empresarial. Si bien las soluciones propietarias ofrecen soporte técnico inmediato, actualizaciones automáticas homologadas y una menor curva de aprendizaje inicial, sus costos de licenciamiento continuo resultan prohibitivos para el 97% del tejido empresarial formal en Colombia [8] y para laboratorios académicos con presupuestos restringidos. La alternativa de código abierto, evaluada científicamente mediante el Estudio de Mapeo Sistemático (SMS), democratiza el acceso a capacidades avanzadas de protección como la Inspección Profunda de Paquetes (DPI) en la capa de aplicación. Sin embargo, es imperativo reconocer que el software libre traslada el costo financiero hacia el esfuerzo de ingeniería e integración. Para mitigar este reto, el diseño propuesto en esta investigación no se limita a la instalación de una herramienta, sino que define un modelo operacional estructurado que incluye tableros de visualización centralizada y documentación estandarizada en ArchiMate [5], reduciendo sustancialmente la curva de aprendizaje de futuros administradores de red y garantizando la autonomía tecnológica de la organización.

Finalmente, el uso del Grupo de Investigación GRID de la Universidad del Quindío como caso de estudio permite validar la hipótesis de que las brechas de ciberseguridad en entornos de soporte a la investigación (TERS) son homólogas a las que enfrenta el sector productivo nacional bajo restricciones presupuestarias similares. Aunque el diagnóstico se circunscribe a un entorno académico específico, el análisis cuantitativo de los 192 estudios primarios elegidos en el SMS demuestra que los retos de visibilidad técnica, la degradación del rendimiento por acumulación de reglas estáticas y la centralización operativa son desafíos globales y sistémicos en la gestión de servicios de TI. En consecuencia, el modelo operacional en construcción no constituye una solución local aislada, sino un marco de referencia escalable y directamente replicable, capaz de guiar la modernización perimetral coste-eficiente en una amplia gama de organizaciones que requieran proteger activos de información críticos sin comprometer su viabilidad financiera.

VIII. Conclusiones

La formalización de un modelo operacional de firewall mediante la convergencia de marcos internacionales de ingeniería y gobernanza (tales como PMBOK [6], TOGAF [5], CMMI [11] y la norma ISO/IEC 27001 [3]) demuestra de manera contundente que la gestión de la ciberseguridad perimetral en las organizaciones contemporáneas no debe abordarse como una actividad netamente técnica o empírica. La transición desde esquemas rígidos basados en configuraciones manuales hacia una arquitectura dinámica y observable exige una fundamentación metodológica estructurada. Este enfoque conceptual garantiza que la modernización tecnológica no sea un evento aislado, sino un proceso sostenible, auditable y alineado con los objetivos de continuidad operativa de la entidad.

El diagnóstico técnico detallado en el caso de estudio ratificó que las limitaciones operativas de los esquemas perimetrales convencionales trascienden la ceguera de visibilidad en la capa de aplicación (Capa 7 del modelo OSI). La carencia de un flujo estructurado para la gestión de incidentes y control de cambios, sumada a la centralización del conocimiento técnico en un único administrador, consolida vulnerabilidades críticas que amenazan de forma directa la disponibilidad de la red. Bajo esta premisa, se concluye que el fortalecimiento de la infraestructura requiere no solo la adopción de herramientas con capacidades de inspección profunda de paquetes (DPI), sino el establecimiento de un modelo que formalice y documente los procesos, mitigando el riesgo operativo asociado al factor humano mediante la descentralización de las tareas de administración.

Asimismo, el rigor metodológico aplicado en la ejecución del Estudio de Mapeo Sistemático (SMS), logrando depurar y refinar un volumen bibliográfico inicial masivo de 390.522 registros hasta consolidar una muestra selecta de 192 estudios primarios elegibles, valida la necesidad de fundamentar las decisiones tecnológicas en evidencia científica estructurada. Este proceso sistemático previene la adopción de herramientas basadas en sesgos de conveniencia o preferencias comerciales, asegurando que la posterior selección de la tecnología a través del proceso de Análisis y Resolución de Decisiones (DAR) de CMMI responda con precisión matemática y técnica a las necesidades reales diagnosticadas en la organización.

Finalmente, la propuesta de un modelo operacional basado en tecnologías de software libre adquiere una relevancia estratégica de escala nacional. Frente a las severas restricciones financieras que limitan la adquisición de sistemas UTM comerciales en el tejido empresarial colombiano, conformado mayoritariamente por Mipymes de acuerdo con el contexto regulatorio del Decreto 957 de 2019 [7] y los balances de la ANDI [8], el código abierto se consolida como una alternativa competitiva de ingeniería de alto nivel. La validación en curso dentro del Grupo de Investigación GRID demuestra que es técnicamente viable estructurar soluciones perimetrales robustas, coste-eficientes y alineadas con estándares globales de gobernanza. Con ello, se aporta un marco de referencia directamente transferible que promueve la soberanía tecnológica, la democratización de la ciberseguridad y la resiliencia en la protección de activos de información críticos en el país.

References

[1] National Institute of Standards and Technology (NIST), "The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0," NIST CSWP 29, 2024. [En línea].Disponible:https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/CSWP/NIST.CSWP.29.pdf

[2] W. Stallings, Computer Security: Principles and Practice, 5th ed. Pearson Education, 2022.

[3] Organización Internacional de Normalización, "Sistemas de gestión de la seguridad de la información - Requisitos," ISO/IEC 27001:2022, 2022.

[4] D. Duque Agudelo, "Plan de Seguridad Informática," Trabajo de grado, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2022.

[5] Q. A. Mumtaza et al., "Enterprise Architecture Design Using TOGAF ADM and ArchiMate for Optimized Resource Management," Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl., vol. 16, no. 2, 2025.

[6] Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), 7th ed. Project Management Institute, 2021.

[7] Ministerio de Comercio, Industria y Turismo de Colombia, "Decreto 957 de 2019: Por el cual se reglamenta la clasificación de las micro, pequeñas y medianas empresas," Bogotá, Colombia, Jun. 2019.

[8] Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), "Balance 2025 y Perspectivas 2026," ANDI, Dirección de Asuntos Económicos, Bogotá, Colombia, 2026.

[9] M. A. García Osorio y H. Caicedo Tangarife, "Entrevista Estructurada: Seguridad de la Infraestructura en la Nube del grupo de investigación GRID," Universidad del Quindío, Armenia, Colombia, Rep. Tec. v3, 2026.

[10] Organización Internacional de Normalización, "Tecnología de la información - Técnicas de seguridad - Código de práctica para controles de seguridad de la información," ISO/IEC 27002:2022, 2022.

[11] CMMI Product Team, "CMMI for Development, Version 1.3," Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, Tech. Rep.CMU/SEI-2010-TR-033,2010.

Safe-Motion: An AI-Based Wearable for Enhancing Women's Safety through Stress Detection

Gerhaldine Suárez Bernal
Department of Mechatronics Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
gesuarezb@unal.edu.co

Alina Idaly Ortiz Martinez
Department of Electrical and Electronic Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
alortizma@unal.edu.co

Valentina Cardona Corredor
Department of Electrical and Electronic Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
incardonac@unal.edu.co

Maribel Anaya Vejar
Department of Electrical and Electronic Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
manaya@unal.edu.co

Abstract*—In densely populated cities such as Bogotá, harassment in public transportation represents a persistent threat to women, highlighting the urgent need for innovative technological solutions to improve safety. Safe-Motion is a technological initiative focused on the development of an AI-based wearable device designed to explore the detection of physiological signals associated with anxiety in potentially unsafe situations. The proposed system integrates biometric signals such as electrodermal activity (EDA), heart rate, and temperature, using machine learning techniques to classify stress-related states. The methodology is based on the use of the WESAD dataset, including signal preprocessing, feature extraction, and supervised classification. A Random Forest model is proposed as the main approach due to its robustness for this type of data, along with a comparison with other classical machine learning methods. Additionally, a preliminary hardware architecture based on low-power and cost-effective components is proposed, enabling physiological signal acquisition and the development of a wearable prototype. Expected results include the development of a functional prototype and an initial evaluation of the classification model. These results aim to assess the feasibility of this type of system for improving women's safety in public transportation.

Keywords*— Machine learning, Wearable devices, Stress detection

I. Introduction

Every day, millions of women board buses, metro cars, and shared transit vehicles as part of their routine, yet for many, these journeys are not simply commutes, but spaces where they face harassment, such as unwanted contact, verbal harassment, and sexual violence. These situations occur with disturbing regularity all over the world.

Unlike street crime, harassment in public transportation unfolds in confined, crowded environments where escape is limited, witnesses are passive, and reporting is rarely immediate. Despite growing awareness of this problem, the technological response has remained largely unchanged: reactive systems that activate only after harm has already been done.

In Bogotá, the scale of this problem is staggering. The 2023 District Mobility Survey (*Encuesta Distrital de Movilidad*, EDM), conducted by the Secretaría Distrital de Movilidad across 22,755 households, found that approximately 419,524 women reported experiencing at least one form of sexual violence in public transportation within a single year, representing 90% of all reported cases [1]. With 36% of women in the city relying on public transit for over 2.7 million daily trips, of which 1.4 million correspond to work commutes, exposure to harassment is not an isolated incident but a structural condition of women's daily mobility [1], [2]. Beyond the immediate physical risk, repeated exposure generates chronic anxiety, restricts freedom of movement, and deteriorates overall quality of life.

Current safety strategies are simply not enough. Panic buttons, police surveillance, security cameras, and emergency mobile applications share a fundamental limitation: they are reactive by design. All of them depend on the victim manually triggering an alert after the incident has already occurred, a particularly unrealistic expectation when that person is in active distress. Moreover, these tools are poorly suited to respond to rapidly evolving threat situations within confined, crowded transit environments.

From a physiological standpoint, the human body produces measurable responses to fear and anxiety. Electrodermal activity (EDA), heart rate (HR), and peripheral skin temperature are well-documented indicators of emotional arousal associated with stress responses [3]. Recent advances in low-cost wearable sensors and embedded computing have made continuous, real-time acquisition of these signals increasingly feasible, opening the possibility of integrating physiological monitoring into personal safety systems.

Building on this, this paper presents Safe-Motion, a wearable system designed to detect sustained anxiety states in women

during public transit journeys. Rather than waiting for a victim to report an incident, Safe-Motion continuously monitors physiological signals and applies machine learning classifiers trained on the WESAD dataset, a well-established benchmark for wearable stress detection, to identify stress-related patterns in real time. The system is designed to be unobtrusive, operating passively in the background without requiring any interaction from the user during normal conditions.

The preliminary hardware architecture of Safe-Motion is built around accessible, low-cost components to ensure scalability and practical deployability. A Raspberry Pi 5 serves as the central processing unit, interfacing with physiological sensors that continuously acquire EDA, HR, and temperature signals. The machine learning pipeline processes the incoming sensor data in real time, applying signal preprocessing and feature extraction before classification, enabling the system to distinguish between baseline and anxiety states with minimal latency.

The main contributions of this work are: (1) a machine learning pipeline for physiological anxiety detection evaluated on the WESAD dataset; (2) a comparative analysis of four classifiers under Leave-One-Subject-Out cross-validation (LOSO-CV); and (3) a preliminary hardware architecture based on low-cost components, including a Raspberry Pi 5 and physiological sensors.

II. Related Work

Physiological stress detection using wearable devices has been extensively studied in recent years. Schmidt et al. introduced WESAD, a multimodal dataset for wearable stress and affect detection that remains one of the most cited benchmarks in the field [4]. Their work demonstrated that wrist-worn sensors, while yielding slightly lower classification accuracy than chest-worn devices, offer a more practical form factor for everyday use, a key consideration for real-world mobile deployment. Subsequent studies using WESAD confirmed that features derived from electrodermal activity (EDA) and heart rate (HR) capture meaningful physiological responses to stress across a variety of real-world scenarios.

Machine learning approaches for classifying stress from physiological signals have also been widely explored. Both Random Forest and Support Vector Machine (SVM) classifiers have shown strong performance when applied to EDA and HR signals, consistently achieving reliable stress/non-stress discrimination across varied experimental conditions [5, 6]. These results establish a methodological foundation for physiological-based affect recognition and motivate the integration of such models into mobile safety applications.

On the commercial side, several wearable safety products have emerged targeting women's personal security. invisaWear offers discreet smart jewelry, like necklaces and bracelets, with a hidden panic button that, when double-clicked, sends the user's GPS location to up to five emergency contacts and optionally connects to 9-1-1 dispatchers [8]. Similarly, FlamAid provides a grenade-shaped personal alarm that, upon pin activation, triggers a 110 dB siren and transmits real-time GPS coordinates to pre-selected contacts via a companion app [8]. While effective, both systems depend entirely on manual activation, which may be unfeasible during a sudden attack or moment of acute anxiety.

A closer parallel to Safe-Motion is Epowar, a smartwatch application developed by University of Bath graduates that uses AI to automatically detect physical attacks by monitoring heart rate and body motion [10]. Upon detecting distress, the app alerts emergency contacts and stores cloud-based evidence including audio, GPS, and vital signs. Epowar represents a significant step forward over manual panic buttons, as it removes the requirement for the user to interact with the device under duress. However, its design focuses on detecting overt physical assault events rather than the gradual onset of physiological anxiety that precedes dangerous situations.

Despite these advances, a critical gap remains. Existing commercial solutions rely on conscious user activation, while automatic systems like Epowar focus on post-attack detection of physical confrontation. No prior work addresses the continuous, passive monitoring of physiological anxiety during everyday urban transit. Safe-Motion addresses this gap by providing automatic stress detection tailored to the urban mobility context.

III. Methodology

A. Dataset

For the development of this research, the WESAD (Wearable Stress and Affect Detection) dataset [3] was used. This dataset was collected using two devices: a chest-worn device (RespiBAN Professional) and a wrist-worn device (Empatica E4). Physiological signals were recorded while inducing conditions designed to generate responses from the sympathetic nervous system, corresponding to three states: baseline, stress, and amusement.

Since no dataset specifically containing physiological signals associated with anxiety in harassment situations was found, WESAD was selected as the closest available approximation, using stress as a proxy for anxiety. This limitation is acknowledged and discussed in Section VI

Given the objectives of Safe-Motion, only signals from the Empatica E4 were used: electrodermal activity (EDA, 4 Hz), blood volume pulse (BVP, 64 Hz), and skin temperature (TEMP, 4 Hz). BVP was resampled to 4 Hz to align with EDA and TEMP. Labels were originally sampled at 700 Hz from the

RespiBAN, and were also resampled to 4 Hz. Only classes 1 (baseline), 2 (stress), and 3 (amusement) were retained. class 0 (undefined) and class 4 (meditation) were excluded. Signal Preprocessing

B. *Signal Preprocessing*

All the signals within the dataset set were synchronized to a common sampling rate of 4Hz, this was done in order to allow processing based on aligned windows, since the BVP signal was originally sampled at 64 Hz, it was necessary to perform subsampling at 4 Hz using the scipy.signal.resample function, Additionally the labels displayed at 700 Hz were resampled to 4 Hz and rounded to the nearest integer class value.

We also eliminated the samples with NaN values to avoid instability in the feature extraction process. After pre-processing, we kept only the baseline, stress, and amusement classes

Finally, Z-score normalization per subject was applied to each signal, subtracting the average and dividing by the standard deviation of each of the subjects. Doing this process reduces inter-individual physiological variability, allowing the models to focus only on patterns related to stress rather than differences in individual baseline levels.

C. *Features Extraction*

The signals were divided into 10-second windows with a 50% overlap, resulting in 40 samples per window at 4 Hz. The window size selection considered the electrodermal response latency, which according to previous studies occurs between 1 and 5 seconds after the stimulus [2]. In each window, 5 statistical features were extracted from each signal, resulting in a total of 15 features

TABLE I. FEATURES USED IN THE MODEL

Signal	***Extracted Features***
EDA	Mean, standard deviation, maximum value, number of peaks, linear slope
HR (BVP)	Mean HR (bpm), HRV (ms), maximum HR (bpm), heartbeat count, BVP slope
TEMP	Mean, standard deviation, maximum value, number of peaks, linear slope

The features related to the EDA signal were selected because they allow the analysis of signal variability, which is associated with changes in the sympathetic nervous system. In the case of heart rate (HR), the selected features help describe the cardiovascular response to stress, where a correlation exists between decreased HRV and increased HR. Finally, the temperature features were chosen to capture peripheral vasoconstriction effects associated with stress responses.

To improve robustness and reduce overfitting, data augmentation was applied to each training set. The augmented samples were generated by adding Gaussian noise corresponding to 1% of the standard deviation of each feature, effectively doubling the size of the training data.

D. *Classification*

A total of four supervised classification models were trained and compared. Random Forest was preselected as the main model due to its robustness against noisy data and its ability to handle heterogeneous features with minimal preprocessing requirements. The model was configured with 200 estimators, a commonly used value that provides stable performance without excessive computational cost.

To provide a comparative evaluation, additional classical machine learning models were implemented: Support Vector Machine (SVM) with a radial basis function (RBF) kernel and C=1.0, widely used in physiological signal classification tasks due to its effectiveness in high-dimensional feature spaces [5], K-Nearest Neighbors (KNN) with k=7, selected as an odd value to avoid tie votes during classification and a Multilayer Perceptron (MLP) with two hidden layers of 64 neurons each and early stopping enabled to reduce overfitting.

E. *Evaluation Protocol*

The Leave-One-Subject-Out (LOSO) cross-validation technique was used, considering that it is commonly applied in physiological signal studies where multiple measurements are collected from the same subject [6]. This method helps reduce subject-specific bias and prevents doverfitting caused by having samples from the same person in both the training and test sets. In each fold, one subject was used as the test set, while the remaining subjects were used for training. LOSO was selected instead of a random split because it is considered a standard evaluation method for physiological signal classification, and allows the model to be tested on subjects not seen during training.

Two metrics were reported for each fold: accuracy and weighted F1-score. The weighted F1-score was especially important due to class imbalance, since the amusement class contained fewer samples than the other classes. Final results are presented as mean ± standard deviation across the 14 folds. The standard deviation reflects the variability between subjects, which is an important factor in physiological monitoring systems.

VI. RESULTS AND DISCUSSION

A. *Performance classification*

Table II summarizes the mean accuracy and weighted F1-score obtained by each classifier across the 14 LOSO-CV folds.

TABLE II. Accuracy and F1-weighted

Model	***Accuracy (%)***	***F1-weighted (%)***
SVM	72.5 ± 13.2	69.6 ± 13.7
Random Forest	71.6 ± 18.4	68.6 ± 18.5
KNN	68.2 ± 11.5	66.9 ± 11.6
MLP	65.5 ± 16.7	63.7 ± 16.5

SVM achieved the highest mean accuracy with 72.5% (±13.2%), followed by Random Forest with 71.6% (±18.4%), KNN with 68.2 % (±11.5%), and MLP with 65.5% (±16.7%).

As shown in Figure 1, all models performed similarly in terms of median accuracy, but the wide boxes and outliers make it clear that some subjects were much harder to classify than others, regardless of the model used. This variability between subjects is one of the main challenges of working with physiological signals and has been reported in similar studies.

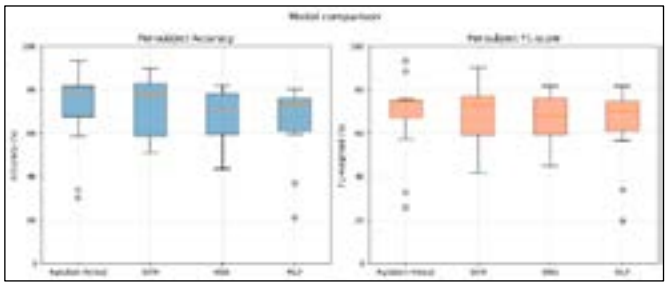


Fig 1. Model Comparison

B. *Importance of features*

Figure 2 shows the feature importance obtained from the Random Forest model.

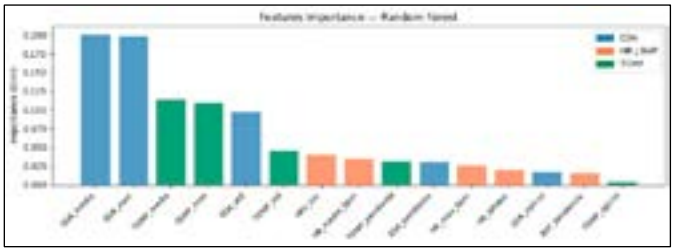


Fig 2. Importance of features

EDA mean and EDA maximum were the most relevant features, which makes sense since electrodermal activity is one of the most direct indicators of sympathetic nervous system activation during stressful situations. Skin temperature features ranked second in importance, which could be explained by the vasoconstriction that occurs during sustained stress, causing the skin temperature to drop gradually. HR and BVP features showed lower importance, possibly because cardiovascular responses tend to be more variable between subjects, making them less consistent as classification features.

C. *Confusion matrix analysis*

Figure 3 shows the confusion matrix obtained for the Random Forest classifier on the last LOSO fold.

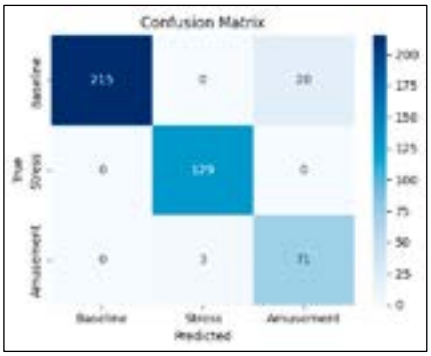


Fig 5. Confusion Matrix

The stress class was the best classified, with all 129 samples correctly identified and no misclassifications. This suggests that the physiological response to stress, particularly in EDA and HR, is distinct enough to be consistently recognized by the model. The most common error occurred between baseline and amusement, where 20 baseline samples were predicted as amusement. This is not surprising since both are low-arousal states where the body behaves similarly, the person is calm in both cases, just for different reasons. A smaller number of amusement samples (3 out of 74) were misclassified as stress, which could reflect brief moments of physiological activation during the amusement condition that the model interpreted as stress.

VII. Proposed System Architecture

Safe-Motion integrates physiological sensing, embedded inference, and a rule-based alert mechanism into a single wearable pipeline. Unlike a purely software-based stress detection system, its distinguishing contribution is the end-to-end deployment of the trained classifier on edge hardware, enabling passive, real-time anxiety detection without cloud dependency. Fig. 4 presents the system architecture diagram.

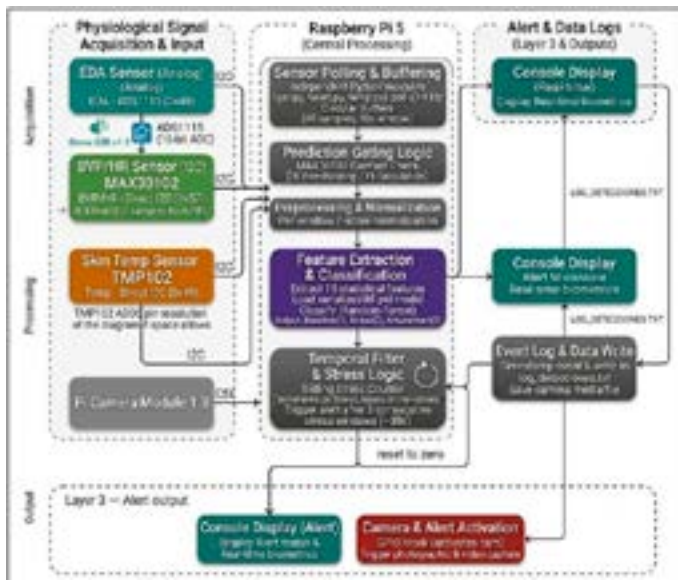


Fig 5. Safe-Motion system architecture overview

A. *Hardware Components*

Three physiological sensors continuously acquire biometric signals from the user. The Grove GSR v1.2 measures electrodermal activity (EDA) as an analog voltage signal; since the Raspberry Pi 5 provides no native analog inputs, an ADS1115 16-bit ADC converts the signal to a digital reading over I2C at address 0x48. Blood volume pulse (BVP) and heart rate (HR) are captured by a MAX30102 optical pulse oximetry sensor module, interfaced directly with the Raspberry Pi 5 over I2C at address 0x57. Raw IR and red LED samples are read from the sensor's FIFO buffer and processed on-device to extract BVP and finger-detection status. Skin temperature is

acquired by a Texas Instruments TMP102 precision sensor (SparkFun Sen-13314) at I2C address 0x49. Address conflicts on the shared I2C bus were resolved by reassigning the TMP102 ADD0 pin from GND to VCC. Additionally, a Raspberry Pi Camera Module Rev 1.3, connected via the CSI interface, is used to capture photographic and video evidence of the monitored situation, enabling visual corroboration alongside the physiological data stream. Table III summarizes all hardware components, communication interfaces, and electrical specifications.

B. *Inference Pipeline*

The trained Random Forest model, exported from the training environment as a serialized .pkl file containing both the fitted estimator and the StandardScaler, is loaded at startup on the Raspberry Pi 5. Three independent Python modules (gsr.py, heart.py, temp.py) poll the sensors at 4 Hz and store readings in circular buffers of 40 samples, corresponding to the 10-second analysis window used during training. Prediction is gated on finger-detection status: classification proceeds only when the MAX30102 reports a confirmed contact reading, determined by [thresholding the raw IR signal amplitude / computing the perfusion index from the AC/DC components of the PPG signal], preventing inference on corrupted BVP signals. Once a window is complete, per-window Z-score normalization is applied to each signal independently, the 15 statistical features described in Section III-C are extracted, and the scaled feature vector is passed to the Random Forest classifier, which returns one of three class labels: baseline (1), stress (2), or amusement (3). This inference cycle repeats every 0.25 seconds, with each new sample sliding the buffer forward by one position.

C. *Sustained Anxiety Detection and Camera Trigger*

A single window-level stress prediction is insufficient to trigger an alert, as transient physiological fluctuations can produce isolated false positives. Safe-Motion therefore implements a temporal majority filter: a sliding stress counter increments each time a window is classified as stress and resets to zero on any non-stress prediction. When three consecutive windows yield a stress classification, corresponding to approximately 30 seconds of sustained physiological arousal, the system generates a camera activation signal. This logic was fully implemented in software and validated during live sensor operation: when the model predicts the stress class for 3 consecutive windows (fig 5), a GPIO activation signal is generated, triggering the Raspberry Pi Camera Module Rev 1.3 to capture photographic and video evidence of the monitored situation. The event is timestamped and written to log_detecciones.txt, and the corresponding image/video file is saved alongside the log entry, providing an auditable record for subsequent analysis.

TABLE III. Hardware components summary

Component	*Signal / Role*	*Interface*
Grove GSR v1.2	Electrodermal activity (EDA)	Analog → ADS1115
ADS1115	ADC for GSR signal	I2C
MAX30102	Blood volume pulse · HR	I2C
Raspberry Pi Camera Rev 1.3	Evidence	CSI
TMP102 (Sen-13314)	Skin temperature	I2C
Raspberry Pi 5	Central processing unit	I2C + USB

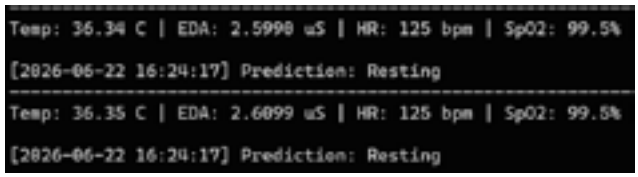


Fig 5. Normal detection

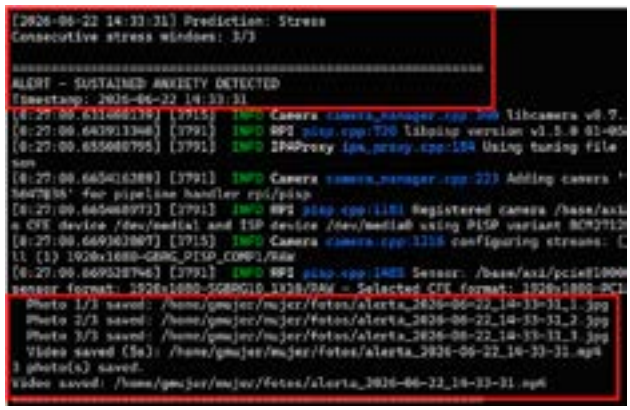


Fig 6. Stress detection and image capture

VIII. LIMITATIONS AND FUTURE WORK

A. *Limitations*

The current implementation of Safe-Motion presents two main limitations. First, the physical prototype is larger than ideal for everyday discreet use, as the housing required to integrate the sensor module, microcontroller, and battery has not yet been miniaturized. This may affect user comfort and willingness to wear the device during daily commutes. Second, the initial manufacturing and component costs of the prototype remain relatively high, which conflicts with the project's core goal of providing an affordable safety solution accessible to the general public. Reducing unit cost will require further optimization of the hardware architecture and component selection.

From a methodological standpoint, the model was trained using the WESAD dataset, which induces stress through controlled laboratory tasks such as public speaking and mental arithmetic. These conditions do not fully replicate the physiological response that a woman might experience during a real harassment situation, so stress was used as a proxy for anxiety throughout this work. Additionally, the Grove GSR sensor measures electrodermal activity at the fingers, while WESAD recorded EDA at the wrist, which means there is a difference in sensor placement that could affect how well the model generalizes to real measurements from the prototype.

B. *Future Work*

Several directions are planned to extend Safe-Motion beyond its current prototype stage. On the hardware side, a miniaturized form factor is a priority, future versions aim to integrate all components into a compact wristband comparable in size to a consumer smartwatch, lowering both the cost and the barrier to adoption.

On the evidence-capture front, future iterations will incorporate an audio recording module that activates automatically upon stress detection, alongside continuous GPS logging, providing users with a timestamped record that can support incident reporting.

From a machine learning perspective, the current neural network model will be refined through expanded training datasets that better represent the physiological diversity of users across different age groups, fitness levels, and stress baselines. Personalized calibration features are also planned, allowing the system to adapt detection thresholds to individual users over time, reducing false positives and improving overall reliability. Finally, future work will explore the integration of Safe-Motion with emergency response infrastructure, enabling direct alerts to local authorities or trusted contact networks without requiring manual intervention from the user.

IX. Conclusion

This paper presented Safe-Motion, a wearable system for passive, real-time anxiety detection in women during public transit journeys. The proposed pipeline combines physiological signal acquisition, electrodermal activity, blood volume pulse, and skin temperature, with a machine learning classifier deployed on edge hardware, enabling automated stress detection without requiring any interaction from the user.

The experimental evaluation on the WESAD dataset under Leave-One-Subject-Out cross-validation demonstrated that classical machine learning models can effectively distinguish between baseline, stress, and amusement states from wrist-worn physiological signals. The Random Forest classifier achieved a mean accuracy of 71.6% (±18.4%) and a weighted F1-score of 68.6% (±18.5%), competitive with SVM, KNN, and MLP under the same protocol. The high inter-subject variability observed across all models underscores a well-known challenge in physiological computing: stress responses are deeply individual, and models trained on population-level data inevitably face generalization constraints when applied to unseen subjects.

Beyond the classification pipeline, a functional hardware prototype was assembled and validated using a Raspberry Pi 5, low-cost physiological sensors, and an Arduino-based serial bridge for the MAX30101/MAX32664 module. The trained model was successfully deployed on the embedded platform, performing real-time inference at 4 Hz with a 10-second sliding window. A proof-of-concept sustained anxiety detection mechanism, requiring three consecutive stress predictions before triggering a camera activation signal, was implemented and tested in live conditions, demonstrating the end-to-end feasibility of the proposed architecture.

Safe-Motion represents a shift from reactive safety systems, which depend on conscious user activation after an incident, toward proactive physiological monitoring that operates transparently in the background. While the current prototype is a first step, the results confirm that the integration of wearable biosensing and on-device machine learning is a viable and promising direction for women's safety technology in urban transit environments. Future work will focus on dataset collection in ecologically valid harassment-analogous scenarios, model personalization, hardware miniaturization, and integration with emergency response infrastructure.

References

[1] Secretaría Distrital de Movilidad, "Encuesta de Movilidad 2023 Bogotá-Región," Observatorio de Movilidad de Bogotá, Bogotá, Colombia, 2023. [Online]. Available: https://observatorio.movilidadbogota.gov.co/publicaciones/resultados/encuesta-de-movilidad-2023.

[2] R. González, "¡Alarmantes cifras de actos de violencia sexual a mujeres en viajes en transporte público en Bogotá!", Concejo de Bogotá D.C., Bogotá, Colombia, Jun. 2024. [Online]. Available: https://concejodebogota.gov.co/alarmantes-cifras-de-actos-de- violencia-sexual-a-mujeres-en-viajes-en/cbogota/2024-06-07/ 172436.php.

[3] P. Schmidt, A. Reiss, R. Duerichen, C. Marberger, and K. Van Laerhoven, "Introducing WESAD, a Multimodal Dataset for Wearable Stress and Affect Detection," in Proc. 20th ACM Int. Conf. Multimodal Interaction (ICMI), Boulder, CO, USA, Oct. 2018, pp. 400–408.

[4] Schmidt, P., Reiss, A., Duerichen, R., Marberger, C., & Van Laerhoven, K. (2018). Introducing WESAD, a multimodal dataset for wearable stress and affect detection. *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI)*, 400–408.

[5] X. Zhang, C. Xu, W. Xue, J. Hu, Y. He, and M. Gao, "Emotion recognition based on multichannel physiological signals with comprehensive nonlinear processing," *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 3886, 2018, doi: 10.3390/s18113886.

[6] Z. Ahmad and N. Khan, "A survey on physiological signal-based emotion recognition," *Bioengineering*, vol. 9, no. 11, p. 688, 2022, doi: 10.3390/bioengineering9110688

[7] A. Healey and R. W. Picard, "Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 6, no. 2, pp. 156–166, Jun. 2005.[3] S. Bobade and M. Vani, "Stress detection with machine learning and deep learning using multimodal physiological data," in Proc. 2nd Int. Conf. Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), Bangalore, 2020, pp. 51–56.

[8] S. Bobade and M. Vani, "Stress detection with machine learning and deep learning using multimodal physiological data," in Proc. 2nd Int. Conf. Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), Bangalore, 2020, pp. 51–56.

[9] invisaWear. *Smart Jewelry Personal Safety Device*. https://invisawear.com

[10] FlamAid. *Personal Safety Device with Alarm and GPS*. https://www.flamaid.com

E-J. Roodt and M. Rahman, "Epowar: AI-powered personal safety app for women," *University of Bath*, Jun. 2023. [Online]. Available: https://www.bath.ac.uk/announcements/new-app-launched-by-university-of-bath-graduates-revolutionises-safety-for-women-walking-alone/

IA sin código: sistema análogo para la generación y exploración de patrones RGB

Valentina Toro Rodríguez
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia
vtoror@udistrital.edu.co

Giovanni Bermúdez Bohórquez
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia
gbermudez@udistrital.edu.co

***Resumen*— Se presenta un sistema análogo orientado a la clasificación y generación de nuevas combinaciones de color en el espacio RGB. La propuesta integra una red de neuronas análogas encargada de identificar los canales rojo, verde y azul, cuyas salidas son utilizadas para explorar dinámicas que permiten la creación de nuevos patrones de color. A partir de estas señales, el sistema introduce variaciones controladas que permiten no solo la reproducción de patrones conocidos, sino también la generación de configuraciones nuevas mediante modulación continua. Este enfoque permite pasar de un sistema puramente clasificador a uno capaz de generar respuestas en tiempo real. Los resultados evidencian la capacidad del sistema para producir respuestas distintas ante estímulos similares, destacando su potencial para la generación adaptativa de patrones. La propuesta no busca reemplazar los sistemas digitales, sino complementarlos, aportando capacidades de adaptación continua y exploración de estados no previstos en el dominio físico.**

Palabras Clave*— *Redes neuronales artificiales (RNA), Sistemas generativos antagonistas (GAN), Electrónica Análoga

I. Introducción

En los sistemas actuales de procesamiento de información, los enfoques digitales han predominado por su precisión y fácil implementación. Sin embargo, al abordar la representación de dinámicas adaptativas, su naturaleza discreta dificulta capturar cambios graduales y la aparición de respuestas variables. En este contexto, se han considerado enfoques bioinspirados donde las respuestas no siguen un comportamiento estrictamente predefinido, sino que pueden variar ante condiciones similares. Esta nueva perspectiva está impulsando el uso de sistemas análogos que operan directamente magnitudes eléctricas alcanzando una representación más natural de estos tipos de comportamientos [1].

Este enfoque bioinspirado no solo simplifica ciertos procesos, sino que también permite aprovechar propiedades propias del dominio análogo, como su respuesta instantánea, su compatibilidad directa con sensores físicos y su capacidad para expresar dinámicas complejas sin requerir codificación extensa [2]. Esta característica incorpora variabilidad que favorece la exploración de diferentes configuraciones y amplía el rango de respuestas posibles.

Bajo esta premisa, a continuación, se presenta el desarrollo de una red neuronal análoga orientada al desarrollo de un clasificador de colores RGB generativo. El modelo de color RGB representa los colores a partir de la combinación de tres canales de luz: rojo, verde y azul. La intensidad de cada canal varía entre 0 y 255, permitiendo representar más de 16 millones de colores distintos, y es el estándar utilizado en pantallas, cámaras y sistemas de visión artificial [3]. En este trabajo fue llevado al dominio análogo a partir de la implementación de neuronas análogas discretas que se constituyen en el punto de partida para la generación de comportamientos más complejos.

Para cumplir el objetivo del proyecto, se propuso la integración de una RNA clásica implementada con amplificadores operacionales con un sistema generativo antagónico tipo GAN desarrollado a partir de VCOs, un generador de ruido y un mezclador de señales alcanzando la exploración de múltiples configuraciones, que son el principio de generación espontánea de patrones que es característico de los sistemas neuronales tipo generativos con las cuales hoy en día se interactúa en todo el mundo [4].

II. Fundamentos

A. Neurona análoga y modelo de procesamiento

Una red neuronal artificial (RNA) es un modelo diseñado para emular la estructura interconectada de neuronas biológicas y su funcionamiento está organizado por capas conectadas entre sí por medio de pesos sinápticos que simulan las diversas sinapsis biológicas que se presentan en el cuerpo humano (Fig 1) [5]. Matemáticamente, cada neurona realiza una sumatoria de productos entre las entradas x_i y los pesos w_{ji} con un umbral θ_j, resultado al que se le aplica una función de activación no lineal para determinar su salida como se expresa en (1)

$$NET_j = \Sigma_i \, x_i \cdot w_{ji} + \theta_j \tag{1}$$

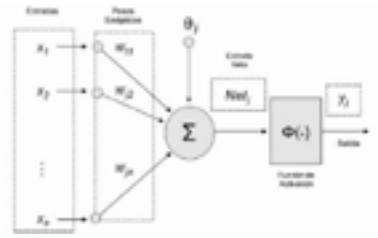


Fig. 1. Modelo de neurona artificial con entradas ponderadas, sumador y función de activación [6].

La salida de la neurona queda determinada por la función de activación aplicada a NET_j. Este proyecto uso la función sigmoide que se expresa en (2) por su transición suave y acotada entre [-1, 1], rango adecuado para tareas de clasificación de patrones.

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-ax}) \quad (2)$$

Yamashita y Nakamura propusieron en [7] la implementación análoga para una RNA a partir del uso de sumadores ponderados usando amplificadores operacionales y la función sigmoidal fue implementada con diodos en donde se aprovecha su característica no lineal de polarización generando una curva S monotónica y acotada [8].

Este principio fue aplicado al desarrollo de un clasificador de patrones RGB, que es un sistema capaz de reconocer y categorizar una entrada según características previamente aprendidas. En este caso, la red neuronal análoga actuó como clasificador de patrones RGB: recibió como entradas tres señales eléctricas continuas, cada una representando la intensidad de un canal de color (rojo, verde y azul) y, a partir de los pesos sinápticos definidos durante su entrenamiento, entregó tres voltajes de salida que indicaron la predominancia de cada canal en el color analizado (Fig 2). Estos voltajes de salida del clasificador se convirtieron en las señales de entrada de la red generativa, estableciendo el puente entre ambos sistemas (Fig 3).

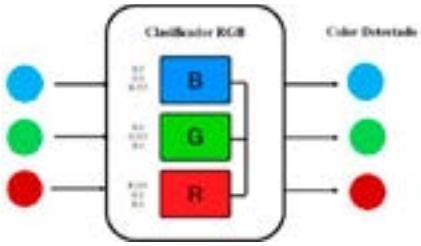


Fig. 2. Sistema Clasificador de Patrones RGB (Fuente: Propia)

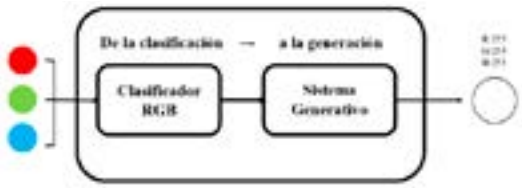


Fig. 3. Flujo del sistema análogo: clasificación RGB y generación de color

B. Sistema Generativo Antagónico (GAN)

Un clasificador de patrones de colores RGB es un problema clásico resuelto con perceptrones multicapa (MLP) y algoritmos de entrenamiento tipo backpropagation que no permite clasificar nuevos colores sin entrar a modificar la estructura algorítmica y por ende, se complica su implementación análoga. Esta afirmación fue la que motivó el desarrollo del proyecto que encontró en los sistemas generativos antagónicos (GAN) una posible solución comportamental y que utiliza como entradas las salidas del clasificador de patrones RGB para generar, a partir de variabilidad controlada, nuevos patrones de colores que permitió nombrar inicialmente el sistema desarrollado como el ChatGPT de los colores (Fig. 4).

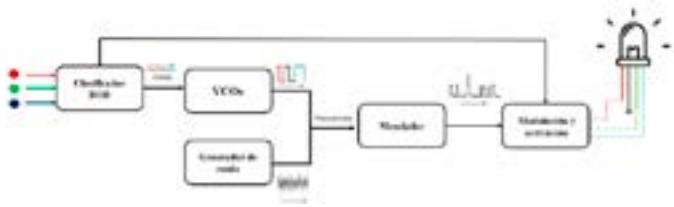


Fig. 4. Sistema Generativo Antagónico (GAN) desarrollado

El sistema GAN desarrollado, implementó un VCO por cada canal de color que a partir de una señal de voltaje varía la frecuencia de salida en una relación inversa que permitió asociar la intensidad de cada canal de color con una banda del espectro visible mediante interpolación lineal convirtiéndose en la relación entre la información cromática clasificada por una RNA y la dinámica generativa del sistema propuesto.

De igual forma se desarrolló un generador de ruido blanco implementado con un diodo zener en el cual se aprovecha las fluctuaciones aleatorias que se presentan en su punto de operación [9]. La importancia de este bloque en el sistema desarrollado radica en su aleatoriedad, impidiendo que el sistema genere una misma respuesta ante un mismo estímulo [10].

Las 3 señales del VCO y el ruido blanco fueron mezcladas con igual ponderación análoga produciendo una señal que modula arbitrariamente la señal de salida que fue aplicada a un LED tipo RGB que enciende todas las gamas de color que fueron aplicadas al clasificador de patrones RGB.

III. Diseño e Implementación

A. Clasificador de patrones RGB implementado

Inicialmente fue desarrollado un sistema de adquisición de colores a partir del uso de sensores LDR con filtros ópticos para el rojo, verde y azul que permitió convertir la luminancia incidente en voltajes para cada canal (Fig 5). Para mitigar los efectos de variación de luminancia propias de los sistemas ópticos, se implementó circuitos de calibración por canal.

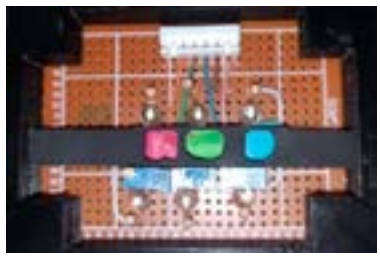


Fig. 5. Sistema de Adquisición de colores desarrollado

El clasificador de patrones RGB fue implementado con tres neuronas análogas para emular una estructura tipo MLP con pesos sinápticos obtenidos a partir de un proceso de entrenamiento, validación y verificación desarrollado con un algoritmo backpropagation. Cada neurona fue implementada con amplificadores operacionales (TL084), resistencias y diodos (1N4148). Los pesos sinápticos fueron implementados con resistencias y las ganancias de los amplificadores ajustadas para obtener los voltajes de salida para cada canal de color (Figs. 6 y 7).

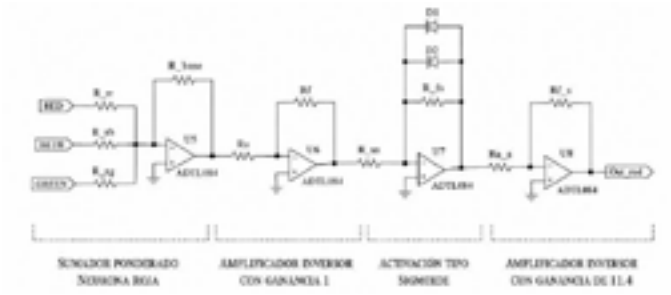


Fig. 6. Neurona análoga implementada para el clasificador de patrones RGB



Fig. 7. Clasificador de patrones RGB implementado

B. Sistema generativo antagónico (GAN) implementado

En la figura 11 se muestra el sistema GAN desarrollado a partir de circuitos de modulación, generación de ruido y mezcla de señales que modula una salida arbitraria. De forma particular, cada VCO fue implementado con un NE555 en configuración astable cuya relación con la frecuencia de salida se ilustra en la Fig. 8 con relación a la señal de voltaje aplicada que es obtenida del clasificador de patrones RGB.

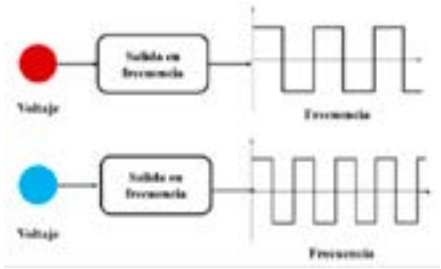


Fig. 8. Asociación entre color, voltaje y frecuencia aplicada a VCOs

En la figura 9 se muestra el generador de ruido implementado utilizando un diodo Zener 1N750 polarizado en su región de ruptura.

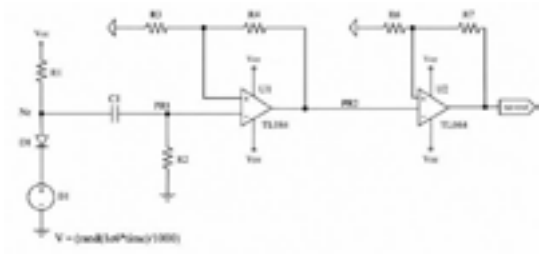


Fig. 9. Configuración ruido blanco (Fuente: Propia)

El mezclador toma las tres señales generadas por los VCO para cada canal de color y la señal de ruido que a partir de una ponderación adecuada implementada con resistencias, se obtiene una señal que modula el comportamiento de transistores de forma arbitraria, señal que fue denominado como generativa (Fig 10).

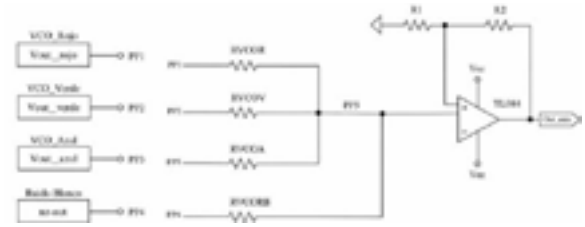


Fig. 10. Configuración mezclador (Fuente: Propia)

Para validar el sistema GAN desarrollado fue utilizado como señales de entrada los voltajes de salida medidos del clasificador de patrones RGB, voltajes que oscilan entre 1.68V y 3.61V según el canal y el color aplicado. Por otro lado, los datos usados para validación del entrenamiento de la RNA fueron 60 de donde se extrajo aleatoriamente 12 combinaciones de colores (es decir, 20% de los datos de prueba) para el proceso de validación, metodología que permitió evaluar la respuesta del sistema GAN a partir de colores no contemplados en el conjunto de entrenamiento original del clasificador de patrones RGB.

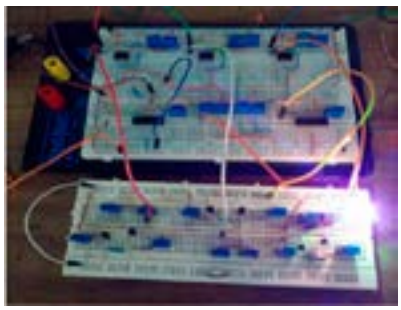


Fig. 11. Sistema generativo antagónico (GAN) implementado

IV. Resultados

A. Clasificador neuronal análogo RGB

La validación del clasificador de patrones RGB se realizó en tres etapas: i) cálculo teórico; ii) simulación usando LTspice; y iii) implementación discreta de los circuitos análogos. La tabla I presenta los errores presentados en el sumador ponderado entre los valores teóricos y simulados para 15 patrones de colores

aplicados en donde se obtuvo un error promedio global de 2.81%.

TABLA I. ERROR PORCENTUAL (TEÓRICO VS. SIMULADO) EN EL SUMADOR PONDERADO IMPLEMENTADO PARA CADA NEURONA

No. test	Vteo (V)	Vsim (V)	%E roja	%E verde	%E azul	%E Prom.
1	-0.241	-0.220	8.9	9.1	8.87	8.96
2	-1.868	-1.894	1.38	1.88	3.79	2.35
3	-0.332	-0.309	7.06	3.37	6.81	5.75
4	-2.239	-2.270	1.39	3.31	3.32	2.67
5	-1.622	-1.624	0.12	0.39	3.16	1.22
6	-2.273	-2.289	0.71	1.11	1.12	0.98
7	-1.579	-1.559	1.28	2.05	1.33	1.55
8	-2.424	-2.414	0.43	1.39	0.11	0.64
9	-2.644	-2.669	0.95	9.22	0.84	3.67
10	-1.215	-1.184	2.57	1.49	3.91	2.66
11	-1.325	-1.304	1.58	0.65	1.91	1.38
12	-2.039	-2.024	0.71	10.36	1.35	4.14
13	-2.640	-2.618	0.84	5.04	3.06	2.98
14	-1.359	-1.329	2.20	2.99	0.75	1.98
15	-2.051	-2.039	0.59	2.23	0.75	1.19
Prom.	—	—	**2.05**	**3,64**	**2.74**	**2.81**

Las funciones sigmoidales obtenidas mediante barrido DC en simulación confirmaron la transición suave y acotada esperada para cada una de las tres neuronas. De forma particular en la figura 12 se muestra la respuesta de la neurona roja como caso representativo. Las neuronas verde y azul siguen el mismo comportamiento con variaciones en el rango de saturación determinadas por la ganancia de cada etapa de salida. De igual forma en la figura 13 se muestra las salidas del clasificador de patrones RGB ante los 15 patrones de colores simulados y donde se puede ver que cada neurona responde con el mayor nivel de voltaje.

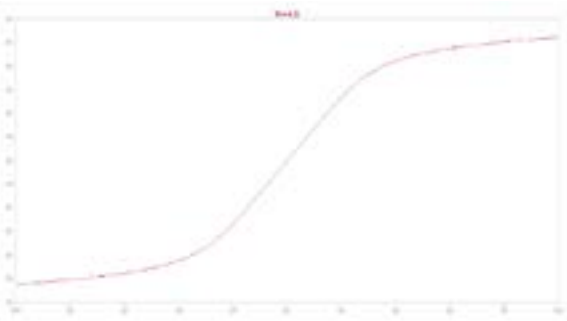


Fig. 12. Salida de activación tipo sigmoide para la neurona roja.



Fig. 13. Salida simulada del clasificador de patrones RGB

La Tabla II presenta los resultados del clasificador de patrones obtenidos de forma experimental. Para los tres colores primarios, la neurona correspondiente alcanzó el mayor voltaje de salida y superó su umbral de activación. Los dos casos de clasificación parcial (naranja y rosa) corresponden a mezclas aditivas de dos o más canales, comportamiento coherente con el modelo RGB y no atribuible a error del sistema.

TABLA II. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN EXPERIMENTAL

Color	Rojo (V)	Verde (V)	Azul (V)	Clasif. esperada	Clasif. obtenida	Resultado
Rojo oscuro	2.10	1.92	2.04	Rojo	Rojo	Correcto
Verde oscuro	1.90	2.64	2.53	Verde	Verde	Correcto
Azul oscuro	1.68	2.15	2.65	Azul	Azul	Correcto
Naranja	3.10	3.36	3.40	R+G	R+G+B	Parcial
Café oscuro	1.30	1.55	1.51	Ninguno	Ninguno	Correcto
Rosa claro	3.18	3.23	3.61	R+B	R+B+G	Parcial
Negro	0.94	1.08	1.17	Ninguno	Ninguno	Correcto
Blanco	2.66	3.17	3.52	R+G+B	R+G+B	Correcto

B. Sistema generativo antagónico (GAN)

La validación de los VCO se realizó midiendo la frecuencia de salida para distintos voltajes de control en cada canal, comparando los valores teóricos calculados con los obtenidos en simulación y los medidos experimentalmente con osciloscopio. La Tabla III presenta una selección de puntos representativos para el canal rojo y verde que permite analizar el comportamiento del sistema a lo largo del rango de operación.

TABLA III. FRECUENCIAS VCO TEÓRICAS, SIMULADAS Y PRÁCTICAS PUNTOS REPRESENTATIVOS POR CANAL (HZ)

	Fteo R	Fsim R	Fprac R	%E R	Fteo G	Fsim G	Fprac G	%E G	Observ.
0.2	2190	2141	810	63.0	—	—	—	—	Sesgo NE555
0.8	1702	1690	1060	37.6	1183	1176	1120	5.3	Inicio zona estable
1.4	1436	1429	1315	8.4	1030	1027	1120	8.7	
2.0	1201	1196	1200	0.1	899	898	850	5.4	
2.9	981	978	976	0.5	735	734	1098	49.4	Var. componentes

La concordancia teórico–simulada fue superior al 99% en los tres canales, lo que confirma la validez del modelo matemático alcanzado para los VCOs. Sin embargo, en la implementación física los errores superaron el 60% para el canal rojo y el 70% para el azul cuando el voltaje de control fue inferior a 0.6V. Este comportamiento se atribuye al circuito integrado NE555. A pesar de las discrepancias presentadas, la operación del sistema se conservó en todos los canales: a menor voltaje de control, mayor frecuencia de salida, lo que garantiza la coherencia de la representación cromática del sistema.

Para evaluar el efecto del generador de ruido sobre la dinámica del sistema, se midieron los parámetros principales de cada señal por canal. La Tabla IV presenta los resultados obtenidos para los tres canales.

TABLA IV. PARÁMETROS DE LOS CANALES RGB CON Y SIN GENERADOR DE RUIDO ACTIVO (VCONTROL = 4 V)

Canal	MAX − (V)	AMP − (V)	AVG − (V)	FREQ − (Hz)	MAX + (V)	AMP + (V)	AVG + (V)	FREQ + (Hz)	Δ FREQ (%)
Rojo	2.72	2.28	1.69	544	2.48	1.57	1.75	599	+10.1
Verde	5.76	4.80	2.32	478	6.64	3.41	2.09	649	+35.7
Azul	6.56	5.09	2.74	558	6.40	3.52	2.19	894	+60.2

La señal de ruido aplicada produjo en los tres canales una compresión de la amplitud y un incremento de la frecuencia aparente. El canal rojo fue el menos afectado, con una reducción de amplitud de 2.28V a 1.57V y un incremento de frecuencia del 10.1%. Los canales verde y azul mostraron mayor sensibilidad: el verde redujo su amplitud de 4.8V a 3.41V con un incremento del 35.7% en frecuencia, mientras que el azul presentó el mayor cambio relativo de frecuencia (+60.2%), aunque con una reducción de amplitud moderada. En ninguno de los tres casos el ruido anuló la información cromática del canal.

Finalmente, la validación del módulo de activación se realizó en dos etapas. En la primera, se emplearon los 15 patrones de colores utilizados durante la calibración del sistema. Para cada intervalo se determinó el estado teórico esperado de cada LED y se comparó con el estado obtenido en simulación. La Tabla V presenta los resultados intervalo por intervalo para los tres canales. El canal azul presentó la mayor coincidencia con 94.1% (16 de 17 intervalos correctos), seguido por el verde con 88.2% (15 de 17) y el rojo con 70.6% (12 de 17).

TABLA V. VALIDACIÓN TEÓRICO–SIMULADO DEL MÓDULO DE ACTIVACIÓN CONJUNTO DE CALIBRACIÓN

Color	Intervalo (ms)	Rojo			Verde			Azul		
		Teo	Sim	Val	Teo	Sim	Val	Teo	Sim	Val
	Máximo	E	E	C	E	E	C	E	E	C
	0–5	A	A	C	A	A	C	A	A	C
	5–10	E	E	C	A	A	C	A	A	C
	10–15	A	A	C	A	A	C	A	A	C
	15–20	E	E	C	E	E	C	A	A	C
	20–25	E	A	D	E	E	C	A	A	C
	25–30	E	E	C	A	A	C	E	E	C
	30–35	A	A	C	A	A	C	E	E	C
	35–40	E	A	D	E	E	C	P.A	A	D
	40–45	E	E	C	E	E	C	A	A	C
	45–50	A	A	C	E	A	D	A	A	C
	50–55	P.A	A	D	E	A	D	A	A	C
	55–60	E	A	D	A	A	C	A	A	C
	60–65	E	E	C	A	A	C	E	E	C
	65–70	A	A	C	E	E	C	A	A	C
	70–75	E	A	D	E	E	C	A	A	C
	Mínimo	A	A	C	A	A	C	A	A	C
Coincidencias		**12**			**15**			**16**		
Diferencias		**5**			**2**			**1**		
Acierto (%)		**70.6%**			**88.2%**			**94.1%**		

E = Encendido, A = Apagado, P.A = Parcialmente apagado, C = Coincide, D = Difiere

En la segunda etapa de validación se evaluó la respuesta del sistema ante 12 combinaciones de color definidas manualmente, sin relación con los patrones de calibración originales. Para cada combinación se calculó el voltaje de control correspondiente mediante desnormalización del valor RGB objetivo, voltaje aplicado a los VCO y se verificó la coincidencia del estado de activación de cada LED. Esta metodología permitió evaluar la capacidad del sistema para generalizar su respuesta ante condiciones no programadas (Tabla VI). El canal azul mantuvo un 91.7% de coincidencia (11 de 12) confirmando la estabilidad observada anterior. Los canales rojo y verde presentaron caídas más pronunciadas con 66.7% (8 de 12) y 58.3% (7 de 12) respectivamente.

TABLA VI. VALIDACIÓN TEÓRICO–SIMULADO DEL MÓDULO DE ACTIVACIÓN NUEVAS COMBINACIONES DE COLOR

	Rojo			Verde			Azul		
Color	**Teo**	**Sim**	**Val**	**Teo**	**Sim**	**Val**	**Teo**	**Sim**	**Val**
	E	E	C	E	E	C	A	A	C
	A	A	C	E	E	C	E	A	D
	E	E	C	A	A	C	E	E	C
	E	E	C	E	A	D	A	A	C
	E	A	D	A	A	C	A	A	C
	E	E	C	E	E	C	E	E	C
	E	A	D	A	A	C	A	A	C
	E	A	D	E	A	D	A	A	C
	E	E	C	E	E	C	E	E	C
	E	E	C	E	A	D	A	A	C
	E	A	D	E	A	D	A	A	C
	E	E	C	E	A	D	A	A	C
Coincidencias	**8**			**7**			**11**		
Diferencias	**4**			**5**			**1**		
Acierto (%)	**66.7%**			**58.3%**			**91.7%**		

En la implementación física, los LED encendieron en los tonos y tiempos correctos en todos los casos evaluados, lo que sugiere que la no linealidad real de los dispositivos y el efecto del ruido compensan parcialmente las limitaciones del modelo simulado, preservando la coherencia cromática de la salida.



Fig. 14. Resultado del sistema para el color amarillo (RGB 255, 255, 0). Los canales rojo y verde se activan correctamente; el azul permanece apagado. Caso representativo de activación exitosa con color inducido.



Fig. 15. Resultado del sistema en el intervalo 25 - 30ms del conjunto de datos. La combinación de canales rojo y azul activo produce un color morado en el LED, coherente con los voltajes de control aplicados.

V. Conclusiones

El sistema generativo antagónico (GAN) desarrollado alcanzó los objetivos propuestos y permitió entender el concepto de inteligencia artificial generativa que hoy en día está en auge al implementar los dos pilares computacionales centrales de la inteligencia artificial moderna: redes neuronales artificiales y sistemas generativos antagónicos sin recurrir a programación. La inferencia, la activación no lineal, la variabilidad generativa y la toma de decisiones por canal ocurren íntegramente en los sistemas análogos implementados permitiendo una reinterpretación de sus principios en donde la información existe de forma natural. Es decir, en la señal análoga.

En cuanto al clasificador análogo de patrones RGB discriminó correctamente los tres colores primarios en implementación física presentando un sesgo sistemático identificado en la ganancia de salida entre 4.7% y 8.8% según la neurona y que no comprometió la proporcionalidad de las señales análogas entre canales.

En cuanto al sistema generativo antagónico (GAN) desarrollado a partir del principio básico de operatividad de señales demostró que los principios teóricos pueden ser implementados de forma sencilla con circuitos electrónicos análogos discretos convirtiéndose en una fuente de soluciones sencillas a problemas cotidianos, principio que busca las metodologías de diseño digital aplicables a los ASICs o circuitos integrados de aplicación específica.

Como gran conclusión de este proyecto se puede afirmar que sí se puede emular el aprendizaje profundo, las estructuras Transformers y las arquitecturas GAN que en la actualidad usan las diversas aplicaciones de IAs que todo mundo usa cotidianamente. Es decir, se pudo implementar un chat GPT análogo aplicable a colores RGB, proyecto que establece un marco experimental replicable y de bajo costo con proyección hacia paletas de color más ampliadas, arquitecturas de neuronas más extensas, que pueden implementar MEMristancias como elemento precursor, hoy en día, de la computación neuromórfica.

VI. Referencias

[1] X. Liang et al., “Rotating neurons for all-analog implementation of cyclic reservoir computing,” *Nature Communications*, vol. 13, 2022.

[2] P. Saha, “The Promise of Analog Deep Learning: Recent Advances, Challenges and Opportunities,” *arXiv preprint* arXiv:2406.12911, 2024. [En línea]. Disponible: https://arxiv.org/html/2406.12911v1

[3] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2018.

[4] O. Krestinskaya, B. Choubey and A. P. James, “Memristive GAN in Analog,” *Scientific Reports*, vol. 10, 2020. [En línea]. Disponible: https://www.nature.com/articles/s41598-020-62676-7

[5] S. Haykin, *Neural Networks and Learning Machines*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2009.

[6] E. Caicedo and J. López, *Redes Neuronales Artificiales*. Cali, Colombia: Universidad del Valle, 2009.

[7] Y. Yamashita and Y. Nakamura, “A Neuron Circuit Model with Smooth Nonlinear Output Function,” in *Proc. Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA)*, 2007.

[8] G. Hans and J. Lawrence, “Analog Electronic Neural Network Circuits,” *IEEE Circuits and Devices Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 8–17, Jul. 1989

[9] N. C. Braga, “Generador de Ruido Blanco (ART228S),” INCB. [En línea]. Disponible: https://www.incb.com.mx/index.php/articulos/9-articulos-tecnicos-y-proyectos/1459-generador-de-ruido-blanco-art228s

[10] M. Brinson, “Modelling and simulation of Zener diode noise in the time domain,” vol. 36, 2023.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MACHINE TO OPTIMIZE THE PROCESSING AND PRODUCTION OF COMMERCIAL PEANUT

Jhon Alexander Cartagena Vélez
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
jhona.cartagenav@uqvirtual.edu.co

Marisol Gómez Cano
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
solgc@uniquindio.edu.co

***Abstract*— This paper presents the design and construction of an automated packaging and sealing machine for commercial peanut production, developed to optimize the production process of a food microenterprise. The proposed system integrates three main subsystems: an auger screw dosing mechanism, a weighing system based on a YZC-133 load cell, and a thermal sealing system using a nichrome resistance controlled through PWM. The control architecture was implemented using an ESP32-S3 microcontroller responsible for managing sensors, actuators, and a 2.8-inch touchscreen human-machine interface developed with LVGL. The mechanical structure was manufactured using 304 stainless steel and FDA-certified PLA materials to ensure food safety and hygienic operation. A waterfall-based methodology was employed, including system design, hardware integration, subsystem validation, and experimental testing under real operating conditions. Experimental results demonstrated a dosing accuracy of ±2 g, stable system operation, and consistent hermetic sealing for different peanut presentations. The proposed system provides an accessible and low-cost automation solution for small-scale food production environments, improving packaging consistency, reducing waste, and increasing production efficiency.**

Keywords*— *Industrial Automation, Solid Dosing, Food Packaging, Dosing, Microcontroller, Food Safety

I. INTRODUCTION

The automation of food packaging processes has gained increasing importance in small-scale production environments due to the need to improve productivity, product consistency, and operational efficiency. In microenterprises, packaging activities are commonly performed manually because of economic limitations, which can lead to product dosing errors, inconsistencies in sealing quality, increased material waste, and reduced production capacity. These limitations directly affect product presentation, food preservation, and competitiveness in local commercial markets.

Industrial commercial packaging machines offer high operational speed and precision; however, their implementation is often economically inaccessible for microenterprises due to high acquisition, maintenance, and operating costs. Furthermore, many industrial solutions are designed for large-scale production environments and do not efficiently adapt to low production volumes or the infrastructure limitations of small businesses. Consequently, there is a growing need for low-cost automation systems capable of improving production processes while maintaining operational simplicity and food safety standards.

Recent advances in embedded systems and low-cost electronic components have enabled the development of accessible automation solutions for small-scale industrial applications. Microcontrollers such as the ESP32-S3, combined with load cells and intuitive visual interfaces, provide flexible alternatives for the implementation of customized packaging systems with reduced development costs.

II. THEORETICAL FRAMEWORK

A. *Packaging process automation*

Automated packaging machines are systems designed to perform product filling and sealing processes in a controlled manner, allowing improved packaging uniformity and increased operational efficiency in food industry applications [1]. These systems integrate mechanical, electronic, and control mechanisms to reduce manual intervention and optimize production capacity [1], [2].

B. *Dosing system*

The dosing system constitutes a critical stage in packaging machines, as it is responsible for supplying a defined quantity of product while ensuring accuracy, repeatability, and efficiency throughout the process [12]. In applications involving granular products, auger screw mechanisms are widely used due to their mechanical simplicity and their ability to provide continuous and controlled material transport [3], [4].

C. *Weighing systems*

In the food industry, weighing systems based on electronic scales and load cells are used to accurately measure the quantity of supplied product [5]. Load cells convert the force exerted by weight into proportional electrical signals, allowing the implementation of automatic control and monitoring systems for the dosing process [6], [7].

D. *Thermal sealing in plastic packaging*

Thermal sealing is a process used to join thermoplastic materials through the controlled application of temperature and pressure. Materials such as polyethylene and polypropylene are widely used in food applications due to their sealing capability,

mechanical resistance, and compatibility with food preservation processes [8], [10]. Sealing temperatures for these materials typically range between 120 °C and 200 °C depending on the type of polymer used [8], [9], [10].

E. Microcontrollers and embedded systems

Data acquisition and control systems are widely used in industrial monitoring and automation applications, allowing the integration of sensors, actuators, and user interfaces within a single platform [11], [12]. Microcontrollers such as the ESP32-S3 provide processing capabilities, peripheral control, and digital communication features suitable for the development of low-cost automated systems oriented toward small-scale industrial applications [13].

III. METHODOLOGY

For the development of the automated peanut packaging and sealing machine, a waterfall methodology was employed, selected due to the sequential nature of the project and the need to perform progressive validations of each subsystem before final integration. This methodology allowed the design, construction, and implementation processes to be organized in a structured manner, facilitating development stage control and early error detection [14].

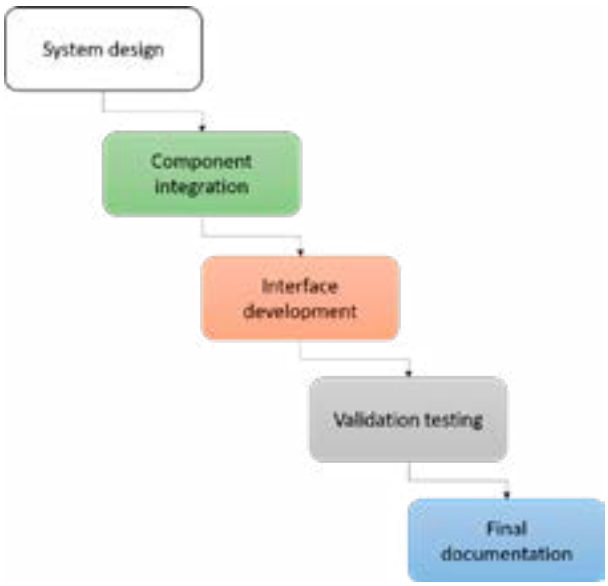


Fig. 1. Waterfall methodology.

The system development was divided into five main stages: requirements analysis, mechanical design, electronic and control design, subsystem integration, and experimental validation.

During the requirements analysis stage, the main operational needs of the microenterprise were identified, defining functional parameters related to dosing capacity, accuracy, food safety, and ease of operation. The main requirements established for system development are presented in Table I [14].

TABLE I. MAIN REQUIREMENTS

Requirement	Description
Dosing capacity	Automated packaging of commercial peanut presentations
Weight accuracy	Dosing error below 5 %
Food safety	Use of food-safe materials and hygienic structure
Ease of operation	Simple user interaction through touchscreen
Low implementation cost	Use of accessible electronic and mechanical components
Operational stability	Continuous operation without synchronization failures

Subsequently, the mechanical design of the structure and the dosing and sealing systems was carried out using CAD modeling tools. Food-grade materials were used for manufacturing, including 304 stainless steel and FDA-certified PLA printed components [14].



Fig. 2. 3D design of the dosing system.

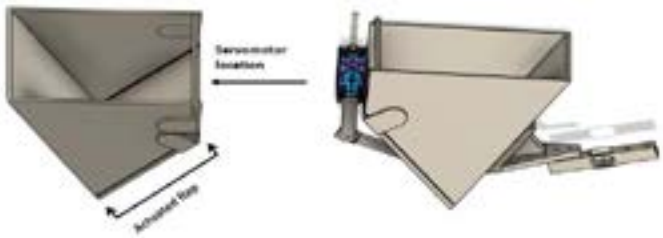


Fig. 3. 3D design of the weighing system.



Fig. 4. 3D design of the sealing system.

During the electronic and control design stage, the automation architecture based on an ESP32-S3 microcontroller was developed, integrating sensors, actuators, and a touchscreen human-machine interface. The control system was programmed to automatically coordinate the dosing, weighing, and thermal sealing operations.

Subsequently, the mechanical, electronic, and control subsystems were integrated, performing individual functional tests and joint operation tests to verify system stability and proper communication between devices. Fig. 5 presents a flowchart representing the sequence used to coordinate the system testing procedures.

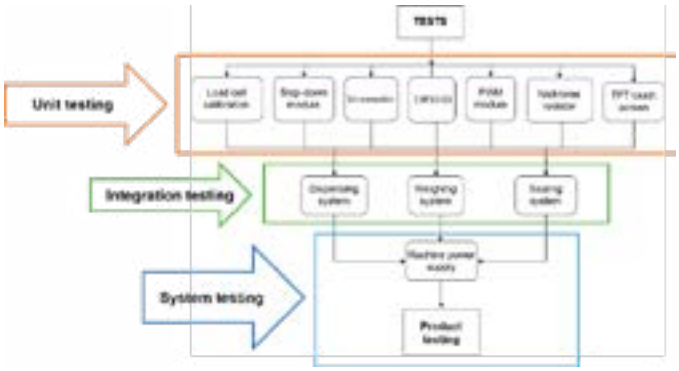


Fig. 5. Flowchart of the system testing procedure.

Finally, the experimental validation of the prototype was carried out under real operating conditions, evaluating parameters such as dosing accuracy, operational stability, and thermal sealing quality. The obtained results allowed verification of the system feasibility as a low-cost automation solution for a microenterprise. Additional implementation and calibration procedures are detailed in [14].

IV. Implementation

The developed system was designed to automate the dosing, weighing, and sealing stages of the commercial peanut packaging process in a food microenterprise. The machine integrates mechanical, electronic, and control subsystems that operate in a coordinated manner to ensure dosing accuracy, operational stability, and ease of use.

The general system architecture consists of an auger screw dosing mechanism, a load cell-based weighing system, a thermal sealing module, and a central control unit implemented using an ESP32-S3 microcontroller. Additionally, the system incorporates a touchscreen human-machine interface that allows the configuration of operational parameters and supervision of the overall machine status.

A. Mechanical subsystem

The mechanical structure of the machine was designed considering structural resistance, stability, and food safety criteria. For the parts in direct contact with the product, 304 stainless steel was used due to its corrosion resistance and compatibility with food industry applications. Additionally, some secondary components were manufactured using 3D printing with FDA-certified PLA.

The dosing system (Fig. 6) was implemented using an auger screw mechanism driven by a DC motor with a gearbox, allowing controlled transport of peanuts from the storage hopper to the weighing area. This mechanism was selected due to its mechanical simplicity, low cost, and capability to provide continuous and controlled dosing.



Fig. 6. Final assembly of the dosing system.

The weighing system (Fig. 7) was developed using a platform supported by a YZC-133 load cell responsible for measuring the weight of the dispensed product in real time. The obtained signal was conditioned using an HX711 module and processed by the ESP32-S3 microcontroller to continuously monitor the supplied quantity and automatically stop the dosing process once the user-defined weight was reached.



Fig. 7. Final assembly of the weighing system.

The sealing process was carried out using a thermal sealing system (Fig. 8) composed of a nichrome resistance coupled to a structure with linear bearings to properly guide the applied force. The mechanism was actuated by a servomotor connected to a mechanical system that converts rotational motion into linear motion, allowing the sealing jaw to be pressed and generating hermetic seals on the plastic packaging used for product commercialization [14].



Fig. 8. Final assembly of the sealing system.

B. *Electronic and control subsystem*

The electronic architecture (Fig. 9) of the system was developed using an ESP32-S3 microcontroller as the main processing and control unit. This device was selected due to its processing capability, peripheral availability, and compatibility with advanced graphical interfaces.

The acquisition and processing of signals from the load cell were carried out using an HX711 module, allowing continuous monitoring of the product weight during the dosing process and automatically stopping the system once the programmed value was reached.

The actuation of motors and heating elements was performed through power modules controlled by the ESP32-S3. For the thermal sealing system, PWM control was implemented over the nichrome resistance, improving thermal stability and sealing quality.



Fig. 9. Control panel.

The human-machine interface was developed on a 2.8-inch touchscreen using the LVGL graphical library (Fig. 10). Through this interface, the operator can configure the weight per package and the number of packages to be produced [14].



Fig. 10. Visual interface of the display menu.

After the operator enters the production parameters, the process can be started and the system operational variables can be monitored (Fig. 11).



Fig. 11. Visual interface of process monitoring on the display.

C. *Integration and system operation*

Subsequently, the mechanical, electronic, and control subsystems were integrated, performing individual functional tests and joint operation tests to verify system stability and proper communication between devices. The main validation results are presented in Table II.

TABLE II. SYSTEM VALIDATION RESULTS

Test Performed	Objective	Obtained Result
Automatic dosing	Verify continuous product supply	Continuous and stable dosing
Weight detection	Validate weighing system reading	Accurate and stable measurement
Automatic stop	Verify system stop at programmed weight	Correct operation
Sealing activation	Validate automatic activation of the thermal system	Stable and synchronized activation
Thermal sealing	Evaluate sealing quality on plastic bags	Uniform hermetic sealing
Continuous operation	Evaluate stability during consecutive cycles	No operational failures recorded
Communication between subsystems	Verify electronic and mechanical synchronization	Correct communication

The general operation of the machine begins when the operator manually positions the packaging bag in the dosing area and enters the production parameters. The system is activated when indicated by the operator, and the auger screw mechanism automatically starts operating until the weight configured by the user has been dosed.

Once the dosing process is completed and the desired weight is reached, as regulated by the weighing system, the peanuts fall through a tube into the plastic bag.

The operator must then move the bag vertically through a guiding tube toward the sealing section, where the system automatically executes the thermal sealing process when the presence of peanuts inside the tubular plastic bag is detected. The bag is then sealed and cut through the automatic actuation of the sealing system, enabled by precise temperature control of the nichrome resistance wire.

The final integration achieved coordinated and stable operation, ensuring dosing accuracy and sealing uniformity during the experimental tests performed. Fig. 12 illustrates this operating logic in a sequential manner.

The integration of the subsystems enabled coordinated and stable operation, ensuring dosing accuracy and sealing uniformity during the operational tests performed. The final machine assembly with all integrated subsystems is shown in Fig. 13.

V. RESULTS

The developed prototype was experimentally validated under real operating conditions through dosing and thermal sealing tests using different commercial peanut presentations. The tests allowed the evaluation of system accuracy, operational stability, and the overall performance of the machine during consecutive operating cycles. The experimental results presented below were obtained from the validation procedures and operational tests detailed in [14].

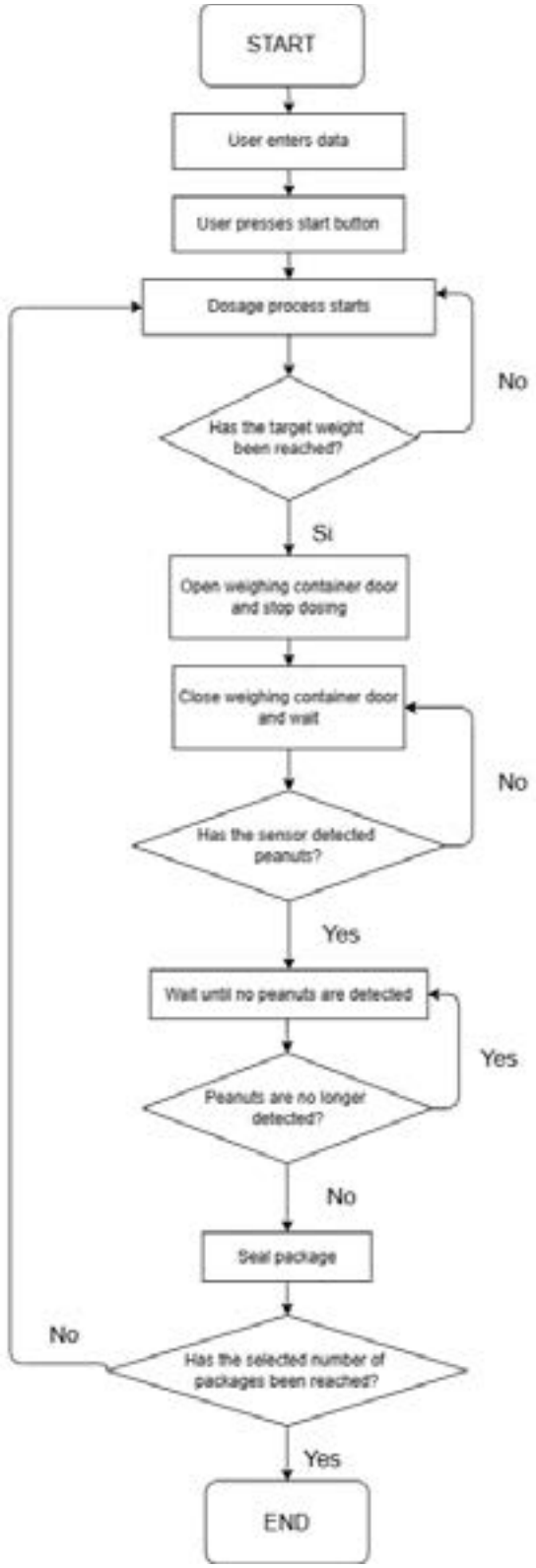


Fig. 12. Flowchart of the system logical operation.



Fig. 13. Final assembly of the machine.

TABLE III. EXPERIMENTAL RESULTS FOR SALTED PEANUTS

Target Weight (g)	Average Measured Weight (g)	Average Error (g)	Average Cycle Time (s)
60	60.93	±1.20	15.3
80	80.33	±1.73	21.7
100	99.43	±1.57	25.7

TABLE IV. EXPERIMENTAL RESULTS FOR SWEET PEANUTS

Target Weight (g)	Average Measured Weight (g)	Average Error (g)	Average Cycle Time (s)
60	60.87	±1.67	13.7
80	80.43	±1.50	18.7
100	100.17	±1.47	23.0

TABLE V. EXPERIMENTAL RESULTS FOR MIXED PEANUTS

Target Weight (g)	Average Measured Weight (g)	Average Error (g)	Average Cycle Time (s)
60	61.50	±1.70	15.3
80	81.10	±1.77	20.7
100	100.00	±1.90	25.7

The developed prototype was experimentally validated under real operating conditions through dosing and thermal sealing tests using different commercial peanut presentations. According to IEEE paper recommendations, the experimental results are presented through compact tables and subsequently interpreted in a technical and concise manner.

Tables III, IV, and V present the results obtained for salted, sweet, and mixed peanuts, respectively, considering target weights of 60 g, 80 g, and 100 g. In all cases, the average obtained weight, the average dosing error, and the average cycle time were evaluated.

TABLE VI. OVERALL AVERAGE SYSTEM RESULTS

Target Weight (g)	Average Measured Weight (g)	Overall Average Error (g)	Overall Average Cycle Time (s)
60	61.10	±1.52	14.8
80	80.62	±1.67	20.4
100	99.87	±1.65	24.8

The developed prototype was experimentally validated under real operating conditions through dosing and thermal sealing tests using different commercial peanut presentations. According to IEEE paper recommendations, the experimental results are presented through compact tables and subsequently interpreted in a technical and concise manner.

Tables III, IV, and V present the results obtained for salted, sweet, and mixed peanuts, respectively, considering target weights of 60 g, 80 g, and 100 g. In all cases, the average obtained weight, the average dosing error, and the average cycle time were evaluated.

TABLE VII. SYSTEM VALIDATION RESULTS

Parameter	Result
Maximum recorded error	±1.90 g
Successful cycles	100 %
Hermetic sealing	Achieved
Overheating	Not detected
Automatic control operation	Functional

Table VI summarizes the overall average behavior of the system considering the three evaluated product types, while Table VII presents the main operational validation results of the prototype. The obtained results demonstrate operational stability, continuous operation, and consistent dosing accuracy during consecutive operating cycles. Additional experimental analyses and subsystem validation details are presented in [14].

Regarding the thermal sealing system, the experimental tests achieved uniform and hermetic seals on polypropylene packaging without material deformation, synchronization losses, or overheating during continuous operation.

The obtained results validate the feasibility of the proposed system as an accessible and low-cost automation solution for food microenterprises, improving packaging process uniformity and reducing errors associated with conventional manual operations.

VI. CONCLUSIONS

La The developed machine successfully integrated the dosing, weighing, and thermal sealing subsystems, achieving stable and coordinated operation during the experimental tests performed.

The auger screw-based dosing system, together with the weighing system implemented using the YZC-133 load cell and the HX711 module, achieved average errors below ±2 g across the different evaluated configurations, ensuring uniformity in the quantity of packaged product.

The implementation of the ESP32-S3 microcontroller enabled the consolidation of a compact and flexible architecture for data acquisition, actuator control, and human-machine interface management, while also providing expansion capabilities for future monitoring and automation functions.

The nichrome resistance-based thermal sealing system exhibited stable and efficient performance on polypropylene packaging, obtaining uniform hermetic seals without requiring additional adhesive materials.

The modular machine design facilitates maintenance, cleaning, and component replacement processes, promoting the operational sustainability of the system in food production environments.

The obtained results validate the technical feasibility of the proposed system as an accessible and low-cost automation alternative for agro-industrial microenterprises, contributing to the technological strengthening of small-scale food packaging processes.

REFERENCES

[1] «Hablemos de la maquinaria de empaque: tipos, características y cómo identificar las mejores». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://blog.rhino.mx/maquinaria-empaque-tipos-caracteristicas?

[2] «Guía completa para el uso de máquinas empacadoras: tipos, características y beneficios – Soluciones expertas en maquinaria de embalaje – Innovación líder en tecnología de embalaje». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://pacmastery.com/es/comprehensive-guide-to-using-packing-machines-types-features-and-benefits/?#Manual_Packing_Machines

[3] «Dosificador de tornillo sin fin | Precisión continua». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://tecnoembalaje.com/producto/dosificador-tornillo-sin-fin/

[4] «Dosificador volumétrico de tornillo sin fin – POLPAK». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.polpak.pl/es/maquinas-de-envasado/dosificador-volumetrico-de-tornillo-sin-fin/

[5] «Sistemas de pesaje en la industria alimentaria: asegurando la precisión en cada lote». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.puchadesgimeno.com/noticias/sistemas-pesaje-en-industria-alimentaria/?

[6] «Celdas de carga». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://mx.omega.com/prodinfo/celdas-de-carga.html?

[7] «Principales tipos de células de carga - LAUMAS». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.laumas.com/es/blog/productos/principales-tipos-de-celulas-de-carga/

[8] «What is the temperature of the sealing machine for 5 different packaging materials? - Knowledge». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.sedmachinery.com/info/what-is-the-temperature-of-the-sealing-machine-78097159.html

[9] «Outline the heat sealability of plastics and the properties of heat sealing resins - Knowledge - Odin Mould Co.,Ltd». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.plasticomould.com/info/outline-the-heat-sealability-of-plastics-and-t-38468999.html

[10] R. Rdiplastics, «Healthy packaging for food: polypropylene», Rdiplastics. Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.rdiplastics.com/en/plastic-containers/healthy-packaging-food-polypropylene/

[11] J.-L. Aufranc (CNXSoft), «Know the Differences between Raspberry Pi, Arduino, and ESP8266/ESP32 - CNX Software», CNX Software - Embedded Systems News. Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.cnx-software.com/2020/03/24/know-the-differences-between-raspberry-pi-arduino-and-esp8266-esp32/

[12] «PLC, Arduino, and Raspberry Pi: What's Right for Your Application? - PLCnext Community». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.plcnext-community.net/news/plc-arduino-and-raspberry-pi-whats-right-for-your-application/

[13] «Document Html | Espressif Documentation». Accedido: 23 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://documentation.espressif.com/esp32-s3_datasheet_en.pdf

[14] J. A. Cartagena Vélez, "Design and construction of a machine to optimize the processing and production of commercial peanuts," Undergraduate Thesis, Electronic Engineering Program, Faculty of Engineering, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia, 2025.

A comparison of satellite sources of solar radiation: Copernicus vs NASA POWER.

Manuela I. Daza-Erazo
ELECTRAE research group
Universidad del Quindío
Armenia, Quindío
manuelai.dazae@uqvirtual.edu.co

Johan Rodriguez
ELECTRAE research group
Universidad del Quindío
Armenia, Quindío
johan.rodriguezr@uqvirtual.edu.co

Santiago Alzate-Moncaleano
ELECTRAE research group
Universidad del Quindío
Armenia, Quindío
santiago.alzatem@uqvirtual.edu.co

Catalina Aguirre-Grisales
ELECTRAE research group
Universidad del Quindío
Armenia, Quindío
caaguirre@uniquindio.edu.co

Cesar A. Alvarez-Gaspar
ELECTRAE research group
Universidad del Quindío
Armenia, Quindío
caalvarez@uniquindio.edu.co

Marisol Gomez-Cano
ELECTRAE research group
Universidad del Quindío
Armenia, Quindío
solgc@uniquindio.edu.co

***Abstract*— Surface downward solar radiation (SSRD) is a critical variable in energy and climate modeling, and its reliability depends on the quality of the satellite data sources employed. This study compares two global reference datasets — Copernicus ERA5-Land and NASA POWER — in their estimation of SSRD over a tropical region of complex topography (4°–5° N, 76°–75° W) during a two-year period (2024–2025). To ensure a valid comparison, controlled conditions were established: homogeneous units (kWh/m²/day), a spatial window common to both sources, and local time alignment (UTC−5). Copernicus data were downloaded in NetCDF4 format and converted to CSV using Panoply, incorporating an automated outlier-removal step. Results show that Copernicus ERA5-Land systematically overestimates NASA POWER, with a global mean bias error (MBE) of +0.207 kWh/m²/day, a mean absolute error (MAE) of 0.585 kWh/m²/day, a root mean square error (RMSE) of 0.729 kWh/m²/day, a global relative error of 13.65 %, and a Pearson correlation coefficient of r = 0.753. Divergence is highest during wet seasons (March–May and September–November), reaching a peak of 25.48 % in March 2024. These results establish a quantitative basis for selecting and correcting satellite SSRD sources in tropical regions with bimodal rainfall regimes.**

Keywords*— *SSRD, Copernicus ERA5-Land, NASA POWER, solar radiation & satellite data comparison.

I. Introduction

Climate variability poses one of the greatest challenges to Colombia's sustainable development. Due to its geographic location and climatic diversity, the country ranks among the most vulnerable to climate change worldwide [1], with projections indicating that by 2030, 2% of the population and 2.2% of the Gross Domestic Product (GDP) will be affected by its consequences [2]. In this context, IDEAM has documented significant changes in precipitation patterns and extreme temperatures, which are manifested in the intensification of phenomena such as heat waves, droughts, and torrential rains [3]. Rural areas are particularly vulnerable, and the lack of reliable historical data makes it difficult to identify climate patterns that would allow for the anticipation of such phenomena [3].

Among the most relevant climate variables for the energy, agricultural, and water sectors is Surface-Downward Solar Radiation (SSRD), defined as the flux of short-wave solar radiation incident on the Earth's surface. Monitoring this variable is essential for sizing photovoltaic systems, estimating evapotranspiration, and regional climate modeling [4]. Given the limited coverage of ground-based weather stations in the department of Quindío, global satellite data sources offer a viable alternative for obtaining continuous historical time series of this variable.

Among the main available sources are ERA5-Land, from the European Space Agency's (ESA) Copernicus program, and NASA's POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) product. Both provide SSRD estimates with global coverage, daily resolution, and open access [5][6]; however, their agreement over tropical regions with high topographic heterogeneity—such as Quindío, where elevation ranges from 900 to 4,500 m above sea level—has not been systematically evaluated. This uncertainty limits the reliability of energy and climate analyses that rely on these sources.

El presente artículo tiene como objetivo comparar las estimaciones de SSRD proporcionadas por Copernicus ERA5-Land y NASA POWER sobre la región del Quindío (4°–5° N, 76°–75° O) durante el período 2024–2025, con el fin de cuantificar el grado de divergencia entre ambas fuentes y establecer un comportamiento de la radiación solar en la región.

II. METODOLOGY

A. Data sources

The first data source is the ERA5-Land dataset from the Copernicus Climate Data Store (CDS), managed by the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Specifically, the product "ERA5-Land hourly data from 1950 to present" [5] was selected, which provides the SSRD variable expressed in J/m² as a daily cumulative value. The relevant characteristics of the dataset are as follows: native spatial resolution of 0.1° × 0.1° (equivalent to approximately 122 km² per cell), daily temporal resolution, and global coverage of land areas with a 5-day delay relative to real time.

— NASA POWER —

The second data source is NASA's POWER product, developed by the Langley Research Center [6]. The All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance variable (equivalent to SSRD), expressed in W/m²·day as a daily cumulative value, was selected. This data source had limitations in terms of spatial resolution, as queries are performed on cells of at least 1° x 1° (approximately 12,200 km² per cell), with daily temporal resolution and global coverage over land areas. Additionally, the data has an update latency of approximately 5–7 days relative to real time.

B. Study area and analysis period

The study area encompasses the department of Quindío and adjacent areas of Risaralda and Tolima, bounded by the latitudinal coordinates [4°, 5°] and longitudinal coordinates [−76°, −75°], covering a region of approximately 12,200 km². This geographic area was selected so that it would be common to both data sources, a necessary condition for ensuring the spatial comparability of the data [5][6]. Fig. 1 shows a map of the study area.



Fig. 1. Study area for both sources. Fuente [6].

The analysis period spans from January 1, 2024, to December 31, 2025, corresponding to a two-year time horizon with daily resolution, resulting in 731 time series records for each source. It should be noted that the department of Quindío has a bimodal rainfall pattern, with wet periods in March–May and September–November, and dry periods in December–February and June–August—a factor relevant to the interpretation of seasonal differences in SSRD.

C. Data preprocessing

— Copernicus ERA5-Land —

The ERA5-Land data were downloaded in NetCDF4 format and converted to CSV using the Panoply tool [7], which also allowed for visual verification of the geographic region under consideration and the values of the extracted parameters. Since ERA5-Land reports SSRD as a cumulative total starting at 00:00 UTC, it was necessary to apply the following transformation to obtain hourly irradiance in comparable units:

$$Daily\ Radiation\ [kWh/m^2 \cdot day] = \sum_0^{24}[\frac{SSRD\_hour[n] - SSRD\_hour[n-1]}{3600\ s}] \quad (1)$$

In addition, a time adjustment was made from UTC to Colombian local time (UTC−5), ensuring that the records were temporally aligned with the data from the second source. An automatic cleaning step was implemented to remove outliers introduced during the conversion process using Panoply..

— NASA POWER —

This source facilitates information processing, as it directly provides the required files, the local time, and the corresponding units of measurement. However, to ensure compatibility with the first source, it was necessary to convert the values from W/m²·day to kW/m²·day.

D. Comparison methodology

To ensure the validity of the comparison, three control conditions were established prior to the analysis: (i) Homogeneous units in kWh/m²/day for both sources, (ii) A common spatial window bounded by the coordinates [4°–5° N, 76°–75° W], and (iii) Temporal alignment in Colombian local time (UTC−5). With these conditions met, the statistical analysis was structured in two stages.

Globally, based on the 731 daily records from the 2024–2025 period, four metrics were calculated: Mean Bias Error (MBE), which quantifies Copernicus's systematic overestimation or underestimation relative to NASA POWER; Mean Absolute Error (MAE), which measures the average magnitude of the error without considering its sign; the root mean square error (RMSE), which penalizes errors of greater magnitude; and the daily relative percentage error, calculated as |Ci − Ni| / Ni × 100, where Ci and Ni are the daily values from Copernicus and NASA POWER, respectively.

At the seasonal level, the same metrics were calculated independently for each of the 24 months of the period, making it possible to identify the seasons in which the greatest divergence among sources is concentrated. Additionally, a scatter plot was constructed using the linear regression line and the 1:1 line, along with a Taylor diagram to simultaneously represent the correlation, standard deviation, and RMSD of Copernicus, using NASA POWER as the reference source [8].

III. RESULTS

A. Comparison of time series

Fig. 2 shows the evolution of the average monthly SSRD from both sources over the 2024–2025 period. Copernicus ERA5-Land consistently records higher values than NASA POWER for most of the period, with the exception of the wet-to-dry transition months (May–July), when the estimates are

occasionally reversed. Both sources capture the bimodal pattern characteristic of the Quindío climate regime: relatively high values during the dry periods (December–February and June–August) and decreases associated with the wet seasons (March–May and September–November); however, the magnitude of these declines differs between sources, with Copernicus being more sensitive to variations in cloud cover than NASA POWER.

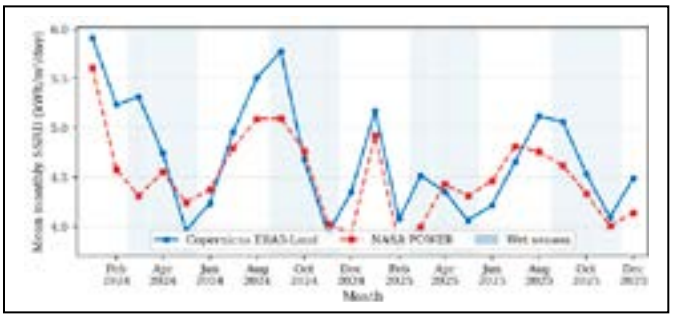


Fig. 2. Monthly mean SSRD from Copernicus ERA5-Land and NASA POWER over the Quindío region, 2024–2025. Shaded areas denote wet seasons (Mar–May, Sep–Nov).

B. *Overall statistical metrics*

Table I summarizes the performance metrics calculated over the entire period. The positive MBE (0.207 kWh/m²/day) indicates that Copernicus ERA5-Land systematically overestimates the SSRD relative to NASA POWER. The MAE of 0.585 kWh/m²/day and the RMSE of 0.729 kWh/m²/day reflect considerable dispersion in the daily errors, consistent with the high intrinsic variability of SSRD in a tropical region with complex topography. The overall relative error of 13.65% and the correlation coefficient of 0.753 indicate moderate agreement between the two sources, suggesting that, while they capture the general behavior of the variable, they differ significantly in their quantitative estimates.

TABLE I. OVERSALL STATISTICAL METRICS FOR THE COMPARISON BETWEEN COPERNICUS ERA5-LAND AND NASA POWER. PERIOD: 2024-2025. QUINDÍO REGION.

Metric	Value
MBE (kWh/m²/día)	0,207
MAE (kWh/m²/día)	0,585
RMSE (kWh/m²/día)	0,729
Overall relative error (%)	13,65
Correlation coefficient (r):	0,753
Standard deviation of NASA POWER (kWh/m²/day):	0,822
Standard deviation of Copernicus ERA5-Land (kWh/m²/day):	1,062

C. *Seasonal analysis of error*

Fig. 3 shows the monthly relative error over the period. The wet seasons (March–May and September–November) account for the highest errors, with an average of 15.15%, while the dry seasons (December–February and June–August) have an average of 12.18%. March 2024 recorded the highest error of the entire period (25.48%), which can be attributed to the higher incidence of convective cloud cover during the first rainy season of the year—a condition that both sources model using different strategies. In contrast, January 2024 had the lowest recorded error (8.54%), corresponding to the main dry season, when cloud cover is minimal and satellite estimates are more reliable. Analysis of the monthly MBE reveals a shift in trend between May and July: during the transition months to the dry season in the first half of the year, NASA POWER outperforms Copernicus, suggesting that the two sources differ in how they model the transition between climatic regimes.

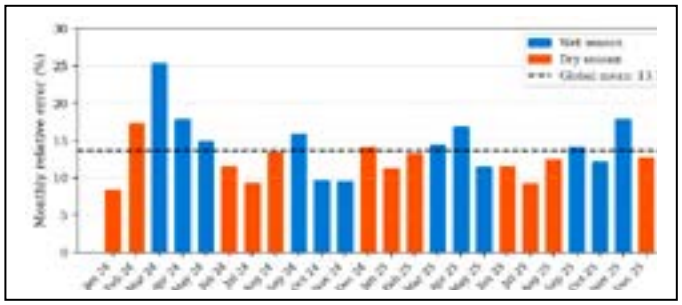


Fig. 3. Monthly relative error (%) between Copernicus ERA5-Land and NASA POWER, 2024–2025. Blue: wet seasons; orange: dry seasons. Dashed line: global mean (13.65 %).

D. *Scatter plot*

Fig. 4 shows the daily relationship between the values from both sources. The slope of the regression line (m > 1) confirms the overestimation bias of Copernicus, which becomes more pronounced for low SSRD values—typical of wet months—where the data points deviate further from the 1:1 line. The color coding by month shows that the records with the greatest dispersion correspond to the months of March–April and September (warm colors of the spectrum), while the dry months tend to cluster more closely around the diagonal.

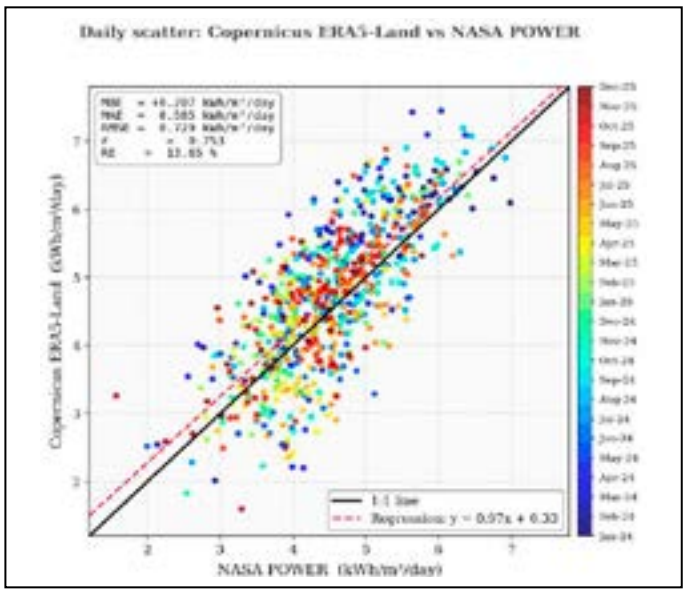


Fig. 4. Daily SSRD scatter plot: Copernicus ERA5-Land vs. NASA POWER (n = 731). Solid line: 1:1 reference; dashed line: linear regression. Color indicates month. r = 0.753.

E. Taylor diagram

The Taylor diagram in Fig. 5 summarizes the performance of Copernicus ERA5-Land using NASA POWER as a reference. The standard deviation of Copernicus (1.062 kWh/m²/day) exceeds that of the reference (0.822 kWh/m²/day), indicating that ERA5-Land exhibits inherently greater daily variability. The moderate correlation (r = 0.753) and the RMSD of 0.729 kWh/m²/day confirm that, despite reproducing the general pattern of the variable, ERA5-Land overestimates both the mean level and the amplitude of SSRD fluctuations in the studied region.

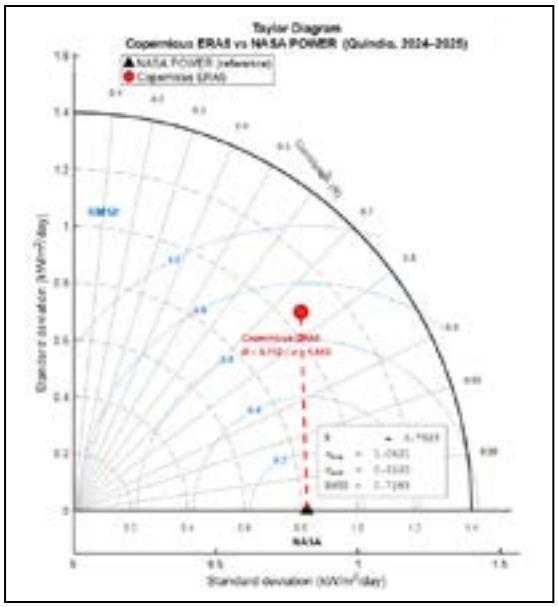


Fig. 5. Taylor diagram of Copernicus ERA5-Land ( ) against NASA POWER ( ) as reference. Daily SSRD, Quindío region, 2024 – 2025.

IV. Conclusions

This study compared estimates of Surface-Downward Solar Radiation (SSRD) provided by Copernicus ERA5-Land and NASA POWER for the department of Quindío during the 2024–2025 period, under controlled conditions regarding units, spatial resolution, and time zone.

The results indicate that Copernicus ERA5-Land systematically overestimates NASA POWER, with a global mean bias of +0.207 kWh/m²/day. This trend is consistent in 16 of the 24 months analyzed and is reversed only during the transition months between the wet and dry seasons in the first half of the year (May–July). The global relative error of 13.65% and the correlation coefficient of r = 0.753 indicate moderate agreement between the two sources, sufficient to reproduce the general seasonal pattern of the variable but insufficient for applications requiring quantitative precision at the local scale.

The seasonal analysis showed that the greatest divergence occurs during the wet seasons (March–May and September–November), with an average relative error of 15.15% and a maximum of 25.48% in March 2024. During the dry seasons (December–February and June–August), the average error drops to 12.18%, with a minimum of 8.54% in January 2024. This behavior is consistent with the differential impact of convective cloud cover on the estimation algorithms of each source: Under clear-sky conditions, the differences between models are smaller; under high cloud cover, the models diverge more pronouncedly.

The Taylor diagram summarizes these differences: Copernicus exhibits a standard deviation (1.062 kWh/m²/day) higher than that of the NASA POWER reference (0.822 kWh/m²/day), indicating that ERA5-Land amplifies the daily variability of SSRD in this region.

It should be noted that the native spatial resolution of ERA5-Land (~122 km² per cell) encompasses significant topographic heterogeneity in a department where elevation ranges from 900 to 4,500 m above sea level, without correction for slope shading or intra-cell microclimatic variability. This limitation applies similarly to NASA POWER. Furthermore, a major limitation regarding the spatial resolution of NASA POWER was identified, as the minimum analysis area is 1° x 1°, meaning that areas smaller than 12,200 km² cannot be analyzed using these two data sources.

As a future line of work, we propose incorporating in situ measurements using a pyranometer installed in the region as an independent empirical reference. This would allow us to determine which of the two satellite sources most accurately approximates the actual behavior of SSRD in Quindío and to quantify the correction bias required for each based on the climatic season.

References

[1] "Impacto del Cambio climático en Colombia," Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. [Online]. Available at: https://archivo.minambiente.gov.co

[2] ¿Cómo afectaría el cambio climático a Colombia en los próximos años?," Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. [Online]. Available at: https://www.minambiente.gov.co

[3] IDEAM, "Evidencias de Cambio Climático en Colombia con base en información estadística," Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá, Colombia. [Online]. Available at: http://www.ideam.gov.co

[4] M. Cardinali, "La importancia de los datos meteorológicos en la agricultura," Agricolus. [Online]. Available at: https://www.agricolus.com

[5] ECMWF, "ERA5-Land documentation — Surface solar radiation downwards," Copernicus Climate Change Service, 2019. [Online]. Available at: https://confluence.ecmwf.int/pages/viewpage.action?pageId=143058579

[6] NASA, Langley Research Center, "Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Project," POWER Hourly Data Products, Version 2.5.31. [Online]. Available at: https://power.larc.nasa.gov

[7] NASA GISS, "Panoply 5 netCDF, HDF and GRIB Data Viewer." [Online]. Available at: https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/

[8] K. E. Taylor, "Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram," *J. Geophys. Res.*, vol. 106, no. D7, pp. 7183–7192, 2001.

SmartGrid Telemetry System (SGTS)

Rafael Angarita Yepes,
Faculty of Engineering
University Institution of Barranquilla
Barranquilla, Colombia
renriqueangarita@unibarranquilla.edu.co

Natalia Amador Hernandez
Faculty of Engineering
University Institution of Barranquilla
Barranquilla, Colombia
npamador@unibarranquilla.edu.co

Luz E. Marquez
Faculty of Engineering
University Institution of Barranquilla
Barranquilla, Colombia
lmarquez@unibarranquilla.edu.co

Yamith Escobar,
Faculty of Engineering
University Institution of Barranquilla
Barranquilla, Colombia,
yescobar@unibarranquilla.edu.co

***Abstract* — Gaps in access, quality, and reliability of energy service between urban and rural areas in Colombia limit educational development, especially in rural institutions where infrastructure hinders energy modernization and management. Smart microgrids, by integrating distributed generation, storage, and control, can improve this management; however, they require reliable telemetry to monitor energy variables. This work, as part of a larger microgrid project, develops an IoT system for acquiring and transmitting data from an educational institution in Malambo – Atlántico to a monitoring center at the University Institution of Barranquilla, Soledad campus. The central challenge is establishing wireless communication over approximately 10.5 km without direct line of sight. The methodology employs applied research, designing the IoT architecture, building and configuring telemetry nodes, conducting tests under real-world conditions, and integrating the information into a storage and visualization platform. LoRa is evaluated as a long-range, low-power option for private networks, and 4G LTE is considered as an alternative to maintain continuity despite propagation limitations. As preliminary results, data exchange using LoRa links at varying distances was validated, and the performance of several node types was compared. A backup route using 4G LTE via a LilyGo T-SIM device was also implemented, confirming connectivity and basic transmission. The project aims to develop a functional and replicable communications architecture for microgrid telemetry, along with comparative evidence on the viability of LoRa versus 4G LTE in non-line-of-sight scenarios. The project provides guidelines for future academic developments in rural contexts and for strengthening energy management in educational institutions.**

Keywords— Microgrids smart devices, IoT, telemetry, LoRa, 4G LTE.

I. INTRODUCTION

Reducing the gaps in access to, quality of, and reliability of energy service is a priority challenge for social, educational, and technological development in Colombia. Although the country has made significant progress in national electricity coverage, substantial differences persist between urban and rural areas, where access and service quality remain limited [1]. This situation directly impacts rural educational institutions, which depend on conventional electrical infrastructure with capacity and reliability constraints, hindering the modernization of their energy systems and the adoption of technological solutions [2]. In response to this scenario, initiatives aimed at expanding electrical infrastructure in rural regions have been promoted; however, the high costs and technical challenges associated with extending conventional networks in hard-to-reach areas highlight the need for more flexible and cost-effective alternatives [3]. In this context, smart microgrids emerge as a promising solution by integrating distributed generation, storage, and control systems that enable more efficient operation of the energy system. However, its performance depends on the availability of monitoring and data management systems that allow continuous monitoring of electrical variables and support decision-making [4], [5].

Despite their potential, the implementation of telemetry systems in microgrids located in rural environments is limited by the scarce telecommunications infrastructure, which hinders the reliable transmission of data from remote locations. Within the framework of a macro-project aimed at developing a prototype of a smart electrical microgrid, the need arises to design a data acquisition and transmission system that allows the energy information generated at the Nuestra Señora de la Candelaria Educational Institution, located in the municipality of Malambo (Atlántico), to be transmitted to a monitoring center located at the University Institution of Barranquilla, Soledad campus, separated by approximately 10.5 km and without a direct line of sight.

Given this challenge, it is pertinent to evaluate long-range wireless communication technologies that allow for reliable links with low energy consumption and reduced operating costs. In this regard, LoRa technology is considered a suitable alternative for IoT applications and telemetry systems; however, its performance can be affected by environmental conditions. Therefore, this study proposes to evaluate the feasibility of a LoRa -based communication system, complementarily considering the use of 4G LTE cellular networks as an alternative to guarantee reliable data transmission. In this way, the aim is to provide cost-effective technological solutions that strengthen energy management in rural educational institutions and contribute to reducing energy gaps, in accordance with national energy planning policies and the Sustainable Development Goals, particularly SDG 7 [2], [6].

II. Conceptual Foundations

A. Electrical microgrid

Microgrids are small-scale energy systems capable of operating in coordination with the conventional electrical grid or autonomously, supplying power to localized areas such as educational institutions, university campuses, hospitals, or rural communities. According to the U.S. Department of Energy, a microgrid consists of interconnected loads and distributed energy resources within clearly defined electrical boundaries, acting as a controllable entity in relation to the main grid, allowing for island-like operation in the event of external failures or outages [7]. Structurally, microgrids integrate distributed energy resources (DERs) that include renewable sources such as photovoltaic and wind power systems, as well as conventional backup sources. An essential component of these architectures is the energy storage system, which manages the intermittency of renewable sources, stores surplus generation, and ensures supply when demand exceeds production, increasing operational flexibility and system reliability [8].

The efficient operation of a microgrid also depends on a local distribution infrastructure and control systems that balance supply and demand, integrate multiple generation sources, manage storage, and maintain power quality. These systems also facilitate the safe disconnection and reconnection of the microgrid through the common coupling point (CCP), ensuring stable operation in both connected and isolated modes [7].

Microgrids have gained importance due to their contribution to energy resilience, operational efficiency, and environmental sustainability by reducing losses associated with long-distance energy transmission and facilitating demand management. Furthermore, their ability to integrate renewable energy sources contributes to emissions reduction and the achievement of energy transition goals [7], [8].

The evolution toward smart microgrids incorporates digital monitoring, communication, and control technologies that enable real-time supervision of energy flows and a faster response to variations in demand or system disturbances. In this context, the integration of sensors and automation systems strengthens the reliability and adaptability of the microgrid, especially in rural environments where continuity of electrical service is critical [9].

B. IoT (Internet of Things) and Telemetry

The Internet of Things (IoT) is defined as a network of physical devices integrated with sensors, software, and communication capabilities, enabling the automatic collection, transmission, and processing of data over communication networks. These devices, also known as smart objects, form distributed infrastructures capable of interacting with each other and with processing systems for the real-time monitoring and control of physical processes [10]. In the context of energy systems, IoT plays a fundamental role by enabling the continuous and distributed monitoring of critical variables such as voltage, current, power, energy consumption, and equipment status. The integration of IoT devices facilitates process automation, early fault detection, and the analysis of large volumes of data, contributing to improved operational efficiency, system reliability, and real-time data-driven decision-making, especially in smart grids and microgrids [10], [11]

IoT architecture relies on key technological components such as sensors and actuators, connectivity technologies, processing and storage infrastructure, and security mechanisms, which enable the capture of information from the physical environment, its transmission to central systems, and its efficient analysis. These architectures are essential in distributed energy scenarios, where dynamic energy management requires timely and reliable information [10].

Telemetry, for its part, is defined as the process by which data is acquired and transmitted from remote locations to central processing systems for monitoring, analysis, and optimization purposes. In energy systems, telemetry allows for the monitoring of fundamental electrical variables, making it a key element for the efficient management and operation of smart microgrids [12].

Within the IoT framework, telemetry plays a central role by enabling the automated and continuous collection of data from distributed devices equipped with sensors and communication capabilities. This data is sent to storage and analysis systems for visualization and to support decision-making. According to IBM, telemetry in IoT environments forms the basis for monitoring and optimizing resources by providing real-time information on the status and performance of physical and digital systems [13].

IoT telemetry system generally integrates measuring devices, communication channels, storage platforms, and data analysis and visualization tools, enabling not only real-time monitoring but also early fault detection and analysis of energy consumption trends. These capabilities are especially relevant in microgrids, where distributed operation and the integration of renewable energy sources require reliable and timely information to ensure system stability and efficiency [12].

However, the implementation of IoT- based telemetry faces challenges related to device interoperability, information security, the management of large volumes of data, and communication limitations, particularly in rural environments or those with restricted infrastructure. Therefore, the design of telemetry systems must carefully consider the selection of communication technologies, data protection mechanisms, and processing architectures to ensure reliable and scalable operation [11], [13].

C. Communication Technologies

Wireless communication technologies are a fundamental component of IoT systems applied to smart microgrids, as they enable the transmission of telemetry data from distributed devices to monitoring and control centers. In rural environments and scenarios with limited telecommunications infrastructure, the selection of communication technology must consider criteria such as range, energy consumption, link reliability, and operating costs, due to the critical nature of the transmitted energy information.

LoRa (Long Range) is a long-range, low-power wireless communication technology designed for IoT applications that require transmitting small amounts of data over long distances. It operates in unlicensed frequency bands and uses chirp spread spectrum modulation, enabling links of several kilometers with high receiver sensitivity and low power consumption. The use of transceivers like Semtech 's SX1276 facilitates the deployment of distributed sensor networks and telemetry systems in rural environments where cellular or wired infrastructure is limited. However, [14]LoRa link performance can be affected by factors such as the lack of a direct line of sight, attenuation from obstacles, and limitations in data transmission rate, which can compromise reliability in scenarios with higher communication demands [14], [15].

On the other hand, 4G LTE (Long Term Evolution) is a cellular communication standard developed by the 3rd Generation The 3GPP Partnership Project is designed to provide high data transmission rates, low latency, and greater spectral efficiency. LTE is based on an all-IP architecture and employs advanced techniques such as OFDMA , SC- FDMA, and MIMO schemes, increasing system capacity and the robustness of the wireless link. Its widespread global infrastructure availability makes it a reliable alternative for transmitting telemetry data from remote locations to central servers, facilitating integration with real-time monitoring and analysis systems [16].

However, the use of 4G LTE in IoT applications has limitations related to the higher power consumption of end devices and the operating costs associated with data plans, which can restrict its adoption in low-power sensor applications or large-scale deployments. For this reason, LTE is often considered a complementary or backup technology compared to low-power solutions like LoRa [15], [16].

Several comparative studies indicate that no single communication technology can satisfy all the requirements of IoT applications in energy systems. Specifically, LoRa is well-suited for low-data-rate telemetry applications focused on energy efficiency, while 4G LTE offers greater reliability and transmission capacity in scenarios where link stability is paramount [15]. In the context of smart grids and microgrids, the coexistence of both technologies allows for the design of hybrid architecture that leverages the advantages of each solution, considering environmental conditions and system requirements.

I. METHODOLOGY

The project was developed using an applied research methodology focused on technological development, structured in four sequential phases encompassing the design, construction, evaluation, and integration of the IoT telemetry system. Figure 1 presents a general overview of the methodological flow followed in this study.



Fig. 1General diagram of methodology.

The project's development is structured using an applied research methodology focused on technological development, organized into four sequential and interrelated phases: design, construction, evaluation, and integration of the IoT telemetry system. Figure 1 presents a general overview of the proposed methodological flow, which allows for the coherent organization of system development from architecture definition to integration and validation.

A. IoT system architecture design

The first phase involves designing the architecture of the data acquisition and transmission system, considering the energy system requirements and the communication environment conditions. This stage includes a literature review on smart microgrids and IoT telemetry systems, identifying the energy variables to be monitored, analyzing the educational institution's energy profile, and defining communication requirements such as transmission frequency, data volume, latency, and reliability. Additionally, the wireless link environment is characterized, considering the distance between nodes, the presence of obstacles, and the lack of direct line of sight. This allows for the selection of sensors, meters, and IoT communication technologies (LoRa and 4G LTE) and the consolidation of the overall system architecture.

B. Construction of the telemetry nodes

The second phase involves building the IoT nodes for acquiring and transmitting energy data, according to the defined architecture. This phase includes integrating sensors and electricity meters with the processing and communication elements, assembling the corresponding hardware, and developing the firmware necessary for capturing and transmitting energy variables. It also includes basic functional tests to verify the correct operation of the nodes and the initial stability of the communication.

C. Evaluation of the feasibility of communication links

The third phase addresses the evaluation of the communication technologies' performance, with the aim of analyzing their viability in the proposed scenario. This stage involves conducting data transmission tests using LoRa technology under conditions representative of the real-world environment, considering an approximate distance of 10.5 km and the absence of a direct line of sight. The link evaluation

considers indicators such as RSSI, SNR, packet reception rate, and communication stability. Additionally, the link is evaluated using 4G LTE technology, allowing for a technical comparison between both technologies in terms of range, reliability, and link performance.

D. Integration and validation of the telemetry system

The final phase involves integrating the complete telemetry system, connecting the IoT nodes to the data reception server and the microgrid's storage and analysis platform. This stage includes server configuration, database implementation, and integration with the monitoring platform, as well as validating the end-to-end data flow from acquisition to visualization of energy information.

Overall, the proposed methodology defines a structured framework for analyzing the feasibility of IoT communication technologies applied to the transmission of energy telemetry data in a rural environment, serving as a basis for presenting the results of the study.

II. Discussion and Results

A. Telemetry system architecture

IoT telemetry system for monitoring the electrical microgrid is defined. Figure 2 schematically presents the organization of the system components and the data flow from the information sources to the final display devices, enabling the structuring of the acquisition, transmission, and processing of energy data.

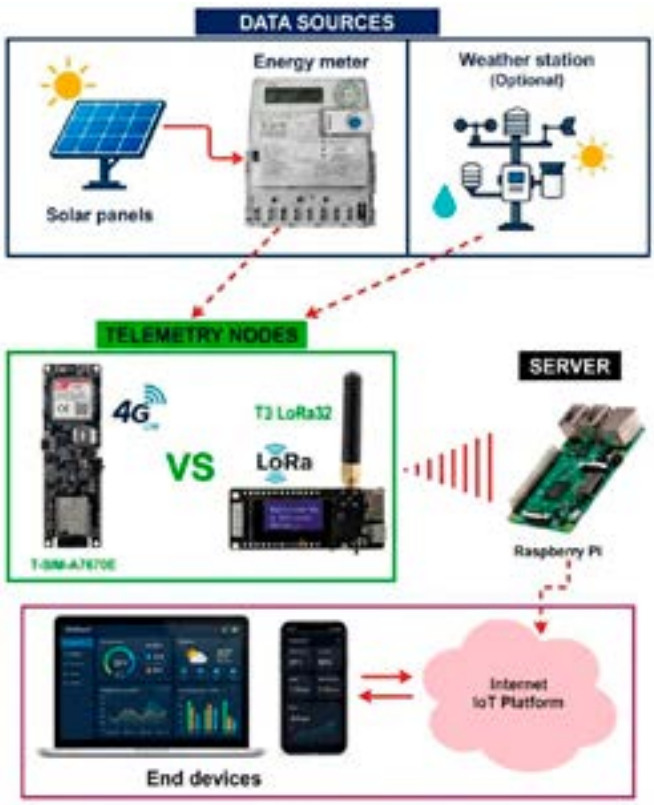


Fig. 2General architecture of the telemetry system

The architecture is organized into four main blocks: data sources, telemetry nodes, a processing server, and an IoT platform with end devices. The data sources include the microgrid's solar panels, the energy meter, and an optional weather station, which generates the system's primary data. This data is transmitted by the telemetry nodes, where two communication technologies are implemented: LoRa, using the T3 LoRa32 board, and 4G LTE, using the T-SIM A7670E module, allowing for their evaluation under the same operating scenario.

The received information is processed on a Raspberry Pi-based server, which centralizes the data and sends it to the IoT platform for storage and visualization. Finally, the data can be accessed remotely via end devices, facilitating system monitoring and the graphical representation of energy variables.

From an analytical perspective, the proposed architecture demonstrates a modular and flexible design, suitable for evaluating IoT communication technologies in energy telemetry applications. The functional separation into blocks allows for the integration and comparison of different communication technologies without affecting the rest of the system, which is particularly relevant for microgrids located in rural areas with limited telecommunications infrastructure.

B. Devices used in LoRa communication tests



Fig. 3LILYGO T-Beam Board



Fig. 4LILYGO T3 LoRa32 Board

LoRa communication tests, two electronic boards were selected as telemetry nodes to characterize the behavior of the wireless link under the same operating scenario. The chosen boards were the LILYGO T-Beam and the LILYGO T3 LoRa32, both based on the ESP32 microcontroller and integrating LoRa transceivers from the SX127x family. This

selection allows for maintaining homogeneous conditions in terms of communication technology, facilitating the comparison of the LoRa link 's performance based on the hardware used [17], [18].

The LILYGO T-Beam board is designed for long -range IoT applications and field deployments. It integrates an ESP32 microcontroller, a LoRa transceiver, Wi-Fi and Bluetooth connectivity, and support for an external antenna. A distinctive feature of this board is the integration of a GPS module, which allows for obtaining the node's geographic positioning information. This feature is especially useful in outdoor testing scenarios, where the device's location can be associated with analyzing the behavior of the communication link. Figure 3 shows the T-Beam board used during testing, highlighting its main physical components and connection elements [17].

LILYGO T3 LoRa32 board is a compact device designed for low-power IoT applications. It integrates an ESP32 microcontroller and a LoRa transceiver, maintaining a simplified and easily integrated design. This board features an OLED display, allowing for the local visualization of relevant information during operation, such as communication status, data reception, and diagnostic messages. Additionally, the T3 LoRa32 has a microSD card slot, enabling local storage of data acquired during testing and allowing for subsequent analysis without relying solely on real-time transmission. Figure 4 shows the T3 LoRa32 board used in this study [18].

Both boards share common capabilities, such as the use of LoRa communication in sub-GHz bands, compatibility with external antennas, and support for ESP32-based development environments. However, they present significant differences in terms of integration level, physical size, and additional functionalities, particularly the inclusion of a GPS module in the T-Beam and the presence of an OLED screen and local storage via microSD in the T3 LoRa32. These differences allow for the analysis of LoRa link behavior considering hardware variations while keeping environmental conditions and transmission parameters constant.

In the context of this research, the T-Beam and T3 LoRa32 boards form the basis for evaluating LoRa link performance indicators, such as RSSI, SNR, packet reception rate, and communication stability. The results obtained from these measurements are presented in the following subsections, where the link's behavior under the study scenario conditions are analyzed.

C. LoRa connectivity tests

As part of this stage, an initial series of tests is carried out aimed at the comparative evaluation of different types of LoRa antennas and devices, keeping the environmental conditions and transmission parameters constant.

Figure 5 presents a collage of images that visually documents the execution of the communication tests. This set includes photographs of the LoRa devices in operation, captures of transmitted and received messages, and visual references of the spacing between the test points. This photographic evidence confirms that the tests were carried out under real operating conditions, demonstrating the correct operation of the nodes during message exchange and the acquisition of link-related metrics, such as the received signal level.



Fig. 5Photographic evidence of LoRa tests

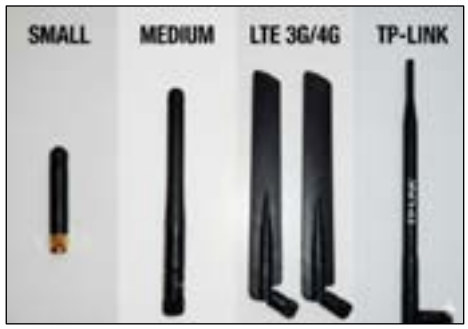


Fig. 6Types of antennas used

Once the basic operation of the system was verified, a specific test was developed focusing on analyzing the performance of the LoRa link based on the type of antenna used. For this test, four different antennas were evaluated, as shown in Fig. 6: a small antenna, a medium antenna, an LTE 3G/4G antenna, and a TP - Link antenna. The small and medium antennas are designed to operate in LoRa -compatible bands (868 MHz and 915 MHz), while the LTE and TP - Link antennas correspond to significantly higher frequency bands, allowing for the analysis of the effect of frequency mismatch on link quality.

LoRa boards described previously (T-Beam and T3 LoRa32) are used, with the RSSI (Received Signal Strength Indicator) obtained during message reception being recorded as the primary metric. For each antenna type and device combination, repeated transmissions are performed to observe the received signal level under equivalent operating conditions.

The results obtained are summarized graphically in Figure 7, which presents the RSSI value associated with each antenna and device. The graph shows that the antennas designed for LoRa- compatible frequencies exhibit significantly superior performance compared to the antennas designed for higher bands. In particular, the medium-sized antenna shows the most favorable RSSI values, indicating greater received signal strength and, therefore, better wireless link performance under the evaluated scenario.

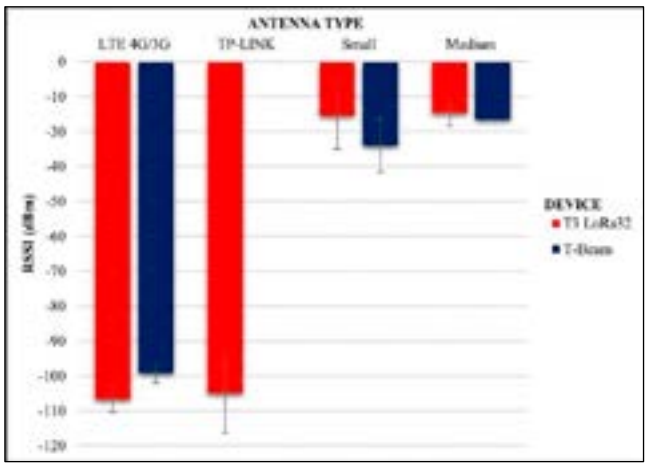


Fig. 7 Average RSSI by antenna type and device

Conversely, the small antenna and the LTE and TP - Link antennas exhibit lower RSSI values , indicating significant link degradation. This behavior is primarily attributed to frequency incompatibility in the case of the LTE and TP - Link antennas, and to the physical limitations of the small antenna in terms of gain and radiated efficiency.

Additionally, comparative analysis between devices shows that, for the same type of antenna, the T3 LoRa32 board exhibits slightly higher RSSI values compared to the T-Beam. Although the difference is not drastic, this behavior remains consistent throughout the tests, allowing for analysis of link performance considering variations associated with the hardware used.

Beyond link performance, device selection is also based on operational criteria observed during testing. The T3 LoRa32 facilitates monitoring of the experimental process thanks to its integrated OLED display, which allows for viewing messages, transmission status, and reception status directly on the device. Furthermore, the option for local data storage via microSD card allows for recording the information acquired during testing, which is especially useful for subsequent analysis without relying solely on real-time transmission. In contrast, the T-Beam integrates a GPS module, a feature that, while not directly used at this stage, is relevant for field deployment scenarios.

This initial series of tests establishes a clear comparative framework between LoRa antennas and devices , defining the combinations that exhibit the best link performance under the conditions of the study scenario. Following this initial characterization, the evaluation continues with additional LoRa link metrics , such as SNR , packet reception rate, and communication stability, which are presented in the subsequent subsections.

1) Experimental evaluation of the LoRa link according to distance

LoRa communication tests were conducted on the Malecón in Barranquilla to analyze the wireless link's performance in terms of range and communication quality. Two LoRa nodes based on the T3 LoRa32 board were used for this evaluation, one configured as a transmitter and the other as a receiver.

The transmitting node was responsible for periodically sending messages via LoRa communication, while the receiving node was configured to receive the messages, display relevant information on its integrated OLED screen, and store the received data on a microSD card. Recorded information included the test number, the number of messages received, and the arrival time in milliseconds, allowing for more precise identification of message losses and improved communication integrity during the journey.

Based on the recorded data, two graphs were constructed summarizing the LoRa link's behavior as a function of distance. Figure 8 presents the average RSSI and SNR values as a function of distance, while Figure 9 shows the communication quality expressed as the percentage of successful, corrupted, and lost messages for each test point.

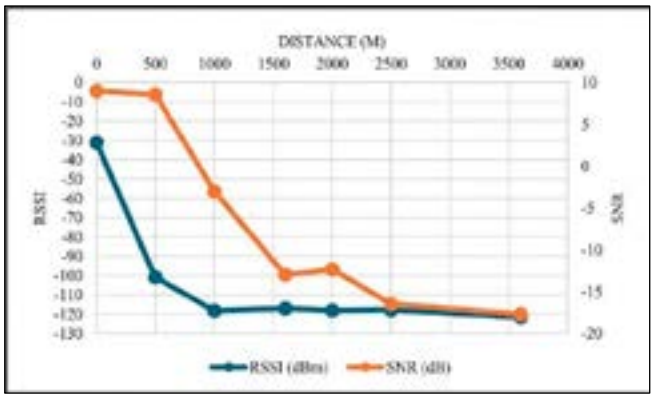


Fig. 8 Average RSSI and SNR as a function of distance

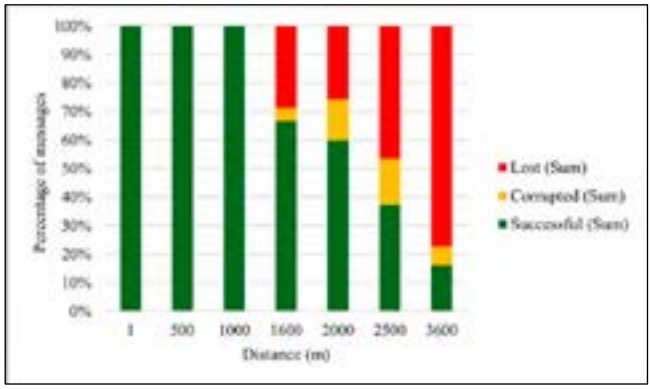


Fig. 9Communication quality as a function of distance

Figure 8 shows a progressive decrease in RSSI as the distance between transmitting and receiving nodes increases. For short distances, RSSI values remain relatively high, indicating stable signal reception. As the distance increases, the RSSI gradually drops, reaching values close to the reception threshold at the most distant points. Similarly, the SNR shows a decreasing trend, shifting from positive to negative values as the separation between nodes increases, reflecting a reduction in the signal-to-noise ratio of the link.

Figure 9 complements this analysis by showing the evolution of communication quality as a function of distance.

At the initial test points, a high percentage of successful messages is evident, with little to no corrupted or lost messages. From intermediate distances onward, an increase in the proportion of corrupt messages begins to be observed, followed by a significant increase in the number of lost messages, as the link approaches its operational limit.

LoRa communication under the evaluated scenario, which is approximately 3.6 km without a direct line of sight. At this point, RSSI and SNR values reach low levels, and communication quality is affected by a significant increase in message loss, limiting the reliability of the link for continuous data transmission.

Using the T3 LoRa32 board as a receiving node, along with local data storage on a microSD card, allowed for detailed recording of the link's behavior and the generation of the necessary indicators for the presented analysis. This configuration facilitated obtaining accurate information about the LoRa link's performance under real-world operating conditions, serving as a basis for subsequent comparison with other communication technologies.

2) Results of LoRa communication tests in Malambo - Atlantico

LoRa communication test was conducted in the municipality of Malambo, specifically at the Nuestra Señora de la Candelaria Educational Institution, the site where the proposed system is planned for implementation. This test is particularly relevant because it corresponds to a real-world operating scenario, characterized by the presence of buildings, physical obstacles, and environmental conditions less favorable for signal propagation, in contrast to the open environment previously evaluated on the Malecón in Barranquilla. For this evaluation, two LoRa nodes based on the T3 LoRa32 board were used, one configured as a transmitter and the other as a receiver, maintaining the same hardware configuration used in previous tests to ensure consistency in the results.

The data logging included the arrival time of each message in milliseconds, allowing for the precise identification of message loss intervals and the analysis of the link's temporal behavior. This configuration enabled the generation of Figure 10, which shows the temporal variation of RSSI and SNR values as a function of the number of messages received, allowing for the simultaneous evaluation of signal quality and stability throughout the test.

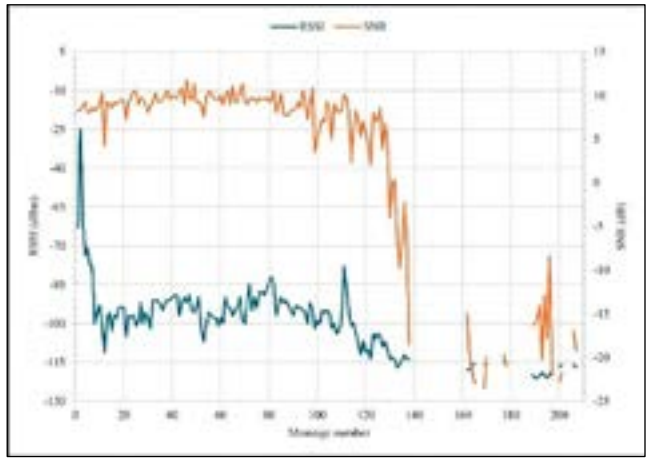


Fig. 10Temporal variation of RSSI / SNR and signal quality in Malambo

The graph shows that, during the initial messages, RSSI values remain within a relatively stable range, indicating consistent signal reception. However, as the test progresses and the distance between nodes increases, there is a progressive decrease in the received signal level, reflected in increasingly negative RSSI values. Similarly, the SNR shows significant variations, shifting from positive values to values close to or below zero, demonstrating a degradation in the link's signal-to-noise ratio.

A key aspect of the graph is the presence of breaks in the RSSI and SNR curves, which correspond to messages not received or not correctly decoded by the receiving node. These breaks explicitly represent message loss and allow visualization of how link degradation directly affects communication continuity. Unlike a global average, this temporal representation allows for clearer identification of critical sections of the link.

Compared to tests conducted on the Malecón in Barranquilla, where a maximum distance of approximately 3.6 km was achieved without direct line of sight, link degradation occurred earlier in the Malambo area. In this scenario, LoRa communication began to be significantly affected at distances close to 1.5 km, with a notable increase in message loss and a marked reduction in signal quality. These results reflect the direct impact of the real physical environment on LoRa link performance, where the presence of obstacles, buildings, and less favorable propagation conditions influence both the range and stability of the communication. The data recorded by the T3 LoRa32 receiver node allowed for a detailed capture of the link's behavior under conditions representative of the system's implementation scenario, providing a solid foundation for analyzing LoRa performance in real rural environments.

D. 4G LTE connectivity tests



Fig. 11T-SIM-A7670E Plate

LTE communication tests were performed using the LILYGO A7670E T-SIM module, which integrates a cellular modem compatible with 4G LTE networks and communicates with the ESP32 microcontroller using AT commands. Figure 11 shows the A7670E T-SIM device used during the tests, highlighting the cellular module, the SIM card slot, and the main connection components, according to the architecture described in the manufacturer's documentation [19].



Fig. 12LTE connectivity test

As an initial step in conducting the tests, a commercial SIM card was purchased and inserted into the corresponding module of the T-SIM A7670E. Subsequently, the module's basic configuration was performed to verify correct SIM detection and modem status. This step is essential to ensure connectivity with the cellular network before initiating data transmission.

A dedicated serial port was used for interaction between the ESP32 and the cellular modem. This port was configured using the instruction shown in Fig. 12, which sets the communication speed and the module's transmit and receive pins. This configuration allows the sending and receiving of AT commands, which constitute the standard interface for controlling cellular communication devices [19].

IMEI was obtained using specific AT commands. Checking the IMEI uniquely identifies the device within the cellular network and verifies that the module is correctly registered and operational. The modem's response, observed through the serial monitor, confirms the successful execution of the command and the device's availability for communication.

Figure 12 illustrates the bidirectional communication flow between the A7670E T-SIM module and a mobile device, demonstrating the process of sending and receiving information over the 4G LTE network . This image shows how the module, controlled by the ESP32, sends messages that are received by the end device, as well as the responses generated by the modem, indicating statuses such as successful initialization, SIM availability, and completion of the transmission process.

During testing, the T-SIM A7670E module validated data transmission capabilities over the cellular network, demonstrating stable and continuous communication whenever 4G LTE coverage was available. Unlike LoRa communication , this technology does not depend directly on the distance between local nodes, but rather on the cellular network infrastructure, enabling data transmission to remote servers without requiring dedicated point-to-point links.

The use of AT commands facilitated detailed control of the cellular modem, enabling device initialization, network status verification, and message transmission. This interaction, supported by the T-SIM A7670E architecture, demonstrates the module's viability as a communication alternative for energy telemetry systems requiring greater reliability and extended coverage, especially in scenarios where low-power technologies are limited.

III. Conclusion

The project enabled the development and validation of an IoT-based telemetry system for monitoring an electrical microgrid in a rural educational environment through the evaluation of LoRa and 4G LTE technologies under real operating conditions. The tests showed that, although LoRa is an efficient alternative in terms of power consumption and operational cost, its performance in the Malambo scenario was affected by obstacles and the lack of direct line of sight, reducing both communication range and link stability. In contrast, the tests conducted with the T-SIM A7670E module demonstrated that 4G LTE provides a more stable and reliable data transmission toward the monitoring center, as long as cellular coverage is available, making it the most suitable option for this project.

Additionally, the work validated the overall telemetry system architecture and the basic operation of the communication nodes. As future work, the complete integration of the system with real energy data from the microgrid and its continuous connection to an IoT monitoring and visualization platform is proposed to strengthen its practical application in real energy management scenarios.

References

[1] Colombian Ministry of Mines and Energy, “Colombia reaches 93.12% electricity coverage after bringing power to 539,351 new homes and registering the greatest progress in rural areas.” Accessed : Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://n9.cl/t9fo44

[2] Mining and Energy Planning Unit – UPME , “ Indicative Plan for the Expansion of Electricity Coverage - PIEC.” Accessed : Mar. 24 , 2026. [Online]. Available: https://n9.cl/63sj4

[3] Atlántico Governorate, "'Energy for the People' advances in rural areas to boost agricultural productivity in Atlántico." Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://short.do/5SqfA4

[4] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2023 – Analysis - IEA." Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023

[5] N. Kumari, A. Sharma, B. Tran, N. Chilamkurti , and D. Alahakoon, "A Comprehensive Review of Digital Twin Technology for Grid-Connected Microgrid Systems: State of the Art, Potential and Challenges Faced," *Energies (Basel).* , vol. 16, no. 14, p. 5525, Jul. 2023, doi : 10.3390/en16145525.

[6] S. Punitha, NP Subramaniam, P. Ajay, and V. Raj, "A comprehensive review of microgrid challenges in architectures, mitigation approaches, and future directions," *Journal of Electrical Systems and Information Technology 2024 11:1* , vol. 11, no. 1, pp. 60-, Dec. 2024, doi : 10.1186/s43067-024-00188-4.

[7] IBM, "What is a microgrid?" Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/microgrid

[8] H. Jafarizadeh , E. Yamini, SM Zolfaghari, F. Esmaeilion , MEH Assad, and M. Soltani, "Navigating challenges in large-scale renewable energy storage: Barriers, solutions, and innovations," *Energy Reports* , vol. 12, pp. 2179–2192, Dec. 2024, doi : 10.1016/J.EGYR.2024.08.019.

[9] D. Herrera, "SMART MICRO-GRIDS AND THE PERSPECTIVE OF WHERE ECUADOR IS HEADING," Quito - Ecuador. Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://short.do/WI92rH

[10] IBM, "What is the Internet of Things (IoT)?" Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: https://www.ibm.com/think/topics/internet-of-things

[11] L. Tightiz and H. Yang, "A Comprehensive Review on IoT Protocols Features in Smart Grid Communication," *Energies (Basel).* , vol. 13, no. 11, p. 2762, Jun. 2020, doi : 10.3390/EN13112762.

[12] BS Aguilar León, CE Zambrano Ramos, and DA Cevallos Valdiviezo, "Implementation of an intelligent photovoltaic system with telemetry for energy self-sufficiency of CIDIS -ESPOL," ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, Guayaquil - Ecuador, 2025. Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/67348

[13] IBM, "What is telemetry?" Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/telemetry

[14] Semtech, "ICs for Sensors - LoRa Connect ™ ," The LoRa Connect portfolio consists of sub-GHz, 2.4 GHz and multi-band transceiver chips and reference designs for sensors and trackers. Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect

[15] C. Ndukwe, MT Iqbal, X. Liang, J. Khan, and L. Aghenta , "LoRa-based communication system for data transfer in microgrids," *AIMS Electronics and Electrical Engineering* , vol. 4, no. 3, pp. 303–325, Sep. 2020, doi : 10.3934/ELECTRENG.2020.3.303.

[16] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Specifications & Technologies." Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/specifications-technologies

[17] LilyGo , "T-Beam – LILYGO ®." Accessed: May 08, 2026. [Online]. Available: https://lilygo.cc/products/helium-t-beam?variant=43059272351925

[18] LilyGo , "T3 LoRa32 V1.6.1 – LILYGO ®." Accessed: May 08, 2026. [Online]. Available: https://lilygo.cc/products/lora3?variant=42272562315445

[19] LilyGo , "T-SIM-A7670E R2 – LILYGO ®." Accessed: May 08, 2026. [Online]. Available: https://lilygo.cc/products/t-sim-a7670e

Development of power generation models based on meteorological data and solar radiation in the Coffee Region

1st Santiago Alzate Moncaleano
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
santiago.alzatem@uqvirtual.edu.co

2nd Catalina Aguirre Grisales
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
caaguirre@uniquindio.edu.co

3rd Johan Rodriguez
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
johan.rodriguezr@uqvirtual.edu.co

4th Manuela Isabella Daza
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
manuelai.dazae@uqvirtual.edu.co

5th Cesar Alvarez Gaspar
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
caalvarez@uniquindio.edu.co

6th Marisol Gomez Cano
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
solgc@uniquindio.edu.co

***Abstract*—A predictive model for hourly global solar irradiance was designed and implemented for Colombia's Coffee Region using multi-layer perceptron (MLP) artificial neural networks. The model takes as inputs the time of day, Julian day, and ERA5-Land (Copernicus) satellite irradiance data, all normalized to the interval [−1, 1]. From a systematic search across 55 architectures, each trained 50 times with the Levenberg-Marquardt algorithm and a 75/25 train-validation split, the optimal configuration was a two-hidden-layer MLP (4–9 neurons), achieving 92.58% (±0.12%) average accuracy and an MSE of 5.25×10^{-3}. Results confirm the model reliably reproduces diurnal irradiance patterns, establishing it as a practical tool for photovoltaic system sizing in tropical mountainous regions with sparse ground-station coverage.**

Keywords*— *Solar irradiance, Multilayer Perceptron, ERA5-Land, Copernicus, NASA POWER, Coffee Region.

I. Introduction

The growing adoption of solar photovoltaics as an alternative to fossil fuels has highlighted the need to accurately estimate Global Horizontal Irradiance (GHI), Direct Normal Irradiance (DNI), and Diffuse Horizontal Irradiance (DHI)—essential variables for the design and operational management of photovoltaic systems [1], [2]. However, their irregular nature introduces uncertainty into the stability of power grids, which requires robust and regionally adapted predictive tools [3].

In Colombia, the limited number of ground-based radiometric stations makes it difficult to characterize solar resources, a situation that is particularly critical in the Coffee Region, where the complex topography and tropical climate result in highly variable radiation patterns [4]. Satellite reanalysis products such as ERA5-Land (Copernicus) offer broad spatiotemporal coverage, but their inherent local biases require cross-validation with in situ measurements [5], [6].

Against this backdrop, Machine Learning has proven effective for modeling solar irradiance. Recent studies have explored models such as XGBoost and Random Forest by combining satellite and ground-based data [7], convolutional networks with satellite imagery [3], and LSTM architectures with data from multiple sources [8]. In the Colombian context, Ordoñez et al. reported an R^2 of 0.92 by integrating GOES-13 images with IDEAM data using an MLP [4], demonstrating the potential of the approach but also the limitations stemming from the lack of monitoring infrastructure [9].

This study proposes a predictive model based on a Multi-Layer Perceptron (MLP) for estimating hourly global irradiance in Colombia's Coffee Region, trained with ERA5-Land data and validated against local measurements and NASA POWER estimates, as a contribution to the regional energy transition in tropical mountainous areas with low instrumental density.

II. Methodology

A. Overview of the Pipeline

To carry out this study, a four-stage process was established: database reception and validation, preprocessing and preparation for training, construction of the training dataset, and the systematic execution and evaluation of the MLP model. Additional details can be seen in the diagram in Figure 1.



Fig. 1. General system diagram (Source: Author).

B. Data Sources

The study utilized three data sources containing hourly irradiance records for Armenia, Quindío, Colombia. The primary source was ERA5-Land, a high-resolution reanalysis product developed by the Copernicus Climate Change Service (C3S), which provides hourly reconstructions of the Earth's surface conditions from 1950 to the present [10], [11]. From this product, the Surface Downward Solar Radiation (SSRD) variable was extracted, covering the period January 2023–December 2024. Estimates from the NASA POWER project [12], focused on renewable energy applications, and a local database of 144 hourly samples obtained using the TSL2591 sensor installed in the region were used as validation and comparison sources.

C. Preprocessing

The preprocessing was implemented in MATLAB and consisted of four stages. First, decimal separator standardization was applied using numerical parsing to ensure the files were read correctly. Second, null values (NaN) and physically impossible irradiance values—such as those less than zero—were removed to prevent the introduction of bias during training. Third, unit conversion was performed: the original data in J/m² was converted to Wh/m² by dividing by 3600, and subsequently to kWh/m² by dividing by 1000, thereby unifying all sources into a single physical dimension.

$$E_{Wh} = \frac{E_j}{3600} \tag{1}$$

$$I_{kWh/m^2} = \frac{E_{wh}}{3600} \tag{2}$$

Finally, to preserve the cyclical nature of the time variable and avoid mathematical discontinuities between 11:00 p.m. and midnight, the time of day was decomposed into two orthogonal components using a trigonometric transformation:

$$h_{sin} = \sin\left(\frac{2\pi h}{24}\right) \tag{3}$$

$$h_{cos} = \cos\left(\frac{2\pi h}{24}\right) \tag{4}$$

Finally, all input variables were normalized to the interval [−1, 1] and centered around zero to speed up the convergence of the training algorithm:

$$X_{norm} = 2 \cdot \frac{X - X_{min}}{X_{mAX} - X_{min}} - 1 \tag{5}$$

The normalization parameters were calculated exclusively on the training set and subsequently applied to the validation set, thereby preventing information leakage between partitions. The final data split was 75% for training (12,217 samples) and 25% for validation (5,236 samples).

D. Model Architecture

The Multilayer Perceptron (MLP) is a feedforward neural network architecture that extends the capabilities of the single-layer perceptron by enabling the learning of complex nonlinear relationships through hidden layers of interconnected neurons [13]. Its capacity as a universal approximator makes it ideal for modeling the complex relationship between meteorological predictors and the resulting irradiance. In the hidden layers, the hyperbolic tangent (tanh) activation function was used, whose symmetric nature and output range between −1 and 1 promotes convergence by keeping the data centered at zero. In the output layer, the ReLU function was used, ensuring that the model does not generate negative irradiance predictions, which are physically inconsistent [14].

TABLE I. ARCHITECTURES

Architecture	Parameters		
	Search parameters		
	Layers	Number of neurons per layer	Iterations per model
Single	1	1–9	50
Double	2	2-2 to 9-9	50

E. Input Matrix

Based on the transformation and adjustment of the aforementioned input variables, the model's input matrix was constructed by integrating the time and satellite observation components of the irradiance. The matrix is shown in Table II.

TABLE II. INPUT MATRIX

Input variables	Input Matrix		
	General description of variables		
	Description	Unit/Range	Data type
Julian day	Day of the year	1–365 Normalized	Numeric
Time of day (cos)	Cyclic representation of time using the cosine function	0–23 Normalized	Numeric
Time of day (sin)	Cyclic representation of time using sine	0–23 Normalized	Numeric
ERA5-Land Irradiance	Hourly irradiance obtained from Copernicus	kWh/m² Normalized	Numeric

F. Training

Synaptic weights were adjusted using the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm, which combines the stability of gradient descent with the convergence speed of the Gauss-Newton method, and is particularly efficient for small and medium-sized networks [15].

$$\Delta\omega = [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \quad (6)$$

where J is the Jacobian matrix, e is the error vector, and μ is the scalar damping parameter. Training was configured with a limit of 500 epochs and a stopping criterion of 10×10−6. To ensure reproducibility and rule out dependence on the random initialization of the weights, each of the 55 architectures was trained 50 times completely independently, for a total of 2,750 training runs.

G. Evaluation Metrics

Predictive performance was quantified on the validation set using three metrics. The Mean Squared Error (MSE) penalizes large errors more severely by squaring the differences. The Root Mean Squared Error (RMSE) expresses the error in the same physical units as the predicted variable (kWh/m²), facilitating direct interpretation. Accuracy (%) represents the overall proportion of correct predictions evaluated against defined thresholds.

After validating the results of each of the models and their iterations, a multi-criteria analysis was performed that integrated the performance of the aforementioned parameters as follows:

The selection was based on three criteria:

- Error optimization: It exhibited the lowest MSE and the highest accuracy among all the configurations evaluated.
- Robustness: It showed the least variability in results after 50 iterations, ensuring that performance does not depend on the random initialization of the weights.
- Generalization: The similarity between the training and validation metrics ruled out the presence of overfitting.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Architecture Selection

A systematic evaluation of the 55 MLP architectures identified Model ID 30 (2×4-9 configuration) as the optimal configuration, with the lowest validation MSE (5.26×10^{-3}), an RMSE of 0.0725 kWh/m², and an average accuracy of 92.58%. Table III summarizes the ten best-performing architectures. It can be observed that, in general, two-layer configurations outperform single-layer ones in terms of fitting ability, although the differences among the best models are relatively small, suggesting that the problem does not require highly complex architectures to be modeled accurately.

TABLE III. RESULTS OF THE TOP 10 ARCHITECTURES

ID	MLP					
	RESULTS OF THE TOP 10 ARCHITECTURES					
	Layers	MSE Train	MSE Val.	RMSE	Accuracy	Acc. SD (%)
30	2	0.0052533	0.00526 41	0.07247 8	0.92575	0.11955
29	2	0.005363	0.00537 83	0.07321 7	0.92521	0.11981

ID	MLP					
	RESULTS OF THE TOP 10 ARCHITECTURES					
28	2	0.0054236	0.0053988	0.0736345	0.92482	0.0936744
10	1	0.0055849	0.0055838	0.0747331	0.92508	0.0998661
25	2	0.0055791	0.0056009	0.0746845	0.92464	0.12206
27	2	0.0056372	0.0056568	0.0750551	0.92417	0.11516
9	1	0.0056594	0.0056727	0.0752227	0.92527	0.12043
24	2	0.0056665	0.0057195	0.0752466	0.92441	0.13882
8	1	0.0057359	0.0057444	0.0757331	0.92509	0.10536
7	1	0.0058299	0.0058486	0.0763449	0.92507	0.13171

The final MLP model structure selected is shown in Figure 2.

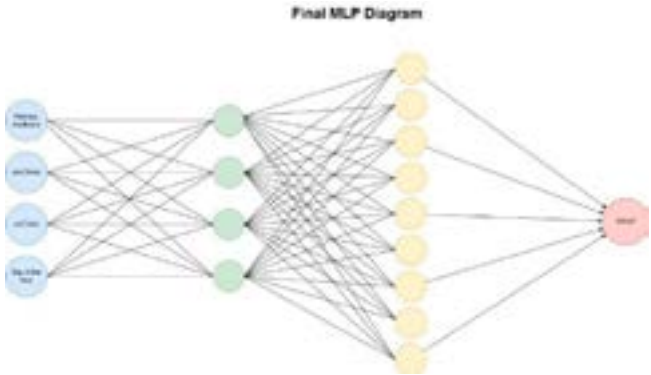


Fig. 2. Final MLP diagram (Source: Author)

B. *Stability and Robustness*

To ensure that the selection of Model ID 30 did not depend on the random initialization of the synaptic weights, the accuracy distribution obtained across the 50 independent repetitions of each architecture was analyzed. As shown in Fig. 3, Model ID 30 exhibits not only the highest median accuracy, close to 92.6%, but also the lowest variance among all evaluated configurations.

This combination of high accuracy and low variability confirms the model's operational stability and its ability to generalize across different initial conditions, a decisive criterion for its selection as the final configuration.

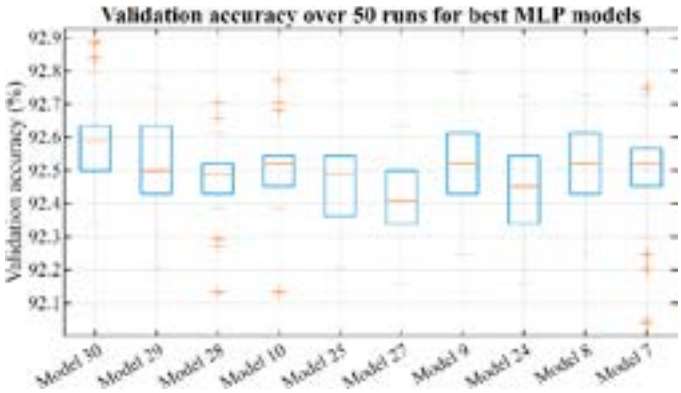


Fig. 3. Validation of the top 10 architectures (Source: Author).

.

C. *Comparison with satellite sources*

Fig. 4 shows the performance of the ID 30 Model compared to surface measurements and reference satellite data (Copernicus ERA5-Land and NASA POWER) over a six-day period. The model accurately reproduces the characteristic bell-shaped curve of the diurnal irradiance cycle, properly capturing both the amplitude of the midday peak and the transitions at dawn and dusk. The satellite sources, on the other hand, exhibit a systematic overestimation at radiation peaks, a phenomenon consistent with what has been reported in the literature for tropical regions with high cloud cover [5], [6]. The MLP model mitigates this bias by having been trained directly on local measurements, achieving a superior fit in both magnitude and temporal behavior.

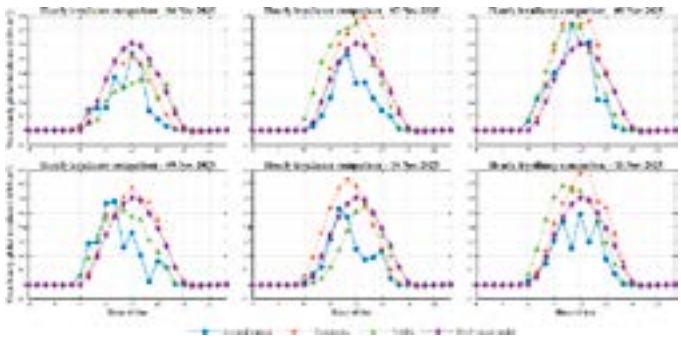


Fig. 4. Hourly irradiance comparison: MLP model vs. satellite sources (Source: Author).

IV. Acknowledgments

This I thank God for the opportunity He gave me to pursue a degree that has taught me so much and helped me focus even more on my purpose in life, as well as giving me the strength and other virtues that have shaped not only my knowledge, but also my character and morality.

I thank my entire family, especially my parents, for making me who I am today. For being there for me at all times and supporting me in every way possible during my training as an Electronic Engineer. I also thank my uncles, grandparents, brother, and relatives who contributed in many ways to my professional development. My gratitude goes to the professors who accompanied me on this journey; they contributed greatly to my personal and professional development, and I take the best from each of them. Special thanks to: César Alvarez, Marisol Gomez, Jorge Aldana, Luis Miguel Capacho, Wilmer Diego Jimenez, Francisco Javier Ibarguen, César Arce, and especially to Professor Catalina Aguirre Grisales for being my role model, for always supporting me, and for trusting in me.

Finally, I thank my research colleagues Johan Rodriguez and Manuela Daza for their mutual support through every phase of the project. s

V. Conclusions

This study presented the design and implementation of a predictive model based on a multilayer perceptron for estimating hourly global solar irradiance in Colombia's Coffee Region. Based on a systematic evaluation of 55 architectures, each trained 50 times independently using the Levenberg-Marquardt algorithm, the optimal configuration was found to be an MLP with two hidden layers containing 4 and 9 neurons, respectively, achieving an average validation accuracy of 92.58% (±0.12%) and an RMSE of 0.0726 kWh/m². These results demonstrate that open-access ERA5-Land satellite data, combined with appropriate preprocessing techniques—including cyclic decomposition of the time variable and normalization to the interval [−1, 1]—allow for the accurate estimation of local irradiance in tropical mountainous regions with low instrument density.

The model consistently outperformed the reference satellite sources (Copernicus and NASA POWER) in reproducing diurnal irradiance patterns, mitigating the overestimation characteristic of those products under high cloud cover conditions. This positions it as a practical and replicable tool for sizing photovoltaic systems in areas with limited monitoring infrastructure, thereby contributing to the planning of renewable energy projects in the Colombian context.

Future work will focus on exploring time-series-oriented deep learning architectures, such as LSTM networks, incorporating additional meteorological variables such as temperature and humidity, and scaling the model to other geographic regions of the country to assess its robustness and generalizability.

REFERENCES

[1] K. Bakirci y Y. Kirtiloglu, "Prediction of diffuse solar radiation using satellite data," Int. J. Green Energy, vol. 15, no. 2, pp. 76–79, 2018.

[2] S. Zhao et al., "Coupling meteorological stations data and satellite data for prediction of global solar radiation with machine learning models," Renewable Energy, vol. 198, pp. 1049–1064, 2022.

[3] E. O. Yuzer y A. Bozkurt, "Deep learning model for regional solar radiation estimation using satellite images," Ain Shams Eng. J., vol. 14, no. 8, 2023.

[4] L. E. Ordoñez Palacios, V. Bucheli Guerrero y H. Ordoñez, "Integration of satellite imagery and meteorological data to estimate solar radiation using machine learning models," J. Univ. Comput. Sci., vol. 29, no. 7, pp. 738–758, 2023.

[5] K. Bakirci, "Evaluation of models for prediction of diffuse solar radiation and comparison with satellite values," J. Cleaner Prod., vol. 374, 2022.

[6] Y. Tan, Q. Wang y Z. Zhang, "Tree-based machine learning estimation of near-real-time diffuse solar irradiance from Himawari-8," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 62, pp. 1–9, 2024.

[7] S. Zhao, X. Liu, D. Li y J. Huang, "Coupling meteorological stations data and satellite data for prediction of global solar radiation with machine learning models," Renewable Energy, vol. 198, pp. 1049–1064, 2022.

[8] M. Attya et al., "Advanced solar radiation prediction using combined satellite imagery and tabular data processing," Sci. Rep., vol. 15, no. 1, 2025.

[9] G. R. C. Avella, "Colombia y la transición energética," Ciencia Política, vol. 13, no. 25, pp. 107–125, 2018.

[10] J. Muñoz-Sabater et al., "ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications," Earth Syst. Sci. Data, vol. 13, no. 9, pp. 4349–4383, 2021.

[11] Copernicus Climate Change Service (C3S), "ERA5-Land hourly data from 1950 to present," Climate Data Store, 2019.

[12] T. Zhang et al., "A global perspective: NASA's Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Project," NASA Technical Reports Server, 2007.

[13] S. Haykin, Neural Networks: A Comprehensive Foundation, 2nd ed. Prentice Hall, 1999.

[14] I. Goodfellow, Y. Bengio y A. Courville, Deep Learning. Cambridge, MA: MIT Press, 2016. [Online]. Available: http://www.deeplearningbook.org

[15] M. T. Hagan y M. B. Menhaj, "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm," IEEE Trans. Neural Netw., vol. 5, no. 6, pp. 989–993, 1994.

Levelized Cost Assessment of Green Hydrogen Production from Renewable Energy in the Colombian Caribbean

Hormaza, Valentina
Department of Chemical and Environmental Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
vmogollon@unal.edu.co

Gómez, Yenifer
Department of Chemical and Environmental Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
yegomezv@unal.edu.co

Cuellar, Ana
Department of Chemical and Environmental Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
ancuellarg@unal.edu.co

Mena, Alexander
Department of Chemical and Environmental Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
imena@unal.edu.co

Valbuena, Laury
Department of Chemical and Environmental Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
lavalbuenam@unal.edu.co

Ramírez, Laura
Department of Chemical and Environmental Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
lramirezri@unal.edu.co

Conde, Laura
Department of Chemical and Environmental Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
lrconder@unal.edu.co

***Abstract*— Green hydrogen production from renewable energy sources represents a key pathway for decarbonizing Colombia's energy system and advancing energy transition goals [1]. The Caribbean region stands out due to its high potential for solar photovoltaic and offshore wind generation, characterized by favorable resource availability and high-capacity factors [2], [3]. However, this potential contrasts with existing limitations in electricity supply and infrastructure, which constrain regional energy reliability [4]. This context creates opportunities for the development of integrated energy systems that combine renewable power generation with hydrogen production, enabling both energy diversification and increased system resilience.**

This study evaluates the technical and economic pre-feasibility of a green hydrogen production system based on the integration of solar photovoltaic and offshore wind generation, alkaline water electrolysis (AWE), and seawater desalination. The proposed system is designed for an initial production capacity of 10 kt H_2/year, with scalability up to 30 kt/year. The hydrogen produced is The total net energy demand for applications in heavy-duty transport and for the synthesis of energy carriers such as ammonia and methanol [6]. In addition, the system incorporates the potential to supply approximately 5% of the electricity demand in the Caribbean region, contributing to improved energy security and grid support.

Results indicate a levelized cost of electricity (LCOE) ranging from 35-95 USD/MWh and a levelized cost of hydrogen (LCOH) between 3.2-7.2 USD/kg, depending on the energy mix, production scale, and financial assumptions. The most competitive scenario corresponds to a fully solar-based configuration, achieving an LCOH of 3.2 USD/kg at a production scale of 30 kt/year. Overall, the results support a phased implementation strategy for green hydrogen in the Colombian Caribbean, emphasizing water resource sustainability, territorial feasibility (8,550 ha total), and alignment with regional energy needs [1], [5].

Keywords—Green hydrogen; Techno-economic analysis; Renewable energy integration; Alkaline electrolysis; Caribbean region

I. Introduction

The global energy transition requires the rapid deployment of low-carbon technologies capable of decarbonizing hard-to-abate sectors such as heavy-duty transportation and industry. In this context, hydrogen has emerged as a key energy vector due to its versatility, high energy density, and potential to facilitate the integration of variable renewable energy sources into modern energy systems. Green hydrogen, produced through water electrolysis powered by renewable electricity, offers a promising pathway to significantly reduce greenhouse gas emissions while enhancing energy system flexibility and long-term energy storage capabilities [1], [5].

Colombia has identified hydrogen as a strategic component of its energy transition agenda, supported by national policy frameworks such as the Hydrogen Roadmap, which projects a substantial increase in hydrogen demand by 2040 across industrial and transportation sectors [5], [6]. Within this context, the Caribbean region stands out because of its exceptional renewable energy potential, particularly for solar photovoltaic and offshore wind generation. The region is characterized by average solar irradiation levels exceeding 5.5 kWh/m²/day and offshore wind speeds above 9 m/s at hub height, among the highest values reported in Latin America [2], [3]. Nevertheless, this significant technical potential coexists with persistent structural challenges related to electricity supply, including grid

limitations, variability in service quality, and unmet energy demand in several areas of the region [4].

These conditions create an opportunity for the development of integrated energy systems capable of simultaneously addressing regional energy supply constraints and enabling the production of clean energy carriers. By coupling renewable energy generation with hydrogen production, it is possible to enhance energy security, reduce pressure on the electrical grid, and create new pathways for sectoral decarbonization. However, despite the increasing number of proposed hydrogen projects worldwide, many remain at the conceptual stage because of challenges associated with economic viability, infrastructure requirements, regulatory complexity, and social acceptance.

In the Colombian context, these challenges are further intensified by the need to ensure that energy transition processes are not only technically and economically feasible, but also environmentally sustainable and socially inclusive. This requires project designs that prioritize efficient resource utilization, water management, territorial compatibility, and alignment with local energy needs, rather than focusing exclusively on large-scale export-oriented hydrogen production.

In response to these challenges, this study evaluates the technical and economic pre-feasibility of an integrated green hydrogen production system in the Colombian Caribbean region. The proposed system combines solar photovoltaic and offshore wind generation with alkaline water electrolysis and seawater desalination, enabling a self-sufficient and resource-efficient configuration. The system is designed for an initial production capacity of 10 kt H_2/year, with scalability up to 30 kt H_2/year, while also contributing to regional electricity supply through the injection of excess renewable energy into the grid.

The adoption of a phased capacity strategy, beginning at 10 kt H_2/year and scaling up to 30 kt H_2/year, reflects both the infrastructure maturity constraints of the Colombian Caribbean region and the investment risk profile typically associated with first-of-a-kind projects in emerging hydrogen markets. An initial production scale of 10 kt/year enables operation within a financially de-risked framework, facilitates the generation of operational experience, and allows validation of the technical integration of offshore wind, solar PV, and alkaline electrolysis under local conditions. At the same time, this scale remains sufficiently large to achieve meaningful economies of scale in electrolyzer procurement. Expansion to 30 kt/year is contingent upon demonstrated operational performance and the progressive development of hydrogen offtake agreements in sectors such as heavy-duty transportation and ammonia synthesis, identified in Colombia's Hydrogen Roadmap as priority end-use markets [5], [6]. This phased deployment strategy is consistent with frameworks proposed by organizations such as the International Renewable Energy Agency and the Hydrogen Council for green hydrogen projects developed in regions with emerging infrastructure and regulatory environments [14], [16].

The novelty of this work lies in the integration of renewable energy generation, hydrogen production, and resource management within a unified framework that prioritizes territorial feasibility and support for the regional energy system. Unlike approaches that size hydrogen production exclusively on the basis of projected market demand, this study adopts a system-oriented perspective in which hydrogen production is partially driven by renewable energy availability and grid interaction, thereby enabling a more realistic and context-sensitive deployment pathway.

Finally, the study develops a techno-economic model to evaluate system performance under multiple generation scenarios, including solar, wind, and hybrid configurations, as well as different financial structures. Key performance indicators such as the levelized cost of electricity (LCOE), levelized cost of hydrogen (LCOH), net present value (NPV), and internal rate of return (IRR) are analyzed to assess project feasibility and identify optimal system configurations.

II. Methodology

This section presents the techno-economic framework developed to evaluate the pre-feasibility of an integrated green hydrogen production system for the Colombian Caribbean region. The methodology comprises six interrelated components: (i) energy demand and system boundary definition, (ii) renewable resource characterization and loss assessment, (iii) technical sizing of generation and electrolysis assets, (iv) capital and operating expenditure estimation, (v) financial modelling and cost levelization, and (vi) sensitivity analysis. All key parameters and corresponding bibliographic sources are summarized in Table I.

TABLE I Main System Parameters and Data Sources

Parameter	Value	Unit	Source
H_2 production target	10 / 30	kt/year	Design basis
Electrolyzer specific consumption (AWE)	50.0	kWh/kg	[10], [11]
Total specific energy (E_sp)	54.07	kWh/kg	Calculated
Caribbean region electricity demand	22,945	GWh/year	[8]
Grid supply target	5%	—	[8]
Solar PV capacity factor (CF_sol)	0.24	—	[2], [7]
Offshore wind capacity factor (CF_win)	0.48	—	[3]
AWE effective capacity factor (CF_elec)	0.68	—	[11], [14]
OPEX annual escalation	2.0	%/year	Assumption

A. System Boundary and Production Targets

The system under study integrates four subsystems: (1) a utility-scale solar photovoltaic (PV) plant, (2) an offshore wind farm, (3) an alkaline water electrolysis (AWE) plant fed by a seawater desalination and deionization train, and (4) a hydrogen

compression and storage facility. The system boundary is drawn at the outlet of the hydrogen storage tanks and at the point of common coupling (PCC) with the Caribbean regional grid.

The reference production scale is 30 kt H_2/year, with a phased entry starting at 10 kt H_2/year. Hydrogen is intended for heavy-duty transportation applications and for the production of hydrogen-derived fuels and chemical carriers such as ammonia and methanol. In addition, the system is designed to supply approximately 5% of the Caribbean region's annual electricity demand (22,945 GWh, [8]), equivalent to 1,147 GWh/year, through a long-term power purchase agreement (PPA). Accordingly, the total net energy demand of the system, E_{total}, is defined as:

$$E_{total} = E_{H_2} + E_{grid} = (Q_{H_2} \times E_{sp}) + E_{grid} \quad (1)$$

where Q_{H_2} is the annual hydrogen production (kg/year), E_{sp} is the total specific energy consumption of the system (kWh/kg), and E_{grid} is the contracted grid supply (GWh/year). The total specific energy consumption, $E_{sp} =$ 54.07 kWh/kg, corresponds to the combined energy requirements for electrolysis (50.0 kWh/kg), hydrogen compression (4.0 kWh/kg), and water treatment (0.07 kWh/kg), consistent with state-of-the-art AWE performance reported in the literature [10], [11].

B. Renewable Energy Resource Assessment and Loss Model

Capacity factors for the Colombian Caribbean region were obtained from the IDEAM Solar and Wind Atlas and validated using data reported for utility-scale renewable energy projects [7]. A solar capacity factor (CF_{sol}) of 0.24 was adopted, consistent with average solar irradiation of approximately 5.5 kWh/m²/day in Alta Guajira [2], [7]. For offshore wind, a capacity factor (CF_{win}) of 0.48 was considered, reflecting average offshore wind speeds exceeding 9 m/s at hub height in the Caribbean offshore zone, as reported by recent resource assessment studies [3].

System energy losses were modelled using a multiplicative loss-factor approach consistent with the IEC 61724 methodology [20]. Common losses considered for both solar and wind technologies include submarine export cables, collectors, AC-DC power conversion, and equipment availability. Additional solar-specific losses included PV inverter inefficiencies and soiling effects associated with Caribbean coastal conditions. The aggregate net loss factors for solar (L_{sol}) and wind (L_{win}) were calculated as:

$$L_{sol} = 1 - \prod (1 - l_i), i \in \{ \textit{cable, substation, AC-DC, inverter, soiling, availability} \} \quad (2)$$

$$L_{win} = 1 - \prod (1 - l_i), i \in \{ \textit{cable, substation, AC-DC, availability} \} \quad (3)$$

resulting in aggregate losses of approximately 8.5% for solar systems and 6.5% for offshore wind systems. The net annual electricity generation of each technology is was estimated as:

$$E_s = MW_s \times CF_{sol} \times 8{,}760 \times (1 - L_{sol}) \quad (4)$$

$$E_w = MW_w \times CF_{win} \times 8{,}760 \times (1 - L_{win}) \quad (5)$$

where MW_s and MW_w correspond to the installed solar and wind capacities (MW), respectively, and 8,760 represents the number of hours in one year.

C. Installed Capacity Optimization

Three generation scenarios were defined to explore the solution space: (i) 100% solar PV, (ii) 100% offshore wind, and (iii) a hybrid mix (34% solar / 66% wind). For each scenario, the minimum total installed capacity ($MW_t = MW_s + MW_w$) that satisfies the net energy constraint is determined through an iterative search:

$$E_s(MW_t \cdot f_{sol}) + E_w\big(MW_t \cdot (1 - F_{sol})\big) \geq E_{total} - \varepsilon \quad (6)$$

where f_{sol} is the solar fraction and ε = 5 GWh/year is a feasibility tolerance. The optimization routine increases MW_t in 5 MW increments over the range 100–8,000 MW until Eq. (6) is satisfied. The hybrid fraction ($f_{sol} = 0.34$) was selected to minimize total installed capacity while maintaining balanced seasonal generation profiles.

Once the generation capacities are determined, the energy allocation is as follows: a fixed volume E_{H_2} is directed to the electrolyzer, and the remainder E_r is delivered to the grid:

$$E_r = min(E_{net} - E_{H_2}, E_{grid}) \quad (7)$$

D. Electrolyzer Sizing

Alkaline water electrolysis (AWE) was selected over proton exchange membrane (PEM) electrolysis as the reference technology, due to its higher commercial maturity, lower capital cost (~$350–500/kW for the stack versus $500–700/kW for PEM), longer stack lifetime (>100,000 h versus ~80,000 h), and compatibility with deionized rather than ultra-pure water [10], [11]. However, AWE exhibits a higher minimum load threshold (~20–25% versus ~5% for PEM), limiting its effective capacity factor when coupled with variable renewable sources.

An effective electrolyzer capacity factor of CF_elec = 0.68 was adopted as a conservative central value (range: 0.65–0.72) consistent with AWE operation under variable renewable profiles [10], [14]. The required electrolyzer rated power is:

$$MW_{elec} = E_{H_2}\,[GWh/year\,] \times 1{,}000 \,/\, (CF_{elec} \times 8{,}760) \quad (8)$$

This configuration requires approximately 284 MW of installed electrolyzer capacity, which is approximately 28 MW higher than that required for a PEM system operating at CF=0.75, representing the capacity penalty associated with AWE's lower operational flexibility.

E. Physical and Territorial Dimensioning

The land area required for the solar PV park was estimated in terms of the number of bifacial panels (550 Wp each) and a row-spacing factor of 1.20, accounting for access roads and inter-row clearance:

$$A_{sol}[ha] = \left(MW_s \times \frac{10^6}{550}\right) \times 2{,}2\ m^2 \times \frac{1{,}20}{10000} \quad (9)$$

Land acquisition for the solar PV facility was modelled as a direct capital expenditure at $2,500 USD/ha, reflecting

commercial rural land prices in the northern Guajira coastal zone [15]. Annual property tax was computed at 4% of the cadastral value, which corresponds to 60% of the commercial value [19].

The offshore wind farm footprint was derived using a 6D × 6D turbine spacing convention (D = 160 m rotor diameter, 5 MW turbines), equivalent to 180 ha/turbine:

$$A_{win}[ha] = \left(\frac{MW_w}{5MW}\right) \times 180 \quad (10)$$

The maritime concession area was modelled as an annual OPEX item at $1,500 USD/km²/year, calibrated to early-stage regulatory conditions in Colombia and referenced against international benchmarks (UK Crown Estate, US BOEM) with a 70–80% discount factor for market immaturity [16], [17].

F. Capital Expenditure (CAPEX) Estimation

CAPEX was estimated through a bottom-up, component-level approach, using component-level cost estimates obtained from published databases and industry references. Engineering, procurement, and construction (EPC) fees were applied at 12% for solar, 15% for offshore wind, and 15% for the hydrogen plant, following standard project finance conventions [22]. An 8% contingency factor was uniformly applied across all subsystems [22].

The total capital cost of the generation assets (C_g) is the sum of solar, wind, and shared infrastructure costs. The total project CAPEX (C_T) additionally includes the hydrogen plant:

$$C_T = C_{sol} + C_{win} + C_{infra} + C_{H_2} \quad (11)$$

Shared infrastructure includes an onshore grid connection substation ($80,000 USD/MW [9]) and a centralized SCADA and cybersecurity system ($5 M fixed). CAPEX disbursement over the four-year construction period follows the schedule: 10% (year 0), 30% (year 1), 35% (year 2), and 25% (year 3), reflecting procurement lead times for wind turbines and electrolysis stacks in year 0, and commissioning activities in years 2–3.

G. Operating Expenditure (OPEX) Estimation

Annual operating costs are structured as fixed and variable items. All OPEX figures correspond to the first operating year and are escalated at 2.0% throughout the 30-year operational period to account for inflation and contractual adjustments:

$$OPEX_t = OPEX_1 \times (1 + r_{esc})\text{^}(t-1) \quad (12)$$

where $r_{esc} = 0.02$ is the escalation rate and t is the operating year index. A major maintenance event replacement of the alkaline electrode assembly is scheduled once in year 17 of operation. This timing corresponds to the expected stack life of ~100,000 equivalent hours at $CF_{elec} = 0.68$ (approximately 5,957 h/year) and represents 40% of the original stack cost [2], [11]. This compares favorably with PEM technology, which would require two full membrane replacements (at years 12 and 24) at a higher unit cost.

H. Financial Model

Three financing structures were evaluated to estimate the weighted average cost of capital (WACC), incorporating Colombia's corporate tax rate (35%). The cost of equity was estimated using a country risk-adjusted CAPM approach, considering a risk-free rate of 4.2%, an equity risk premium of 5.5%, and a country risk premium of 2.0%. The resulting WACC values range from 7.7% to 14%, with the 50/50 debt-equity structure adopted as the reference scenario.

A deterministic discounted cash flow (DCF) model was developed over a 34-year horizon (4 years of construction and 30 years of operation). Annual cash flows include revenues from hydrogen and electricity sales, offset by CAPEX, OPEX, and stack replacement costs. Hydrogen production was assumed to decrease at an annual degradation rate of 0.5%. Reference prices of 4.50 USD/kg for hydrogen and 65 USD/MWh for electricity were assumed. Project performance is evaluated using net present value (NPV) and internal rate of return (IRR).

I. Levelized Cost Metrics

- *Levelized Cost of Electricity (LCOE)*
  The LCOE of the generation portfolio was estimated using a discounted cash flow approach over the 30-year operational period, incorporating CAPEX disbursement, O&M cost escalation, and solar generation degradation. It is defined as:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{n} \frac{C_{cap,t} + C_{O\&M,t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_{net,t}}{(1+r)^t}} \quad (13)$$

  where $C_{cap,t}$ represents capital expenditures (mainly during construction), $C_{O\&M,t}$ corresponds to escalated operational costs, $E_{net,t}$ is the annual net electricity generation (including solar degradation and constant wind output), and r is the WACC. This formulation captures both the temporal distribution of costs and long-term performance degradation effects.

- *Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)*
  The LCOH was calculated by combining the annualized CAPEX of the hydrogen plant with operating costs and the electricity required for electrolysis, valued according to the system-level LCOE:

$$LCOH = \frac{C_{H_2} \cdot CRF + OPEX_{H_2} + OPEX_{water} + LCOE \cdot E_{H_2}}{Q_{H_2}} \quad (14)$$

  where CRF is the capital recovery factor:

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (15)$$

  and Q_{H_2} is the annual hydrogen production. This approach ensures consistency between electricity

generation and hydrogen production costs, avoiding double counting of shared infrastructure. The resulting LCOH values range from 3.2 to 7.2 USD/kg depending on the generation mix and financial assumptions.

J. *Sensivity analysis*

The sensitivity analysis evaluates the impact of the two market variables with the highest uncertainty over the 2030–2035 horizon: the selling price of green hydrogen (P_{H_2}, \$2.50–\$6.00 USD/kg) and the electricity market price in the Colombian Caribbean region (P_{elec}, \$40–\$100 USD/MWh). Each variable was evaluated independently while maintaining the other at its baseline value (\$4.50 USD/kg for hydrogen and \$65 USD/MWh for electricity).

The analysis was performed across nine scenarios obtained by combining three generation configurations (Solar PV, Offshore Wind, and 34/66 Hybrid Mix) with three financing structures characterized by different weighted average cost of capital (WACC) values: WACC A (14.00%), WACC B (8.67%), and WACC C (8.44%). Project performance was assessed using Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR).

Because IRR depends solely on project cash flows, it remains independent of the discount rate and its therefore unique for each generation configuration. In contrast, NPV varies with the selected WACC, reflecting the effect of discounting on future cash flows.

III. Results and Discussion

This section presents and discusses the results of the techno-economic pre-feasibility assessment for the three generation scenarios evaluated (100% solar PV, 100% offshore wind, and hybrid mix) under three financing structures (Scenarios A–C). The results are organized according to the methodological sequence: (i) energy balance and physical dimensioning, (ii) capital and operating expenditures, (iii) levelized costs (LCOE and LCOH), (iv) financial performance indicators, and (v) sensitivity analysis. The findings are further contextualized within the current international green hydrogen cost landscape, with implications for energy policy and infrastructure development in the Colombian Caribbean region.

A. *Energy Balance and physical dimensioning*

All evaluated scenarios satisfy the system energy requirement of approximately 2,769 GWh/year, corresponding to 1,622 GWh/year for hydrogen production and 1,147 GWh/year for electricity injection into de Caribbean regional grid, equivalent to 5.0% of the region's annual electricity demand [8]. The required AWE electrolyzer capacity remains constant at 272.3 MW across all scenarios, as it is determined by the fixed hydrogen production target of 30 kt H_2/year and the effective electrolyzer capacity factor ($CF_{elec} = 0.68$), corresponding to approximately 5,957 equivalent operating hours per year.

TABLE II INSTALLED CAPACITY, ENERGY BALANCE, AND TERRITORIAL FOOTPRINT BY GENERATION SCENARIO.

Parameter	100% Solar	100% Wind	Hybrid Mix	Common
Installed generation capacity (MW)	1,450	700	850	—
AWE electrolyzer capacity (MW)	—	—	—	272.3
Net generation, Enet (GWh/yr)	2,767	2,768	2,770	—
Energy to H_2 / to grid (GWh/yr)	1,622 / 1,145	1,622 / 1,146	1,622 / 1,147	—
Territorial footprint	696 ha	252 km²	139 ha + 202 km²	—

The 100% solar PV scenario requires the largest installed generation capacity (1,450 MW) due to its lower capacity factor (CF=0.24); however, it demands substantially less territory than the offshore wind configuration, requiring 696 ha of onshore land compared to 252 km² of maritime concession area. The solar facility occupies only 0.3% of the total area of La Guajira, without significant competition with agricultural or protected land uses.

In contrast, offshore wind deployment introduces more complex maritime governance and regulatory challenges, particularly considering Colombia's still-developing offshore energy framework [ANH-2023]. The effective AWE capacity factor of 0.68 indicates that approximately 32% of potential operating time is constrained by renewable intermittency and minimum-load operating requirements (20–25%). Under PEM electrolysis (CF=0.75), the same hydrogen production target would require only 256 MW of installed electrolyzer capacity, although at substantially higher stack costs (500–700 USD/kW compared to 350–500 USD/kW for AWE) [2], [11].

Figure 1 presents the Sankey diagram corresponding to the Hybrid Mix configuration (34% solar PV / 66% offshore wind) at the 30 kt H_2/year production scale. The system generates 2,959 GWh/year of gross electricity, of which 608.9 GWh/year originate from solar PV and 2,350.1 GWh/year from offshore wind generation. Approximately 196.8 GWh/year (6.7%) are lost through transmission and conversion processes, including cable, substation, AC–DC conversion, inverter, soiling, and availability losses.

The resulting net electricity generation (2,762.2 GWh/year) is distributed between hydrogen production (1,682.5 GWh/year, 60.9%) and electricity injection into the Caribbean regional grid (1,079.7 GWh/year, 39.1%), covering approximately 4.7% of the annual demand of the interconnected Caribbean system [8]. Within the hydrogen production pathway, electricity consumption is primarily associated with the alkaline electrolysis stack (1,500 GWh/year), hydrogen compression (120 GWh/year), and auxiliary system loads (62.5 GWh/year).

Approximately 1,000 GWh/year are ultimately retained as chemical energy in the hydrogen product (LHV basis), while the remaining energy is dissipated as process heat, consistent with the expected electrochemical efficiency of alkaline electrolysis (~67% LHV) under the operating conditions considered [2], [11]. These results highlight that only 33.8% of gross renewable electricity generation is ultimately stored as

recoverable chemical energy in hydrogen, emphasizing the critical importance of electrolyzer efficiency and system loss minimization for reducing LCOH.

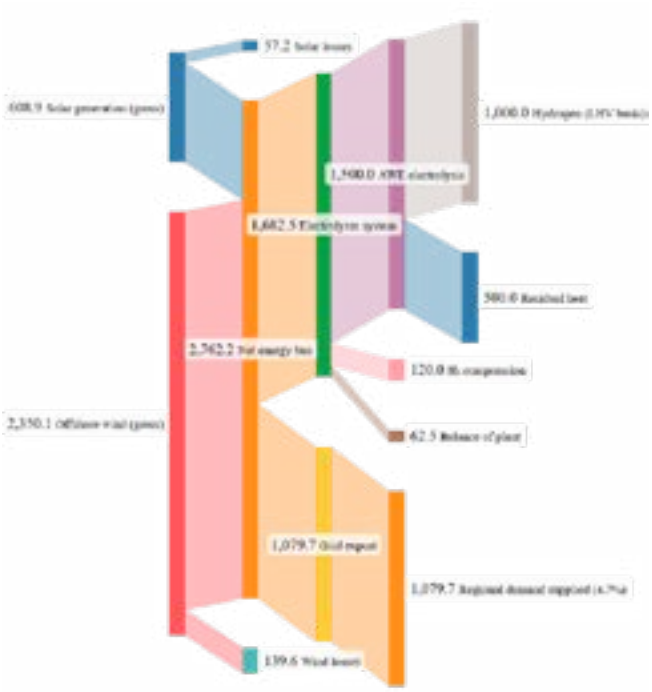


Figure 1 Sankey Diagram — Hybrid Plant Energy Flow [GW] at Design Capacity
30,000 t H₂/yr (LHV basis) | 4.7% Caribbean regional demand supplied

B. Capex Expenditure (CAPEX)

Total project CAPEX ranges from 1,133.7 M USD for the 100% solar PV scenario to 2,391.9 M USD for the 100% offshore wind configuration, representing a 2.1-fold increase primarily driven by the substantially higher unit cost of offshore wind generation (~2,835 USD/kW compared to ~460 USD/kW for solar PV). The hybrid configuration requires 2,142.6 M USD, only 10.4% below the all-wind scenario because of the dominant contribution of offshore wind capacity to the generation portfolio.

The AWE electrolyzer plant represents a constant investment of 346.3 M USD across all scenarios, corresponding to approximately 14.5–16.2% of total project CAPEX. A major electrode replacement event is scheduled in year 17 at an estimated cost of 46.8 M USD, equivalent to 40% of the original stack cost and consistent with the expected AWE operational lifetime of approximately 100,000 equivalent operating hours.

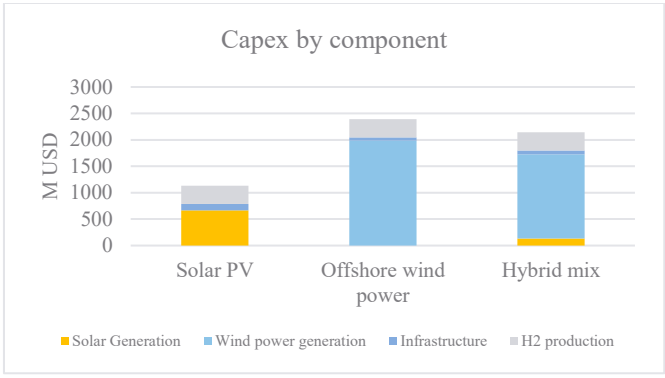


Figure 2 Breakdown of total capital expenditures by component for the three generation scenarios

C. Levelized Costs (LCOE and LCOH)

Under the reference financing structure (WACC C = 8.44%), the 100% solar PV scenario achieves an LCOE of 35.11 USD/MWh, compared to 95.01 USD/MWh for the offshore wind configuration, representing a difference of approximately 2.7 times. The solar PV result is consistent with the lower range of current global utility-scale solar benchmarks reported by International Renewable Energy Agency for high-irradiation regions (30–50 USD/MWh) [IRENA-2023].

The effect of financing conditions on LCOE is particularly pronounced for offshore wind and hybrid configurations. For the hybrid scenario, reducing the WACC from Scenario A to Scenario C decreases the LCOE by 32.7% (124.21 → 83.50 USD/MWh), highlighting the critical importance of concessional or blended financing mechanisms for capital-intensive offshore renewable energy projects.

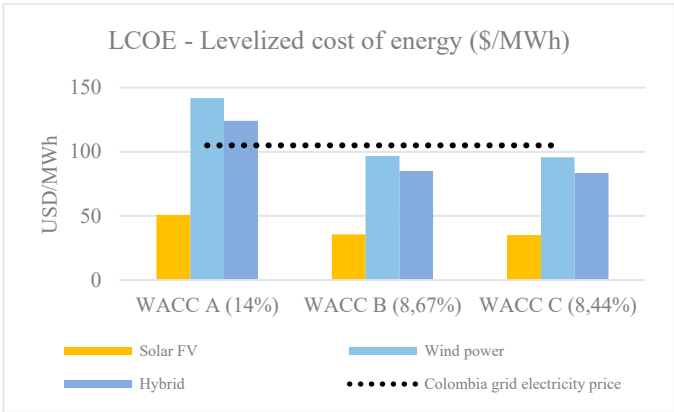


Figure 3 LCOE by scenario

The resulting LCOH values range from 3.22 to 9.57 USD/kg across all scenario–WACC combinations. The solar PV configuration under WACC C achieves the lowest LCOH (3.22 USD/kg), positioning it within the lower bound of the current global green hydrogen cost range reported by IRENA (3.0–8.0 USD/kg) [1]. This value is comparable to projections reported for high-resource regions such as Chile's Atacama Desert and the Middle East.

Electricity cost constitutes the dominant component of hydrogen production cost, accounting for 62.4% of total LCOH

in the solar scenario and 79.7% in the offshore wind scenario. This result confirms that renewable electricity generation costs exert a substantially greater influence on LCOH than electrolyzer CAPEX or operating expenditures.

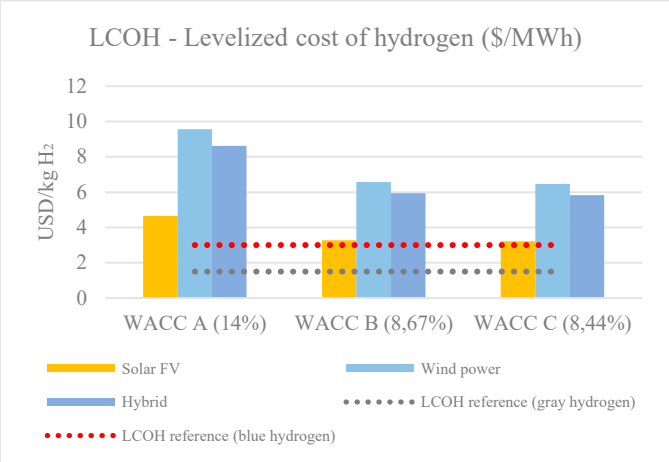


Figure 4 LCOH by scenario

D. *Breakdown of total capital expenditures by component for the three generation scenarios*

Project viability was assessed by comparing the internal rate of return (IRR) with the corresponding weighted average cost of capital (WACC). Positive NPVs are obtained only when the IRR exceeds the financing threshold. Since IRR depends exclusively on project cash flows, it remains constant for each generation configuration, whereas NPV varies according to the selected WACC.

Figure 5 summarizes one of the study's main findings: among the nine evaluated scenario–financing combinations, only two yield positive NPVs, both corresponding to the Solar PV configuration under debt-based financing structures (WACC B and C). In contrast, offshore wind and hybrid configurations produce strongly negative NPVs (−780 M USD to −1,322 M USD), indicating structural economic non-viability under current market conditions.

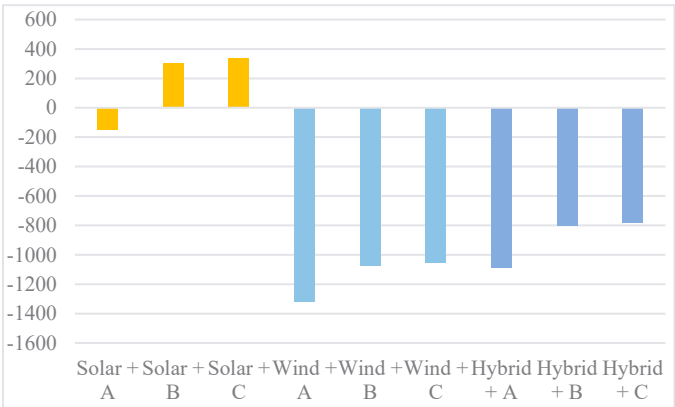


Figure 5 NPV (in millions of USD) for the nine combinations of scenario × capital structure.

The Solar PV scenario under WACC A (100% equity financing, 14%) produces a marginally negative NPV (−150 M USD), with an IRR of 11.69% approaching, but not exceeding, the required return threshold. This scenario could become economically viable through moderate increases in hydrogen selling price (~0.20 USD/kg) or modest reductions in solar CAPEX (~5%), both of which are achievable through engineering optimization and supply-chain maturation.

The Solar PV + WACC C configuration represents the best case, achieving an NPV of +334.5 M USD, an IRR of 11.69%, and a payback period of approximately seven operational years. Consequently, this configuration emerges as the most promising candidate for further feasibility-stage development.

All offshore wind scenarios exhibit low profitability, with IRR values close to 2.23%, substantially below the evaluated WACC range (8.44–14%). Achieving competitiveness would require CAPEX reductions on the order of 50%, implying a significantly more mature offshore wind supply chain and regulatory framework than currently exists in Colombia.

Similarly, the hybrid configuration reaches an IRR of only 3.53%, remaining below all evaluated WACC thresholds. Although the incorporation of solar PV partially reduces total CAPEX relative to the fully offshore configuration, the dominant contribution of offshore wind capacity continues to compromise overall project profitability.

E. *Sensivity analysis*

- Solar PV Scenario
  The Solar PV configuration exhibits the most favorable economic response to hydrogen price variation. NPV increases linearly with hydrogen selling price, with an approximate slope of 127 M USD per additional 0.50 USD/kg, independent of the financing structure. The IRR increases from 6.47% at 2.50 USD/kg to 14.92% at 6.00 USD/kg, exceeding the WACC B and WACC C thresholds at approximately 3.10 USD/kg.
  At the reference hydrogen price (4.50 USD/kg), the project achieves positive NPVs of +304.3 M USD (WACC B) and +334.5 M USD (WACC C), confirming that access to debt financing is the key determinant of project viability. Under the 100% equity structure (WACC A), the project becomes viable only at hydrogen prices close to 6.00 USD/kg.

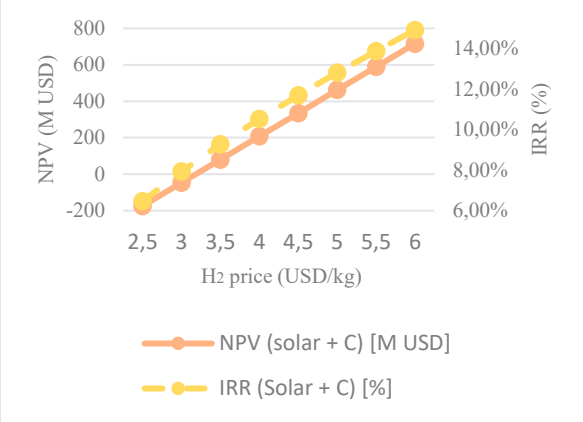


Figure 6 NPV and IRR sensivity analysis for H2 price variation

- Offshore Wind Scenario
  The offshore wind scenario exhibits the least favorable economic performance. Even at the highest evaluated hydrogen price (6.00 USD/kg), the maximum IRR reaches only 4.84%, remaining below all WACC thresholds. NPVs remain strongly negative across the entire price range, primarily because of the high offshore wind CAPEX.
  Trend extrapolation indicates that break-even conditions would require hydrogen prices above 10 USD/kg under WACC C and close to 14 USD/kg under WACC A, values substantially above projected market prices for the 2030–2040 horizon. These results indicate that the economic limitations of offshore wind are fundamentally structural and cannot be resolved solely through favorable hydrogen pricing conditions.

- Hybrid Mix Scenario
  The hybrid configuration exhibits intermediate performance between the solar PV and offshore wind cases. Although the inclusion of solar generation partially reduces total CAPEX relative to the fully offshore scenario, the dominant contribution of offshore wind capacity maintains investment costs at levels that prevent profitability under all evaluated financing conditions. Even at the most optimistic hydrogen price (6.00 USD/kg), the IRR remains below the minimum evaluated WACC threshold, confirming the structural economic limitations of the hybrid configuration.

IV. Conclusions

This study evaluated the techno-economic pre-feasibility of a 30 kt H_2/year green hydrogen production system in the Colombian Caribbean region under three renewable generation configurations (100% solar PV, 100% offshore wind, and a hybrid mix) and three financing structures within an alkaline water electrolysis (AWE) framework. The results demonstrate that green hydrogen production in the region is technically and economically feasible in the near term when based primarily on solar PV generation. The 100% solar scenario achieved the most competitive performance, with an LCOH of 3.22 USD/kg and a positive NPV of +334.5 M USD under blended financing conditions (WACC C = 8.44%), positioning the project within the lower range of current global green hydrogen costs. In contrast, offshore wind and hybrid configurations remained economically uncompetitive because of their substantially higher capital and operating costs, resulting in negative NPVs across all evaluated financing structures.

The analysis further highlights the decisive influence of financing conditions and system integration on project viability. Transitioning from full-equity financing to blended debt–equity structures significantly improves profitability, confirming the importance of concessional or blended financing mechanisms for first-of-a-kind hydrogen projects in emerging economies such as Colombia. In addition, the dual-output system configuration, combining hydrogen production with electricity injection into the Caribbean regional grid, provides an effective revenue diversification mechanism that enhances project bankability and reduces market risk during the early stages of hydrogen market development. Tthe results indicate that green hydrogen represents a credible near-term commercial opportunity for the Colombian Caribbean when supported by solar PV deployment, phased scaling strategies, appropriate financing structures, and coherent regulatory and policy frameworks.

V. Limitations and Future Work

This study is based on a deterministic techno-economic framework using fixed assumptions for CAPEX, OPEX, market prices, and renewable capacity factors. Consequently, the results should be interpreted as scenario-based estimates rather than probabilistic projections. In addition, the model relies on annual energy balances and constant hydrogen production, without high-resolution dispatch modelling, limiting the representation of renewable intermittency, curtailment effects, and dynamic electrolyzer operation. The analysis is also restricted to hydrogen production and electricity generation, excluding downstream value chains such as hydrogen transport, storage, and conversion into derivative products including ammonia and methanol. Potential revenues associated with carbon credits or avoided emissions were not considered, which may underestimate the overall project value.

Furthermore, social, environmental, and territorial dimensions were not explicitly incorporated into the current framework. Key aspects such as indigenous community engagement (e.g., the Wayuu population), marine and terrestrial environmental impacts, land-use conflicts, and long-term water sustainability remain outside the scope of this assessment despite their importance for project implementation in the Colombian Caribbean region. Future work should therefore focus on probabilistic and high-resolution energy modelling, full value-chain and market analysis, incorporation of technology learning curves, evaluation of financing and policy incentives, and integrated socio-environmental assessments to advance toward a fully bankable and context-appropriate green hydrogen project.

REFERENCES

[1] ProColombia, "Green Hydrogen," Invest in Colombia, Bogotá, Colombia, Jun. 2023. [Online]. Available: https://investincolombia.com.co/en/sectors/energy/hydrogen-power

[2] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Investment Opportunities for Utility-Scale Solar and Wind Areas: Colombia Zoning Assessment," Abu Dhabi, UAE, Jun. 2025.

[3] Ministerio de Minas y Energía, "Colombia Offshore Wind Roadmap," Bogotá, Colombia, 2023. [Online]. Available: https://www.minenergia.gov.co/documents/5859/Colombia_Offshore_Wind_Roadmap_VE_compressed.pdf

[4] Stockholm Environment Institute (SEI), "Solar, wind power and energy communities in Colombia," Stockholm, Sweden, Oct. 2025. [Online]. Available: https://www.sei.org/wp-content/uploads/2025/10/wind-solar-energy-colombia-2025-sei2025-046.pdf

[5] Ministerio de Minas y Energía, "Colombia's Hydrogen Roadmap," Bogotá, Colombia, Oct. 2021. [Online]. Available: https://www.minenergia.gov.co/documents/5862/Colombias_Hydrogen_Roadmap_2810.pdf

[6] Departamento Nacional de Planeación (DNP), "Borrador CONPES Política Nacional Hidrógeno," Bogotá, Colombia, Nov. 2025.

[7] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Atlas de Viento y Energía Solar de Colombia, Bogotá, Colombia, 2005. [Online]. Available: http://www.ideam.gov.co

[8] XM S.A. E.S.P., Informe Anual de Demanda del Sistema Interconectado Nacional 2024, Medellín, Colombia, 2024.

[9] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Proyección de Demanda de Energía Eléctrica 2024–2038, Bogotá, Colombia, 2024.

[10] International Renewable Energy Agency (IRENA), Green Hydrogen for Industry: A Guide to Policy Making — 2023 Update, Abu Dhabi, UAE, 2023.

[11] NEL Hydrogen, Atmospheric Alkaline Electrolyser — A Series: Product Datasheet 2024, Oslo, Norway, 2024. [Online]. Available: https://nelhydrogen.com/product/atmospheric-alkaline-electrolyser-a-series

[12] National Renewable Energy Laboratory (NREL), Annual Technology Baseline (ATB) 2024, Golden, CO, USA, 2024. [Online]. Available: https://atb.nrel.gov

[13] BloombergNEF, Offshore Wind Market Outlook — H1 2024, New York, NY, USA, 2024.

[14] DNV, Energy Transition Outlook 2023: A Global and Regional Forecast to 2050, Høvik, Norway, 2023. [Online]. Available: https://www.dnv.com/energy-transition-outlook

[15] Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Avalúos Comerciales de Predios Rurales — Departamento de La Guajira, Bogotá, Colombia, 2024.

[16] Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), Marco Regulatorio para Áreas Marinas y Concesiones Offshore en Colombia, Bogotá, Colombia, 2023.

[17] Dirección General Marítima (DIMAR), Resolución 097-2020: Régimen de Concesiones de Áreas Marinas para Proyectos de Energía Renovable, Bogotá, Colombia, 2020.

[18] Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN), Estatuto Tributario Nacional — Tasa de Impuesto Corporativo 2024, Bogotá, Colombia, 2024.

[19] Congreso de Colombia, Ley 44 de 1990: Régimen del Impuesto Predial Unificado, Bogotá, Colombia, 1990.

[20] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 61724-1:2021 — Photovoltaic System Performance — Part 1: Monitoring, Geneva, Switzerland, 2021.

[21] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 61215-1:2021 — Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules — Design Qualification and Type Approval, Geneva, Switzerland, 2021.

[22] International Finance Corporation (IFC), IFC Blended Finance — Project Finance Standards and EPC Fee Guidelines, Washington, DC, USA, 2023. [Online]. Available: https://www.ifc.org

[23] J. F. Restrepo et al., "Techno-economic calculation of green hydrogen production and export from Colombia," Int. J. Hydrogen Energy, vol. 48, no. 15, pp. 5892–5906, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.234.

Sistema Inteligente de Control de Tráfico Mediante Semáforo Automatizado con IA

Jose Luis Mayoral Berdugo
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
jlmayoral@unibarranquilla.edu.co

Karla Patricia Hernández Cruz
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
karlaphernandez@unibarranquilla.edu.co

Roger Hurtado
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
ralbertohurtado@unibarranquilla.edu.co

Luz E. Marquez
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
lmarquez@unibarranquilla.edu.co

Lourdes De Avila
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
ldeavila@unibarranquilla.edu.co

Resumen— Este artículo describe el desarrollo de una infraestructura vial activa diseñada para mitigar dos problemáticas críticas en entornos urbanos: la vulneración del espacio peatonal y la ineficiencia de los canales de reporte de emergencias en vía pública. El sistema propone un cambio de paradigma en la seguridad vial al integrar sensores Lidar y cámaras con Inteligencia Artificial (IA) para detectar la invasión de pasos de cebra en tiempo real. A diferencia de los métodos de fotomultas tradicionales, esta solución aplica una "penitencia lógica" mediante la reprogramación dinámica del ciclo semafórico, prolongando la fase roja para el infractor para reponer el tiempo de cruce del peatón. Paralelamente, el semáforo actúa como un nodo de seguridad mediante una botonera de emergencia tripartita. Los resultados demuestran una mejora en la respuesta ciudadana ante incidentes y un alto potencial pedagógico al vincular la infracción con una consecuencia conductual inmediata.

Palabras clave—Internet de las Cosas, ESP32, kit didáctico, sistemas embebidos, aprendizaje práctico.

I. INTRODUCCIÓN

En las urbes contemporáneas, la intersección vial representa el punto de mayor vulnerabilidad para el peatón. La problemática central abordada es doble: por un lado, la impunidad conductual de los conductores que invaden el paso de cebra durante la fase roja, anulando el derecho al tránsito seguro; por otro lado, la asimetría de información en emergencias, donde el ciudadano depende de llamadas telefónicas que carecen de geolocalización precisa y consumen tiempo crítico.

Este proyecto se justifica en la necesidad de transitar de una semaforización pasiva a una infraestructura urbana reactiva. Se plantea que la sanción económica diferida es insuficiente para modificar hábitos; por ello, se propone una consecuencia inmediata basada en la reparación del daño: quien sustrae tiempo al peatón, debe reponerlo mediante una espera forzada.

II. FUNDAMENTACIÓN Y TRABAJOS RELACIONADOS

El proyecto se fundamenta en diversos conceptos clave que sustentan su desarrollo desde un enfoque tecnológico y aplicado.

A. Sistemas Embebidos y Microcontroladores

Los sistemas embebidos constituyen el núcleo de procesamiento de la solución. Estos dispositivos electrónicos programables están diseñados para ejecutar tareas específicas de manera eficiente y con restricciones de tiempo real [1]. En este proyecto, se emplean microcontroladores de las familias ESP32 y ESP8266 [2], seleccionados por su equilibrio entre capacidad de procesamiento, bajo consumo energético y conectividad integrada.

B. Internet de las Cosas (IoT) y Protocolos de Comunicación

El paradigma del Internet de las Cosas (IoT) permite la interconexión de objetos físicos a través de redes inalámbricas, facilitando un intercambio de datos constante [3]. La arquitectura implementada utiliza tecnología WiFi y protocolos de transporte ligeros como UDP (*User Datagram Protocol*), los cuales minimizan el encabezado de los paquetes y posibilitan una transmisión de información ágil, ideal para entornos donde la velocidad de respuesta es crítica.

C. Monitoreo en Tiempo Real y WebSockets

El monitoreo en tiempo real se define como la capacidad de supervisar eventos y variables del sistema de forma

continua mediante interfaces dinámicas. Para garantizar una comunicación bidireccional y de baja latencia, se incorpora el protocolo WebSocket [4]. A diferencia del modelo HTTP tradicional, WebSocket mantiene una conexión persistente que permite el flujo de datos instantáneo desde el hardware hacia la interfaz de usuario sin necesidad de peticiones recurrentes.

D. Visión por Computador para Seguridad Vial

De forma prospectiva, el sistema incorpora fundamentos de visión por computador para el procesamiento automático de imágenes. Esta disciplina se orienta al análisis visual mediante algoritmos que permiten la detección avanzada de eventos viales [5]. En el contexto de este proyecto, la visión artificial se proyecta como la herramienta clave para la identificación de infracciones y el reconocimiento de caracteres en placas vehiculares.

La articulación de estas bases teóricas permite estructurar una solución integral en el marco de las ciudades inteligentes (*Smart Cities*), promoviendo la seguridad vial mediante el despliegue de tecnologías emergentes de alta disponibilidad.

E. Detección Basada en Edge AI y Disuasión Inmediata

El estado del arte en sistemas de fotodetección se ha centrado tradicionalmente en el recaudo administrativo diferido. Sin embargo, investigaciones recientes sugieren que la respuesta visual y auditiva en tiempo real constituye un disuasor más efectivo para modificar la conducta del infractor en el acto [6]. Este proyecto expande dicho concepto mediante la implementación de Edge AI, integrando algoritmos de reconocimiento óptico de caracteres (OCR) embebidos que permiten la exhibición pública de la placa vehicular de forma instantánea.

F. Control Semafórico Adaptativo y Penitencia Lógica

La teoría del control semafórico adaptativo, usualmente orientada a la optimización del flujo vehicular, se reorienta en este trabajo hacia un propósito correctivo-pedagógico. Se introduce el principio de "penitencia lógica", donde la consecuencia de la infracción está directamente vinculada a la reparación del daño causado. Bajo este esquema, el sistema reprograma dinámicamente el controlador para ejecutar una extensión de la fase roja, proporcional al tiempo de seguridad sustraído al peatón.

G. Mobiliario Urbano Interactivo y Metodología Affordance

El diseño del poste semafórico como nodo de seguridad se fundamenta en la metodología de Affordance, la cual establece que las propiedades físicas de un objeto deben sugerir su funcionamiento de manera intuitiva [7]. Bajo este principio, se integran pulsadores con una semántica visual y táctil clara que minimiza la carga cognitiva del usuario en situaciones de alto estrés, transformando la infraestructura vial en un punto SOS hiperlocalizado de alta disponibilidad.

III. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló bajo un enfoque aplicado y experimental. Aplicado porque busca resolver una necesidad educativa concreta mediante una herramienta funcional; experimental porque el proceso se construyó a partir de pruebas, errores, ajustes y validaciones prácticas con componentes reales.

El desarrollo se estructuró en cuatro fases técnicas:

Fase 1: Integración de Hardware y Visión Artificial:

Se utilizó un sensor Lidar de corto alcance para definir la zona de exclusión peatonal. Ante una inva-sión, una cámara IP con procesamiento de borde captura la placa. Para garantizar la ética y protec-ción de datos, el sistema procesa la información de forma efímera para la visualización pública, sin al-macenar registros biométricos del conductor, cum-pliendo con marcos normativos de privacidad.

Fase 2: Firmware de Control y Gestión de Congestión:

Se programó una máquina de estados finitos en un PLC. Para evitar el colapso vial, el algoritmo incluye un límite de saturación: si el tráfico circundante excede un umbral crítico, la penalización se modula para no afectar la movilidad general de la intersección.

Fase 3: Nodo de Auxilio Ciudadano:

Se diseñó un módulo estanco con tres categorías de alerta: Accidente, Atraco y Emergencia Médica. Cada botón cuenta con realimentación háptica y sistema Braille para asegurar la accesibilidad universal. La confirmación de pulsación (1.5s) actúa como filtro para reducir falsos positivos.

Fase 4: Validación y Pruebas de Robustez:

Se realizaron pruebas piloto evaluando la precisión del sensor bajo condiciones climáticas adversas y la latencia de las alertas de emergencia.

IV. RESULTADOS

Una vez consolidada la integración de los subsistemas de hardware y software, se procedió a realizar una serie de pruebas experimentales y ensayos de campo con los dispositivos que integran el prototipo. Estas evaluaciones se estructuraron de manera incremental, iniciando con pruebas de banco para verificar la continuidad y el tiempo de respuesta de los microcontroladores y sensores, seguidas de simulaciones en entorno real para validar la robustez de los algoritmos de detección y la eficacia de los mecanismos de respuesta. Los resultados obtenidos permiten evidenciar el comportamiento del sistema bajo condiciones operativas diversas, proporcionando una base cuantitativa para evaluar el cumplimiento de los objetivos técnicos y funcionales planteados en este trabajo.

A. Eficacia de la Detección y Sanción:

El sistema alcanzó una precisión superior al 90% en la identificación de placas en condiciones óptimas. Se observó que la visualización pública de la placa genera un efecto de "escrutinio social" que motiva al conductor a retroceder de inmediato.

B. Impacto en la Concienciación:

La espera forzada de 25-30 segundos adicionales fue percibida por los sujetos de prueba como un disuasor más significativo que la expectativa de una multa económica futura, validando la hipótesis de que la sanción contextualizada altera la percepción de "rentabilidad" de la infracción.

C. Optimización de Respuesta a Emergencias:

La transmisión del paquete de datos (ID de poste, ubicación GPS y tipo de alerta) se completó en un promedio de 2 segundos, superando ampliamente los tiempos de respuesta de una llamada al 123/911.

V. CONCLUSIONES

El proyecto demuestra que es técnicamente viable y socialmente deseable transformar el semáforo en un instrumento de justicia vial. La integración de la penitencia lógica ataca la raíz del comportamiento imprudente al eliminar la ganancia de tiempo que motiva la infracción. Finalmente, la evolución del semáforo hacia un nodo de seguridad ciudadana empodera al peatón y refuerza el tejido social, demostrando que las Smart Cities deben priorizar la protección de la vida y el respeto mutuo sobre la fluidez vehicular.

REFERENCIAS

[1] P. Marwedel, Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems, 3rd ed. Dortmund, Germany: Springer, 2018.

[2] J. L. Ortiz Arciniega, F. X. Valencia Barahona, and C. P. Bosmediano Cárdenas, "Manual básico para estudiantes: ESP32," Material didáctico, n.d.

[3] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," Computer Networks, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, Oct. 2010.

[4] V. Pimentel and B. Nickerson, "Communicating and displaying real-time data with WebSocket," IEEE Internet Computing, vol. 16, no. 4, pp. 45–53, Jul.-Aug. 2012.

[5] R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications. Washington, DC, USA: Springer, 2010.

[6] J. Smith and R. Kumar, "Real-time Red-Light Running Detection and Deterrence Using Edge AI," en Proc. Int. Conf. on Smart Cities and Vehicle Tech. (ICSV), 2022, pp. 112–119.

[7] D. A. Norman, The Design of Everyday Things: Revised and Expanded Edition. New York, NY, USA: Basic Books, 2013.

[8] Congreso de la República de Colombia, "Ley 1581 de 2012: Por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales," Oct. 2012. [En línea]. Disponible en: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1581_2012.html

Design and Construction of a Computer Numerical Control Machine for Rapid Prototyping of Printed Circuit Boards

Maria José Turriago Montoya
Faculty of Technology Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
maria.turriago@utp.edu.co

Cristian David Vargas Valencia
Faculty of Technology Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
c.vargas1@utp.edu.co

***Abstract*—Printed circuit board (PCB) fabrication is a critical stage in electronic system development, yet educational institutions with limited resources face barriers to rapid prototyping technologies. Traditional methods such as photochemical etching offer low precision and environmental risks, while industrial CNC solutions remain costly and complex. This paper proposes the design and implementation of a low-cost CNC machine for PCB fabrication in academic contexts, relying on open-source platforms and affordable components. Beyond technical implementation, the work provides a replicable methodology and clear documentation, aiming to strengthen technical education, foster innovation, and build local capabilities in electronic manufacturing.**

***Keywords*—CNC, PCB, manufacturing, proto-type, STEM.**

I. INTRODUCTION

The fabrication of PCB is a critical stage in the development of electronic systems, as it materializes the design and allows for the functional validation of prototypes. In the educational sphere, this process is fundamental for consolidating engineering competencies; however, its effective implementation is limited by economic, technical, and operational barriers. Industrial solutions based on CNC machines offer high levels of precision, but their cost and complexity restrict their adoption in institutions with limited resources [1].

In contrast, traditional PCB fabrication methods, such as photoetching or ironing, continue to be widely used due to their low initial cost. However, these methods present significant limitations in terms of precision, repeatability, and process control, and they also involve risks associated with the use of chemical substances [2], which compromises the quality of the educational process and restricts rapid iteration in electronic design. Although there are proposals for low-cost CNC machines based on open-source hardware and software, the literature reveals recurring deficiencies in system integration, process implementation standardization, and availability of user-oriented technical documentation, which limits their effective adoption in education [3].

In this context, this work presents the design and implementation of a low-cost CNC machine for rapid PCB prototyping, specifically oriented toward implementation in educational institutions. The proposal integrates an accessible architecture based on open platforms, together with a methodological approach that covers design, implementation, calibration, and experimental validation of the system. As a main contribution, it offers a solution that balances cost, precision, and ease of implementation, complemented by a replicable technical guide that addresses the limitations identified in previous work and is grounded in the demonstrated potential of these technologies in engineering education [4].

This paper is also directly connected to the Sustainable Development Goals (SDGs), specifically SDG 4: Quality Education and SDG 9: Industry, Innovation, and Infrastructure. On the one hand, the proposal contributes to SDG

4 [5] by providing a pedagogical alternative that expands access to rapid prototyping technologies, strengthening practical competencies among students in institutions with limited resources and promoting a more inclusive and equitable technical education. On the other hand, it aligns with SDG
9 [6] by fostering innovation through the use of open-source and low-cost platforms, enhancing local capabilities in electronic manufacturing, and generating accessible technological infrastructure for educational environments. In this way, this work not only addresses immediate academic needs but also situates itself within a global agenda oriented toward sustainability and inclusive technological development.

The paper is organized sequentially to provide a clear understanding of the entire process. First, the theoretical framework is presented, contextualizing the evolution of CNC machines and their application in PCB fabrication. Next, the design and implementation phase is described, including the selection of electronic and mechanical components, CAD modeling, validation testing, and selection and use of open-source software tools (KiCad, FlatCAM, and UGS) are discussed, outlining the digital workflow for prototyping. Finally, the analysis and results are presented, together with the conclusions, which address the educational and technical impacts of the work, as well as its limitations and future prospects. In this way, the paper offers a coherent and progressive narrative that connects theory, design, validation, and discussion, ensuring replicability and academic relevance.

II. THEORETICAL FRAMEWORK

The CNC machines are computer-controlled automated systems designed to perform coordinated movements along one or more axes of motion. They represent one of the most comprehensive technologies for performing machining processes such as milling, drilling, and cutting, thanks to their ability to reproduce defined paths with a high degree of precision [7]. The operation of a CNC machine is based on following coded instructions, commonly expressed in G-code, which describe the sequential movement of the machine's axes. These instructions are generated from models developed in CAD software, which are then processed by CAM software responsible for defining the machining paths. Finally, the resulting code is sent to the CNC machine via communication interfaces such as UGS.

CNC machines emerged in the 1950s as an evolution of conventional Numerical Control (NC), enabling the automation of machining processes with high precision through digital commands. The first functional CNC machine was developed in 1952 by Richard Kegg in collaboration with MIT, known as the Cincinnati Milacron Hydrotel [8]. Starting in the 1980s, with advances in microelectronics and software, CNC machines established themselves as the cornerstone of modern manufacturing. However, their high cost, operational complexity, and advanced technical requirements have limited their adoption in educational settings.

Given the current state of technology, two major alternatives coexist: on the one hand, highly sophisticated industrial CNC machines capable of achieving micrometer-level tolerances and working with high-strength materials; and on the other, a growing community of DIY (Do It Yourself) and open-source solutions that, while more accessible, often sacrifice precision and durability. A notable example of these initiatives is the IndyMill project, an open-source CNC machine designed to be easy to build and replicate, using widely available components and providing detailed documentation [9].

In the context of PCB fabrication, CNC emerges as an alternative to the traditional chemical method, eliminating the use of corrosive agents such as ferric chloride and reducing environmental risks [10]. Molina Portilla (2012) designed a prototype controlled with proprietary software (Mach3, KCAM4), using low-power stepper motors [7]. Similarly, Hernández et al. (2014) implemented control via parallel port, achieving basic perforations in phenolic boards [11].

The emergence of Arduino and GRBL platforms democratized access to low-cost CNC machines, marking a significant turning point in prototype research and development. These open-source platforms enabled students, researchers, and small

laboratories to construct functional systems without dependency on proprietary software or expensive industrial controllers.

Riquelme García (2014) was one of the first to introduce these technologies in a low-cost prototype, demonstrating that it was possible to integrate Arduino as the main controller and GRBL as firmware for the interpretation of G-codes [12]. This approach significantly reduced implementation costs and opened the possibility of customizing the system according to the user's needs.

Subsequently, Burga and Millones (2022) took this trend a step further by integrating Arduino + CNC Shield with open-source software such as FreeCAD and Inkscape, achieving a complete workflow from design to fabrication [13]. Their prototype achieved a precision of ±1 mm, which, although limited for high-density PCBs, represented a significant advancement in educational and rapid prototyping environments. Furthermore, they highlighted the ease of use of these tools, which allow users to generate milling trajectories without the need for high-cost specialized software.

Martínez et al. (2023) reinforced this trend by building a homemade CNC machine designed for wood carving, once again using GRBL and Inkscape as the core of the system [14]. Although its primary application was not PCB fabrication, the project demonstrated the versatility of these platforms and their ability to adapt to different materials and processes. The use of wooden structures, however, highlighted a recurring limitation: a lack of mechanical rigidity, which affects the precision and repeatability of milling.

Orozco et al. (2018) developed a 3-axis CNC machine using the open-source EMC2 software, demonstrating a 60% reduction in production times and structural deflection analysis [10]. Atta-ul-Mustafa et al. (2021) presented a low-cost prototype using an Arduino Nano and A4988 drivers, achieving errors of less than 1% [15]. Harahap et al. (2024) reported average errors of 0.86% on the X-axis and 0.95% on the Y-axis [16]. Aldeeb and Hwas (2025) built a CNC machine with an aluminum frame and 3D-printed parts, validating its mechanical stability [17]. Tumin et al. (2025) integrated HC-05 Bluetooth communication and safety systems, highlighting its educational applicability [18].

Although previous studies, such as those by Katherine Osorio Arroyave, have advanced ECAD–MCAD integration through platforms like Autodesk EAGLE and Fusion 360, these efforts focus mainly on digital interoperability, 3D modeling, and photorealistic visualization of PCBs, without addressing the challenges of automated physical manufacturing via CNC systems. Key gaps remain in areas such as mechanical design, actuator selection, toolpath generation and optimization, cutting parameter definition, and experimental validation of metrological and functional indicators [19].

Therefore, reliance on proprietary software ecosystems and commercial licensing limits reproducibility, increases costs, and restricts adoption in educational and low-resource prototyping environments. Consequently, a technological and methodological gap persists between digital PCB design and its low-cost physical realization, underscoring the need for open, scalable, and reproducible methodologies that integrate mechanical design, numerical control, automation, and open-source software tools for academic and industrial applications.

Among low-cost initiatives for CNC machine implementation, the work of Professor García, disseminated through his educational YouTube channel, stands out as a practical demonstration of building a functional prototype with accessible resources [20]. While this contribution is valuable as a pedagogical and outreach strategy, it presents notable technical limitations: the working bed area is reduced, restricting the fabrication of larger PCBs; critical mechanical design parameters such as exact dimensions, structural rigidity, and tolerances are not specified; and experimental validation of metrological indicators is absent. Furthermore, actuator characterization and machining toolpath optimization are only superficially addressed, limiting the reproducibility of the system in academic contexts with more demanding standards.

These gaps underscore the need for more

comprehensive methodologies that integrate mechanical design, numerical control, and replicable technical documentation, thereby ensuring both educational relevance and the feasibility of low-cost PCB manufacturing in institutions with limited resources.

III. DESIGN AND IMPLEMENTATION

A literature review was conducted, initially yielding a total of twenty-four documents. These included undergraduate theses, scientific articles, specialized YouTube channels, and technical web pages that served as complementary references. After applying selection criteria based on thematic relevance, methodological rigor, and practical applicability, nine documents were discarded for not meeting the established requirements. The final corpus consisted of fifteen references, comprising five in English and ten in Spanish, which enabled a comparative analysis between local and international approaches.

The review revealed recurring patterns in the use of open-source software and affordable electronic components, confirming a clear trend toward the de-mocratization of CNC technology in academic and low-budget environments. Among the most relevant documents was the thesis entitled "Design and Fab-rication of a 3-Axis CNC Milling Machine for PCB Machining Using Open Development Platforms", which emphasized the use of open-source software as a fundamental tool to reduce costs and facili-tate replicability. Additionally, a YouTube channel managed by Professor García was referenced, where accessible materials and pedagogical strategies were employed to enable students to build functional prototypes with limited resources.

A. Electronic and mechanical components

Regarding the selection of electronic and mechanical components, functionality and cost-effectiveness were prioritized. The chosen elements included the Arduino UNO, A4988 drivers, the CNC Shield board, bipolar stepper motors, limit switches, and a 20 A power supply. This selection was based on criteria of local market availability, technical reliability, and available budget. Each component plays a specific role within the system.

1) Arduino UNO: The Arduino UNO was selected as the main controller due to its versatility, low cost, and extensive support community. Based on the ATmega328P microcontroller, it interprets G-code instructions when combined with the GRBL firmware, effectively serving as the "brain" of the CNC machine. Its ease of programming, compatibility with multiple shields, and stable USB communication make it ideal for academic and rapid prototyping.

2) A4988 Drivers: The A4988 drivers are current-control modules designed to operate bipolar stepper motors. Their key advantage lies in their ability to perform microstepping (up to 1/16 step), which increases resolution and ensures smoother motion. They also feature built-in protection against overcurrent and overheating, enhancing system durability. Their affordability and widespread availability make them a standard choice for low-cost CNC projects.

3) CNC Shield Board: The CNC Shield is an expansion board that mounts directly onto the Arduino UNO, simplifying the connection of A4988 drivers and stepper motors. It supports up to three axes (X, Y, Z) and provides dedicated pins for limit switches and spindle control. Its modular design reduces wiring time and minimizes connection errors. Furthermore, its compatibility with GRBL ensures seamless integration into open-source software workflows.

4) Bipolar Stepper Motors: Bipolar stepper mo-tors were chosen for their precision in positioning and their ability to maintain torque even at rest. These motors convert electrical pulses into discrete angular movements, enabling accurate control of the cutting tool's position. Their bipolar configuration offers greater efficiency and torque compared to unipolar motors, which is critical for PCB milling.

5) Limit Switches: Limit switches serve both safety and calibration functions. These mechanical sensors define the physical boundaries of movement for each axis, preventing collisions and structural damage. They also facilitate initial referencing (homing), ensuring that the machine begins each operation from a known position. Their low cost and ease of installation make them essential

components in any CNC system.

6) 20 A Power Supply: The selected twenty ampere power supply guarantees a stable energy supply for all components. Initially, a lower-capacity power source was considered; however, after anticipating the installation of additional cooling fans and a higher-than-estimated current demand, a more robust option was chosen. This ensures that motors and drivers operate without voltage drops, preventing step losses and machining errors.

The bill of materials is shown in the table I.

Table I
Bill of Materials

Element	Reference	Quantity
Bipolar Stepper Motor	Nema 17 / 12V / 0.4A / 1.8° step	3
Flexible Coupling	8mm–5mm	3
CNC Screw + Nut with Sleeve	300mm – tc 8mm	3
Linear Ball Bearing	8mm	3
Steel Shaft	8mm – 40cm	3
Linear Shaft Support	8mm	3
CNC Shield + Drivers	A4988 Drivers	1
Arduino UNO	R3	2
Bearing	8mm	3
V-Engraving Bit	0.2mm	1
Cable Set x5	Female–Male (21cm)	1
Motortool Dremel 3000	120V / 125W	1
Power Supply	10A / 12V / 240W	1
Limit Switch Module + Cable	–	3
Aluminum Profile	20x20mm T-Slot / 2m	3
Screw Set x4	M3 (30mm)	1
Screw Set x4	M4 (25mm)	1
Wood Screw	–	1
T-Nut for Aluminum Profile 2020	M4 / 6x10mm	20
Countersunk Hex Screw	M4 / 15mm	20
Multimeter	UT890C	1
DC Motor Controller	LMD1800	1
DC Motor 775	5mm Shaft (12V–24V)	1

B. *CAD modeling*

The mechanical development of the CNC machine in Onshape enabled the consolidation of an integrated design that ensured proper interaction among the guiding, transmission, and structural systems of the X, Y, and Z axes. Through parametric modeling and the combination of imported and custom-designed components, it was possible to detect mechanical interferences, adjust tolerances, and validate alignments prior to physical implementation.

The platform facilitated the creation of 3D-printed parts to resolve issues such as collisions, motion transmission, and sensor mounting, thereby guaranteeing stable and controlled displacement in each axis. Consequently, the results achieved in Onshape provided a solid foundation for generating technical drawings and dimensional references, supporting the fabrication of a viable, reproducible prototype adapted to the requirements of educational and research environments.

For the mechanical design, Onshape was chosen as the CAD tool. Being cloud-based, it allows intuitive and collaborative modeling of component movements. The decision was based on its accessibility and ease of use, particularly in academic contexts where paid software licenses are restrictive. Initially, load and displacement simulations were considered to validate structural resistance. However, after reviewing available options, it was concluded that robust simulation software (e.g., ANSYS, SolidWorks Simulation) is commercial and exceeds the project's budget. This limitation led to focusing on geometric modeling and manual verification of stresses, leaving the possibility of future experimental validation open.The CAD modeling is shown in the figure 1.

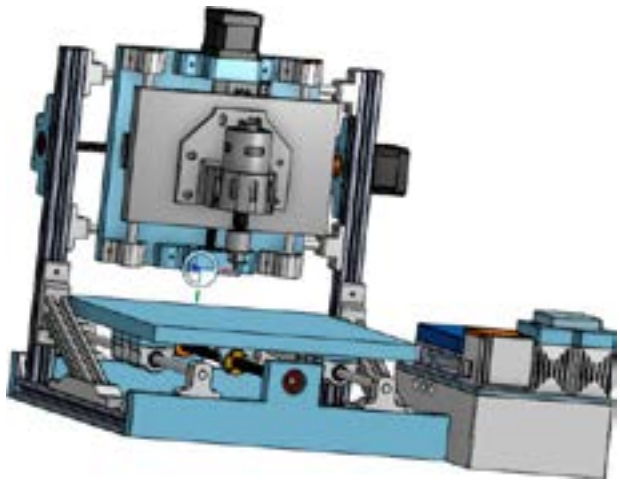


Figure 1. Design in Onshape

C. *Validation testing*

The evaluation of the selected components was carried out through practical testing using the Arduino UNO, the CNC Shield, and the bipolar

stepper motors, following a program developed by Professor García. This program was designed to validate the correct configuration of the STEP, DIR, and ENABLE signals for each axis (X, Y, and Z), ensuring proper synchronization between hardware and software.

The testing procedure consisted of sequential activation of each axis, verifying the following aspects:

- Signal integrity: The program confirmed that the digital outputs from the Arduino correctly triggered the drivers, enabling smooth motor operation.
- Direction control: By alternating the DIR signal, the motors were tested in both clockwise and counterclockwise rotations, validating bidirectional functionality.
- Speed modulation: The delay parameters within the code allowed adjustment of motor speed, demonstrating the relationship between microsecond delays and rotational velocity.
- Driver enable/disable: The ENABLE signal was tested to ensure that the drivers could be safely activated and deactivated, preventing unwanted movement when idle.

This evaluation confirmed that the integration of the Arduino UNO, CNC Shield, and A4988 drivers provided a stable and reliable control platform for the CNC prototype. The motors responded consistently to the programmed instructions, and the modular structure of the Shield facilitated straightforward wiring and reduced the likelihood of connection errors.

Furthermore, the program allowed for stress-free validation of the mechanical subsystems, ensuring that each axis could perform repetitive movements without loss of steps. This step was critical in es-tablishing confidence in the chosen hardware config-uration before advancing to the mechanical design and PCB milling tests. Professor García's code is shown in the figure 2.



Figure 2. Code developed by Professor García

D. *Open-source software tools*

The necessary software tools were selected to support the PCB manufacturing process. During this stage, the reliability of KiCad was verified, a free and open-source software widely recognized for electronic circuit design. KiCad proved to be a robust solution for schematic capture and PCB layout, offering a comprehensive set of features that include:

- Schematic design and symbol libraries, enabling accurate representation of electronic circuits.
- PCB layout tools, which allow precise placement of components and routing of conductive traces.
- 3D visualization, facilitating the inspection of the board's mechanical compatibility and overall design integrity.
- Open-source flexibility, ensuring adaptability

to academic and research environments without licensing restrictions.

The adoption of KiCad ensured that the design workflow remained cost-effective, transparent, and reproducible, aligning with the project's emphasis on accessibility and low-cost solutions. Its integration into the prototyping process provided a reliable foundation for subsequent manufacturing stages, reinforcing the consistency and accuracy of the PCB designs.

Schematic capture and PCB layout were per-formed in KiCad, which generates Gerber and drill (Excellon) files, the industry-standard outputs for electronic manufacturing processes. An example of a PCB designed in KiCad is shown in the figure 3.

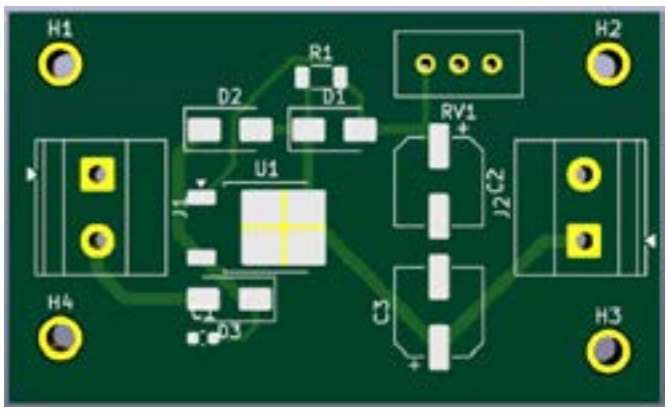


Figure 3. KiCad software PCB design

These files were subsequently imported into FlatCAM, a software tool specialized in preparing CNC milling toolpaths. FlatCAM converts Gerber files into geometric objects and, from them, creates the required CNC Jobs for isolation routing, drilling, and profile cutting. In figure 4 is shown the result of this process for the PCB design.

In the final stage of the workflow, Universal Gcode Sender (UGS) was employed, an open-source software that enables direct communication between the instruction file and the Arduino microcontroller running GRBL firmware. UGS interprets the G-code previously generated in FlatCAM and transmits it to the controller, ensuring that each command related to movement, feed rate, and cutting depth is executed accurately

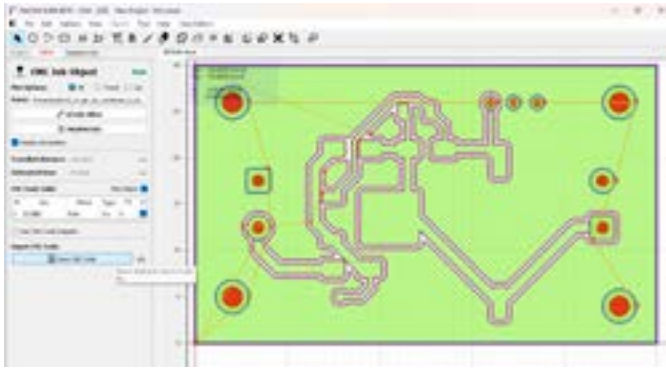


Figure 4. FlatCAM software for CNC toolpath generation

by the CNC machine.

The program provides a graphical interface that facilitates toolpath visualization, manual axis con-trol (X, Y, Z), and the configuration of critical parameters such as feed rate, acceleration, and travel limits. It also incorporates safety functions, including motor unlocking, command verification, and emergency stop, thereby ensuring a controlled environment during operation.

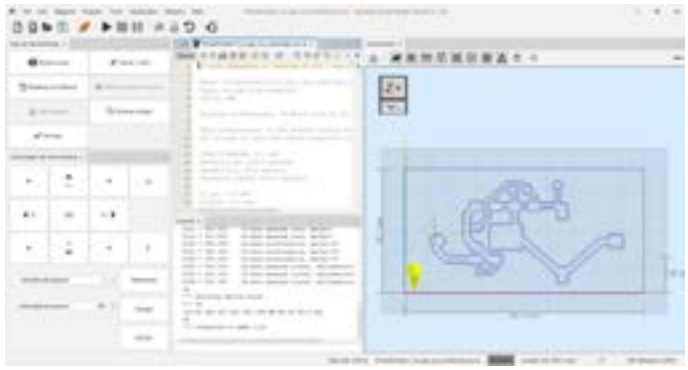


Figure 5. Universal Gcode Sender software for CNC operation

The integration of UGS into the workflow proved to be reliable and efficient, validating the correspondence between the electronic design and the physical execution of PCB milling. Its open-source nature reinforces the reproducibility of the process and ensures compatibility with academic and research environments. In figure 5 is shown the UGS interface for CNC operation of the PCB design.

Once the verification was complete, the Arduino, along with its source code, was connected to the shield, and the motors were connected to the UGS.

The full CNC setup was then implemented without installing the bakelite yet, and the proper operation of each axis was verified as is shown in the figure 6.

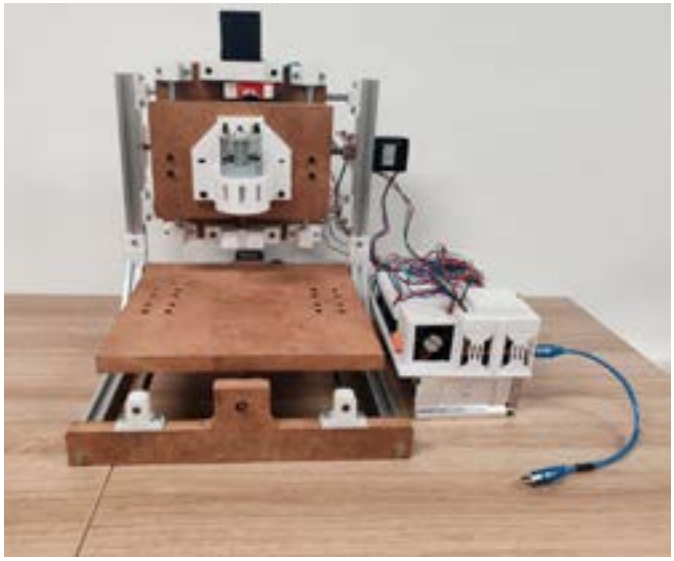


Figure 6. CNC prototype setup

The integration of these three tools established an open, replicable, and efficient workflow that bridges digital PCB design with its physical realization in educational and research contexts. As shown in the figure 7.

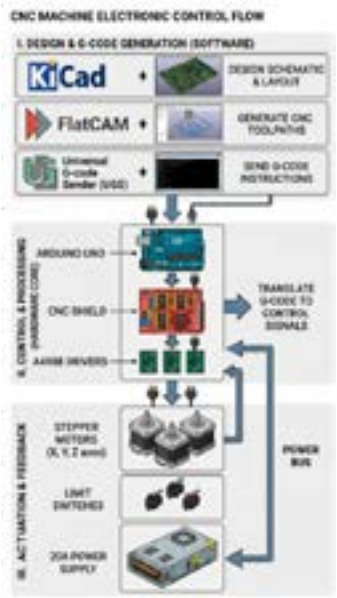


Figure 7. Workflow

IV. ANALYSIS AND RESULTS

Despite the cost of the selected electronic and mechanical components, the levels of precision and functionality achieved in preliminary tests suggest that the prototype can compete with the performance of commercial CNC machines, albeit with limitations in terms of durability. The ability of the stepper motors to maintain stable positions without loss of steps constitutes a positive indicator of the system's reliability and operational accuracy.

The 3D design in Onshape allowed for the visualization and adjustment of the interaction between mechanical components and the movements of each axis, which is fundamental to ensuring precision in PCB machining. Additionally, the generation of technical drawings from the model facilitates the fabrication of the necessary parts for assembly and replication of the prototype and possible future improvements.

Although the validation tests were limited to verifying basic movements along the three axes, the results obtained confirm that the selected architecture is functional and can be replicated in educational settings. The absence of lost steps during repetitive movements suggests that the system can perform low-demand operations with stability.

The integration of open-source platforms such as Arduino, GRBL, KiCad, FlatCAM, and UGS made it possible to establish a complete workflow without resorting to expensive licenses or industrial equipment. This has a direct impact on student learning, allowing them to gain hands-on experience with the entire cycle of designing, manufacturing, and validating electronic circuits.

The documentation generated throughout the processes of 3D modeling, validation testing, and the integration of open-source platforms within the CNC workflow ensures the reproducibility of the design, enhances its potential for adoption in diverse educational contexts, and facilitates knowledge transfer, supports low-cost prototyping, and strengthens the pedagogical value of CNC-based PCB fabrication.

In terms of impact, the project helps strengthen technical and engineering education in Colombia by offering a sustainable alternative that reduces reliance on traditional chemical methods and external manufacturing services. The practical experience gained by students fosters skills in electronic design, digital manufacturing, and process control, aligning with global trends in STEM education.

It is expected that the first contributions of the work will be reflected with the students of the Electrical Technology program at the Universidad Tecnológica de Pereira, in the subjects and laboratories of electronics, automation, and control.

V. CONCLUSIONS

- The literature review, which identified fourteen relevant documents following a selection process, revealed clear trends toward the use of open-source software and low-cost components, thereby validating the technical approach adopted.

- The functional verification of these components, along with the validation of the KiCad–FlatCAM–UGS workflow and the development of the 3D model in Onshape, represent direct steps toward the construction and commissioning of the prototype. The proper functioning of the electronic system and the communication between hardware and software confirm that the technical conditions are in place to proceed with the complete mechanical assembly.

- The limitation encountered in simulating loads and stresses introduces a degree of uncertainty regarding the mechanical behavior of the prototype under actual operating conditions. This situation requires special attention during the implementation phase, where progressive physical testing must compensate for the structural analysis that could not be performed.

- With regard to experimental validation, preliminary results indicate that the prototype will be capable of executing machining paths with a level of precision sufficient to rival traditional PCB manufacturing methods. However, this can only be confirmed once tests are conducted on the bakelite, where variables such as structural rigidity and fine axis calibration will be critical.

- Finally, documenting the results obtained is an important consideration, given that one of the gaps identified in the reviewed literature is precisely the lack of clear documentation on how to replicate the construction of the CNC and its final use, demonstrate that it is possible to access rapid prototyping technologies in institutions with limited resources.

References

[1] I. B. de Almeida, C. K. de Monteiro Mar-ques, A. O. Nunes, S. M. C. Alves, and D. P. Bezerra, "Estado de conhecimento sobre abordagens tecnológicas para aprimorar o en-sino de comando numérico computadorizado (cnc)," *Cadernos de Educação Tecnologia e Sociedade*, vol. 18, no. 2, pp. 476–486, 2025.

[2] M.-L. Wu, W.-J. Tsai, J. Ger, and J.-F. Deng, "Clinical experience of acute ferric chloride poisoning," *Veterinary and human toxicology*, vol. 45, no. 5, pp. 243–246, 2003.

[3] N. Sathyakumar, K. Prasath Balaji, R. Gana-pathi, and S. R. Pandian, "A build-your-own three axis cnc pcb milling machine," *Materi-als Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 24 404–24 413, 2018. doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.045

[4] R. Ye. "Cnc machining in education: Applica-tions and benefits." Consultado el 7 de mayo de 2026. [Online]. Available: https:// www. 3erp.com/blog/cnc-education/

[5] United Nations Development Programme. "Objetivo de desarrollo sostenible 4: Edu-cación de calidad," Accessed: May 8, 2026. [Online]. Available: https:// www. undp. org/ es/sustainable-development-goals/educacion-calidad

[6] United Nations Development Programme. "Objetivo de desarrollo sostenible 9: Indus-tria, innovación e infraestructura," UNDP, Accessed: May 8, 2026. [Online]. Available:

https : / / www . undp . org / es / sustainable - development - goals / industria - innovacion - infraestructura

[7] M. Molina Portilla, “Diseño y construcción de una máquina cnc para la elaboración de circuitos impresos,” Ph.D. dissertation, Uni-versidad de Nariño, 2012.

[8] Rapid Direct. “Historia CNC: El origen y la evolución del mecanizado CNC.” Última ac-tualización: 15 de diciembre de 2025, Rapid Direct. [Online]. Available: https : / / www . rapiddirect.com/es/blog/cnc-history/

[9] N. Bartnik. “IndyMill - DIY open source metal CNC machine.” Consultado el 7 de mayo de 2026, Indystry.cc. [Online]. Avail-able: https://indystry.cc/indymill/

[10] J. Orozco, P. Guamán, and M. López, “Dis-eño y construcción de una máquina cnc de 3 ejes,” Ph.D. dissertation, ESPOCH, 2018.

[11] J. Hernández, J. Sánchez, and A. Pérez, “Diseño y construcción de una máquina cnc para la elaboración de circuitos impresos,” Ph.D. dissertation, Instituto Tecnológico de Tlaxcala, 2014.

[12] J. Riquelme García, “Diseño y construcción de una máquina cnc de bajo costo,” Ph.D. dis-sertation, Universidad Politécnica de Carta-gena, 2014.

[13] J. Burga and J. Millones, “Diseño y con-strucción de un prototipo cnc router para la elaboración de circuitos impresos,” Ph.D. dis-sertation, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2022.

[14] J. Martínez, A. Rodríguez, and L. Gómez, “Diseño y construcción de una máquina cnc router casera,” Ph.D. dissertation, TEINCO, 2023.

[15] M. Atta-ul-Mustafa et al., “Design and de-velopment of a low-cost cnc machine,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 12 345–12 356, 2021.

[16] R. Harahap et al., “Development of cnc ma-chine with arduino control,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2345, 2024, pp. 1–8.

[17] M. Aldeeb and A. Hwas, “Design and fabri-cation of cnc machine using aluminum and 3d printed parts,” *International Journal of Me-chanical Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 45–52, 2025.

[18] M. Tumin et al., “Bluetooth-enabled cnc machine for educational applications,” *Jour-nal of Engineering Science and Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 101–110, 2025.

[19] K. O. Arroyave, “Metodologías de diseño mecánico y modelamiento 3d para la man-ufactura flexible de tarjetas de circuitos im-presos pcb’s,” Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2020.

[20] P. García, *Canal de youtube - cnc projects*, https : / / www. youtube . com / channel / UCc - vG493VqpLmL5gbnCvU4A, Accedido el 8 de mayo de 2026, 2026.

PDe lo tradicional a lo digital: Spotlight como puente transmoderno para el emprendimiento local en Ubaté (Colombia) y Puebla (México).

Juliana Rodríguez Tinjaca
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Ubaté, Colombia
julianarodriguezt@ucundinamarca.edu.co

Jan David Peña Pinilla
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Ubaté, Colombia
jdavidpena@ucundinamarca.edu.co

Rafael Ortega Ortega
Facultad de Ingeniería
Universidad de Cundinamarca
Ubaté, Colombia
rortegao@ucundinamarca.edu.co

***Resumen*— La economía digital ha reconfigurado las reglas de competitividad empresarial a nivel global, lo que convierte la presencia en línea en una condición prácticamente obligatoria para la supervivencia comercial. Sin embargo, esta transición no ha sido posible de manera equitativa en todos los territorios ni a todos los actores económicos ya que existe una brecha gigante entre quienes logran incorporarse a los circuitos digitales de la economía y quienes no, algunos de los causantes de este problema son la falta de capacidad, carencia de herramientas o ausencia de espacios que faciliten ese cambio o transición. En la Villa de San Diego de Ubaté (Cundinamarca, Colombia), municipio con una economía consolidada en torno al sector lácteo, el comercio minorista y los servicios, en el que persiste una singularidad estructural: tiene un tejido empresarial activo y productivo que es prácticamente invisible en el mundo digital. Una gran parte de sus unidades productivas operan al margen de la formalidad, no tienen registro mercantil, no existe un acceso a apoyo institucional y claramente no están presentes en los mercados digitales, lo cual crea una situación de desventaja frente a las dinámicas actuales de la economía. El diagnóstico realizado en el marco de este proyecto, mediante encuestas aplicadas a dos grupos poblacionales 20 emprendedores, y 53 consumidores del municipio, confirmo que el 55% carece de cualquier forma de presencia digital y el 47% de los consumidores descubre negocios locales exclusivamente por voz a voz. Esta invisibilidad no es un problema aislado, es una barrera estructural que limita el alcance y competitividad comercial de los emprendimientos, reduce los ingresos de las familias del municipio (Ubaté, Colombia) y estado (Puebla, México) y crea ciclos de precariedad económica difíciles de romper.**

Este proyecto se basa en el desarrollo de Spotlight una plataforma web denominada Aldea Digital orientada a impulsar la transformación digital transmoderna de las micro, pequeñas e informales empresa de Ubaté, Colombia y Puebla, Mexico. El concepto de trasmodernidad, sustenta el enfoque del proyecto, la plataforma no replica la lógica de los grandes marketplaces globales donde la oferta local queda diluida y homogenizada, si no que se busca la construcción de un ecosistema digital propio de las necesidades, capacidades e identidad de los territorios objetivo del proyecto, donde los emprendedores podrán acceder a una vitrina de competitividad comercial sin renunciar a su esencia ni a su modo de operar. Para el desarrollo de la plataforma se implementó Scrum como marco de trabajo ágil, organizado en seis sprints cada uno con una duración de 4 semanas. La plataforma se construye utilizando PHP, Laravel y MySQL adoptando una arquitectura MVC (modelo, vista, controlador), diferenciando tres roles (usuario, emprendedor, administrador) y 18 historias de usuario (HU) agrupadas dentro de los seis módulos funcionales, los cuales corresponden a gestión de identidad y acceso, vitrina digital del emprendedor, motor de búsqueda con geolocalización, interacción y enlace comercial, moderación administrativa y analítica de impacto digital. Actualmente se encuentra en desarrollo el módulo uno con sus respectivas pruebas y se proyecta la entrega de los seis módulos completamente funcionales con sus respectivas pruebas de aceptación, métricas de adopción tecnológicas por parte de los emprendedores participantes e indicadores cuantitativos de incremento en la visibilidad digital. El centro del desarrollo de la plataforma es demostrar, con evidencia empírica propia, que con un bajo costo, alta pertenencia territorial y diseño inclusivo se puede consolidar un modelo sostenible y replicable para ecosistemas con condiciones similares.

Palabras Clave— Transformación digital, desarrollo económico local, informalidad empresarial, inclusión digital.

I. Introducción

La economía digital ha transformado la forma en que operan las organizaciones a nivel mundial, convirtiendo la digitalización en un requisito fundamental para la competitividad. Sin embargo, esta transición no ha sido uniforme, ya que persisten brechas significativas entre quienes logran integrarse al ecosistema digital y quienes permanecen rezagados por limitaciones estructurales de acceso, recursos e información.

Esta realidad se manifiesta con especial intensidad en el municipio de la Villa de San Diego de Ubaté (Colombia) y en ciudades con alta economía informal como Puebla (México), donde micro y pequeñas empresas, junto con emprendedores informales, operan bajo modelos tradicionales centrados en el comercio presencial y en la venta tras

mostrador. El único acercamiento al entorno digital se basa en el uso esporádico de redes sociales, lo que restringe su alcance a un perímetro geográfico local, lo que limita considerablemente su oportunidad de crecimiento.

A esta situación se suma la informalidad empresarial predominante en ambos territorios, lo que impone barreras adicionales derivadas de bajos recursos económicos y escasa apropiación digital. Frente a este escenario, se propone el desarrollo de una plataforma web denominada Aldea Digital (Spotlight), diseñada desde y para las necesidades de estos dos contextos, bajo el concepto de transmodernidad, una solución que potencia la competitividad digital sin desconocer la identidad territorial ni el modelo operativo tradicional de cada comunidad.

Esta plataforma articulará tres roles (usuario, emprendedor y administrador), cada uno con funcionalidades diferenciadas que incluyen geolocalización, catálogos digitales, canales de comunicación directa, sistema de facturación electrónica y perfiles de emprendimiento, entre otros. Todo ello con el propósito de reducir la brecha digital, ampliar el alcance comercial de los negocios locales y contribuir a la dignificación del trabajo del emprendedor en la era de la economía digital.

II. MARCO REFERENCIAL

El marco de referencia comprende una investigación acerca de conceptos, teorías enmarcadas en los aspectos jurídicos, legales, históricos, que serán determinados por la necesidad del proyecto.

A. *Internacional*

Un referente latinoamericano relevante para este proyecto es la experiencia de las aldeas digitales implementadas en Guanajuato, México, particularmente en municipios especializados en cerámica, tequila y artesanías. Tanto Ubaté como Puebla comparten un tejido empresarial construido alrededor de actividades productivas y culturales propias de cada territorio, el sector lácteo, el comercio local y las artesanías en el caso colombiano, y la gastronomía, el textil y el comercio informal en el contexto poblano. Sin embargo, ambos municipios difieren del caso guanajuatense en un aspecto fundamental, la presencia digital es prácticamente inexistente y los noveles de madurez tecnológica entre sus empresarios son muy bajos. La experiencia de Guanajuato, en cambio, partió de una infraestructura digital ya consolidada, aunque carecía de una plataforma territorial propia que agrupara la oferta local. Spotligth nace precisamente en contextos con brechas de conectividad reales, una proporción significativa de empresas informales y la necesidad de una plataforma con identidad propia que refleje la vocación productiva y cultural de cada región [1].

Por su parte López Ayala, Gonzales y Reza Villalpando analizaron el impacto del networking y el comercio electrónico en dispositivos móviles sobre la competitividad de las pymes mexicanas, concluyendo que la adopción de herramientas digitales puede incrementar las ventas hasta un 24%, siempre que exista una estrategia de visibilidad clara y definida. Este hallazgo resulta especialmente pertinente para el contexto de Puebla, donde la alta concentración de economía informal y dinamismo comercial del municipio representan un terreno fértil para la digitalización, pero con barreras similares a las identificadas en el estudio. En él se introduce el concepto de “Aldea Digital” como espacios virtuales donde empresas, negocios y consumidores interactúan en tiempo real para cerrar negocios y construir relaciones comerciales. No obstante, los autores también evidenciaron que el 90% de las pymes no saben aprovechar estas herramientas por falta de objetivos y estrategias concretas, por lo que recomiendan explícitamente articular programas cooperativos entre universidades, centros de investigación y empresas locales como vía para reducir esta brecha [2].

Este antecedente fundamenta el enfoque territorial de la plataforma y posiciona a Spotligth no como la única solución tecnológica posible, sino como una respuesta directa a la recomendación de vincular el ámbito académico con el ecosistema empresarial local, para que las micro, pequeñas e informales empresas de Ubaté y Puebla puedan existir y competir en el mercado digital.

B. *Nacional*

En el plano nacional, Garzón Zambrano desarrollo para la Universidad Autónoma de Bucaramanga una ruta de mejoramiento orientada a la transformación digital de dos MiPymes vinculadas al Centro de Desarrollo Empresarial UNAB, Carrocerías Millán, del sector metalmecánico, y Zeida Millán Estética, del sector servicios. Empleando en instrumento de medición de madurez digital del Ministerio TIC y la metodología SCRUM, el estudio reveló que ambas empresas se encontraban en una etapa inicial de digitalización, con brechas críticas en gestión de datos, cultura digital e infraestructura tecnológica. Zeida Millán Estética obtuvo una calificación de 2 sobre 4 en madurez digital, siendo las dimensiones de datos y analítica las más deficientes, con un puntaje de 1 sobre 4. Este diagnóstico guarda una estrecha similitud con la realidad de los emprendedores informales de Ubaté y Puebla, donde las carencias en cultura digital y recursos tecnológicos representan obstáculos equivalentes. Los resultados demuestran que el acompañamiento universitario estructurado puede activar procesos de transformación digital en MiPymes con recursos limitados, aunque la sostenibilidad de dichos procesos depende de la autonomía que alcance la empresa al concluir la intervención. Una limitación importante del estudio es que se centró exclusivamente en la optimización de procesos internos, sin considerar la visibilidad digital de las empresas ni su integración a ecosistemas digitales territoriales [3].

Este trabajo aporta una lección clave al presente proyecto, no es posible transformar digitalmente lo que aún no existe en el ecosistema digital. Los emprendedores de Ubaté y Puebla necesitan, antes que nada, una presencia digital que los haga visibles, reconocibles y conectados con su entorno. Esa es precisamente la apuesta de Spotligth una plataforma web donde estos negocios puedan ser encontrados y reconocidos dentro de su propia región.

Desde otra perspectiva, Montaño Núñez analiza la transformación digital de las pymes colombianas y el uso del comercio electrónico como alternativa al modelo presencial tradicional. El autor destaca que, pese a que las pymes representan cerca del 90% del tejido productivo nacional y generan 80% del empleo, Colombia apenas alcanza una calificación de 4 sobre 7 en el índice NRI del Foro Económico Mundial, lo que evidencia un nivel de apropiación tecnológica por debajo de los estándares latinoamericanos. Esta situación no es ajena a México, Puebla enfrenta retos similares en materia de digitalización empresarial, donde el comercio informal predomina y la visibilidad digital de los negocios locales es mínima. A esto se suma que el 89% de los colombianos ya busca productos y servicios en línea, tendencia que se replica en el contexto mexicano, evidenciando una demanda digital activa que las empresas locales de ambos territorios no logran satisfacer por su escasa presencia en plataformas digitales [4].

Este panorama refuerza la pertinencia de Spotlight como herramienta para conectar esa demanda digital existente con l oferta de micro, pequeñas e informales empresas de Ubaté y Puebla, incorporándolas a una red de competitividad económica real.

C. *Local*

En el contexto local, los estudiantes Walter Mogollón y Sofía Suárez desarrollaron una propuesta de red de conectividad digital con enfoque en la innovación tecnológica para las MiPymes de Villa de San Diego de Ubaté. Su trabajo contempló el desarrollo de una página web con herramientas de gestión administrativa, comercial y operativa, bajo una metodología mixta de investigación y XP como metodología de desarrollo. Aunque la propuesta aborda la transformación digital desde la eficiencia interna, no contempla mecanismos de visibilidad pública orientada al consumidor ni a la inclusión de empresas informales no registradas en plataformas oficiales, imitación que también se identifica en iniciativas similares desarrolladas en el contexto poblano. En ese sentido, Spotlight contempla estas iniciativas al enfocarse en la visibilidad externa y en facilitar el acceso ciudadano a la oferta local, tanto en Ubaté como en Puebla. Cabe señalar que este trabajo aún no se encuentra disponible en repositorios académicos; fue referenciado directamente por el director del presente proyecto de grado, quien también oriento dicho trabajo [5].

Desde otra mirada, Ledesma García [6], en una investigación realizada con productores informales de Boyacá, las limitaciones comerciales del sector artesanal, un mercado restringido a visitantes y turistas locales, con nula presencia en canales digitales. Como solución, desarrollaron la vitrina comercial web “Artesanos Sumerce”, acompañada de un programa de capacitación en comercio electrónico que obtuvo una valoración del 84% por parte de los artesanos beneficiados.

Esta experiencia permite trazar un paralelo con los contextos donde se desarrolla Spotlight, tanto Ubaté como Puebla comparten características de economía local con fuerte arraigo territorial, alta informalidad y escasa presencia digital. La diferencia principal con respecto a “Artesanos Sumerce” radica en el alcance mientras esa iniciativa se enfocó en un sector especifico, Spotlight platea una solución permanente y multisectorial, orientada a toda la oferta de micro, pequeñas e informales empresas de ambos municipios, reconociendo la diversidad productiva y cultural de cada territorio.

III. MARCO METODOLOGÍCO

El presente proyecto se fundamenta en un enfoque metodológico ágil correspondiente a la metodología Scrum, orientado al desarrollo incremental de software, con el objetivo de garantizar eficiencia, adaptabilidad y creación continua de valor durante todo el proceso de construcción de la plataforma Spotlight (Aldea Digital). Como señalan Schwaber y Sutherland, este marco de trabajo, no es un proceso rígido, sino un contenedor de prácticas que permite a las organizaciones y equipos abordar problemas adaptativos, entregando productos de forma creativa y productiva con el mayor valor posible; su esencia radica en un equipo pequeño de personas altamente flexibles y adaptables que operan en ciclos iterativos [6]. Esta metodología es ampliamente utilizada en proyectos de desarrollo de software por su capacidad de gestionar entornos dinámicos, promover la colaboración constante y permitir la entrega progresiva de funcionalidades operativas.

De esta manera, el marco metodológico no solo está orientado al desarrollo técnico y funcional de la plataforma, sino que también establece los lineamientos organizativos, operativos y evaluativos que garantizan la coherencia entre los objetivos del proyecto, los resultados esperados y el impacto social que genera la implementación de esta aldea digital en los dos territorios.

A. Recolección de datos e investigación

El proyecto se fundamenta en un enfoque de carácter aplicado y descriptivo, orientado a generación de una solución tecnológica basada en necesidades reales del contexto empresarial local. A continuación, se explican cada uno de los factores que se tuvieron en cuenta en el enfoque de investigación:

1) Investigación aplicada: De acuerdo con Tamayo, o “la investigación aplicada se orienta a la resolución de problemas prácticos mediante la utilización del conocimiento científico” [7]. Esta investigación es de tipo aplicada ya que no se limita a la generación de conocimiento teórico, sino que busca la creación de una solución concreta que pueda generar un impacto positivo.

2) Alcance Descriptivo: Hernández-Sampieri y Mendoza señalan que “los estudios descriptivos buscan especificar propiedades, características y perfiles de personas, grupos o fenómenos” [8]. El estudio posee un alcance descriptivo ya que busca caracterizar la situación actual de las micro, pequeñas e informales empresas en ambos municipios en aspectos de visibilidad digital, estrategias de comercialización y adopción de herramientas tecnológicas.

B. *Técnicas e instrumentos de recolección de datos.*

La técnica principal empleada para la recolección de datos fue la encuesta, aplicada a cada uno de los grupos poblaciones (emprendedores y usuarios), estructurada con el objetivo de identificar las necesidades de cada grupo y conformar las Historias de usuario (HU) en la metodología Scrum. De acuerdo con Arias, “la encuesta es una técnica de recolección de datos que permite obtener información directa de los sujetos investigados mediante un conjunto de preguntas previamente diseñadas” [9].

Se diseñaron dos instrumentos dirigidos a cada uno de los grupos de estudio.

Encuesta dirigida a emprendedores con el objetivo de identificar los siguientes puntos:

1) Nivel de presencia digital.
2) Uso de redes sociales.
3) Dificultades de visibilidad.
4) Interés en integrar una plataforma digital municipal.
5) Necesidades tecnológicas.

Encuesta dirigida a usuarios con el objetivo de identificar los siguientes puntos:

1) Frecuencia de consumo en negocios locales.
2) Dificultad para encontrar información empresarial.
3) Preferencia por herramientas digitales.
4) Disposición para utilizar una Aldea Digital.

C. *Arquitectura funcional del Sistema*

Para garantizar un desarrollo organizado y alineado con los tiempos establecidos, se tomó la decisión de dividir el sistema en 8 módulos funcionales, los cuales constituyen las épicas del Product Backlog y permiten abordar de manera sistemática y prioritaria las Historias de usuario de los tres actores principales: usuario, emprendedor y administración.

Cada módulo tiene asignadas historias de usuario recolectadas en la fase de investigación mediante encuestas, lo que garantiza el desarrollo funcional y eficiente de cada etapa. Los módulos comprenden el ciclo completo del proyecto, desde el inicio hasta la entrega final, y se estructuran de la siguiente manera:

TABLA 1

Tab.1 Módulos funcionales del sistema, autoría propia

No	Módulo	Descripción General	Actor Principal
1	Gestión de Identidad y Acceso	Registro, autenticación y gestión de roles	Todos
2	Perfil Comercial y Vitrina Digital	Creación y gestión de perfil del emprendedor:	Emprendedor
3	Dashboard de Usuario, Búsqueda y Geolocalización	Filtros por categorías, mapa interactivo, buscador inteligente y carrito de compras.	Usuario
4	Interacción y Enlace Comercial	Comunicación directa usuario-emprendedor.	Usuario / Emprendedor
5	Control y Moderación Administrativa	Panel privado para aprobación, rechazo y gestión de registros.	Administrador
6	Analítica e Impacto Digital	Dashboard de reportes: crecimiento de negocios.	Administrador
7	Notificaciones y Comunicación Interna	Sistema de alertas y notificaciones: aprobación de perfil, etc.	Todos
8	Onboardin y Experiencia de Usuario	Flujo de bienvenida, tutoriales interactivos, guía de primeros pasos.	Usuario / Emprendedor

Tab. 1 Product Backlog con las 24 HU con sus especificaciones, autoría propia

D. *Historias de Usuario (HU)*

Las historias de usuario (HU) desempeñan un papel fundamental en la metodología Scrum, ya que proporcionan una perspectiva del cliente (usuarios finales y emprendedores) sobre las funcionalidades requeridas en cada uno de los módulos definidos. Además, permiten generar componentes y sugerencias de valor durante las iteraciones y facilitan el cumplimiento de la entrega de módulos del proyecto.

Las HU describen funcionalidades específicas que los usuarios y emprendedores desean ver en el sistema. Su recolección fue exitosa gracias a las encuestas realizadas y a la comunicación constante con los grupos objetivo. Las historias fueron clasificadas por número, responsable, nombre, prioridad, fecha de realización, sprint asignado y una descripción detallada. Se generaron aproximadamente 3 HU por módulo, para un total de 24 historias de usuario distribuidas en los 8 módulos del sistema. A continuación, se presenta el formato seguido para la documentación de las HU:

TABLA 2

Historia de usuario	
Desarrollo de una Aldea Digital (Spotlight) para la visualización del emprendimiento transmoderno en las micro, pequeñas e informales empresas de la Villa de San Diego de Ubaté y Puebla, México.	
Número de historia: 01	Título: Registro de cuentas Prioridad: ALTA
Fecha: marzo 2026	Sprint asignado: S01
Descripción de la historia: Es indispensable implementar un formulario de registro que capture datos básicos y permita al sistema clasificar al usuario según su rol (Emprendedor o Usuario final) para habilitar sus funciones correspondientes, además de la configuración de la base de datos.	

Tab. 2 HU01, autoría propia

E. *Product Backlog*

El equipo de trabajo formalizó el product backlog a partir de los módulos mencionados anteriormente. Dentro de este artefacto se incluyó una descripción detalla de cada componente con su prioridad (alta, media o baja), estado de desarrollo, sprint asignado y módulo relacionado, con el fin de garantizar la calidad y eficiencia del desarrollo en cada etapa.

El product backlog, con fecha de elaboración del 8 de marzo de 2026, contempla las 24 historias de usuario distribuidas en 8 módulos de desarrollo. Este artefacto permitió organizar y definir las HU para la fase de Spint Backlog, donde se asignaron responsables y de detallaron las tareas específicas de desarrollo.

FIGURA 1

Product Backlog					Fecha:	8/03/2026
					Responsable:	Develoment Team
Identificador de HU	Nombre de la Historia	Descripción	Prioridad	Estado	Sprint	Módulo relacionado
HU01	Registro de cuentas	formulario de registro que capture datos básicos y permita al sistema clasificar al usuario según su rol (Emprendedor o Usuario final)	ALTA	Pendiente	S01	M01
HU02	Login de plataforma	reación del sistema de logueo seguro mediante interfaz gráfica.	ALTA	Pendiente	S01	M01
HU03	Recuperación de acceso	variante que permita al usuario restablecer su contraseña de forma remota	MEDIA	Pendiente	S01	M01
HU04	Creación de perfil	Registro y creación de la hoja de vida de los negocios	ALTA	Pendiente	S02	M02
HU05	Carga de galería visual	implementación de un módulo de carga de imágenes para productos y servicios	ALTA	Pendiente	S02	M02
HU06	Datos de	Espacio para datos de contacto y demas de los negocios	MEDIA	Pendiente	S02	M02
HU07	Filtro por	El sistema debe permitir al usuario filtrar los negocios por sectores	ALTA	Pendiente	S03	M03
HU08	Mapa interactivo	Implementación de geolocalización para ubicar los comercios	ALTA	Pendiente	S03	M03
HU09	Buscador inteligente	Creación de una barra de búsqueda por palabras clave	MEDIA	Pendiente	S03	M03
HU10	Enlace a WhatsApp	integrar un botón de enlace directo a la API de WhatsApp del emprendedor	ALTA	Pendiente	S04	M04
HU11	Calificación de servicios	componente que permita a los ciudadanos valorar con estrellas los comercios visitados	MEDIA	Pendiente	S04	M04
HU12	Reseñas de usuarios	Implementación de un campo de texto para comentarios, para que los usuarios puedan dejar testimonio	BAJA	Pendiente	S04	M04
HU13	Validación de registros	El administrador debe contar con una interfaz que permita aprobar o rechazar nuevos negocios	ALTA	Pendiente	S05	M05
HU14	Gestión de cuentas	El administrador podrá editar o suspender perfiles existentes	MEDIA	Pendiente	S05	M05
HU15	Moderación de imágenes	herramienta de supervisión multimedia	MEDIA	Pendiente	S05	M05
HU16	Gráficas de crecimiento	El sistema generara graficas de análisis sobre el registro de negocios formales e informales	ALTA	Pendiente	S06	M06
HU17	Métricas de visitas	El sistema debe contabilizar las visualizaciones de cada perfil comercial	MEDIA	Pendiente	S06	M06
HU18	Reporte de interacción	Generación de reportes sobre el uso del botón de WhatsApp y clics de contacto	BAJA	Pendiente	S06	M06

Tab. 1 Product Backlog con las 24 HU con sus especificaciones, autoria propia

F. Sprint Backlog

Para el desarrollo de la Aldea digital se definió un sprint backlog con el objetivo de tener una ruta técnica, en donde cada una de las HU que componen los sprints se descomponen en 5 tareas granulares y manejables, además se puede observar el estado en el que se encuentra a la fecha cada una de las tareas y el responsable del desarrollo de esta.

La importancia de la elaboración de este componente se centra en la capacidad de transformación de requerimientos funcionales en tareas que pueden ser ejecutadas de manera independiente, lo que permite un seguimiento riguroso del proceso diario tanto de las historias de usuario que tienen un tiempo estimado de desarrollo de 1 semana aproximadamente y el cumplimiento de los sprints con duración de 1 mes, para asegurar que el incremento del software cumpla los estándares de calidad y funcionalidad para cubrir las necesidades de los usuarios y comerciantes de la Villa de San Diego de Úbate.

En la figura 2 se observa parte del formato seguido para la formalización del sprint backlog.

FIGURA 2



Fig.2 Parte del sprint backlog con las especificaciones dadas, autoria propia.

G. Planificación de los sprints

En el marco de la metodología Scrum, el desarrollo de la Aldea Digital Spotlight se organizará en ciclos de trabajo iterativos denominados Sprints. De acuerdo con la planificación académica y teniendo en cuenta que el desarrollo del proyecto esta propuesto para dos semestres y la complejidad de los módulos anteriormente definidos, se estableció una estructura de seis sprints, cada uno con una duración de un mes (cuatro semanas).

La entrega mensual permite que el equipo de desarrollo avance de manera rigurosa en todas las fases del ciclo de vida del software. La duración elegida garantiza que cada entrega y cada incremento de producto sea lo suficientemente maduro para ser inspeccionado en el Sprint review por el equipo de trabajo, también permite una adaptación ágil frente a cualquier ajuste funcional o técnico necesario.

Para la administración del ciclo de vida del desarrollo de la Aldea Digital, se seleccionó Jira'Software como herramienta de gestión de proyectos ágiles. Por medio de este software se planificaron los Sprints en forma de tablero en donde se pueden ver las HU que los componen, el estado de cada una de ellas, la fecha estimada de finalización tanto del sprint como de cada HU. Esta plataforma garantiza monitoreo en tiempo real del flujo de trabajo.

TABLA 3

Campo	**Detalle**
Módulo y Sprint	Sprint 1: Gestión de Identidad y Acceso
Herramienta de Gestión	Jira Software (Tablero: SCRUM1 — Sprint 01)
Fecha inicio	6 de marzo de 2026
Fecha fin	6 de abril de 2026
Historias de Usuario	ADU-01: Registro de cuentas | ADU-02: Login de plataforma | ADU-03: Recuperación de acceso
Definición de Hecho (DoD)	El código ha sido probado, documentado y el incremento es funcional en el entorno de desarrollo.

TAB.3 planificación sprints, autoría propia

FIGURA 3

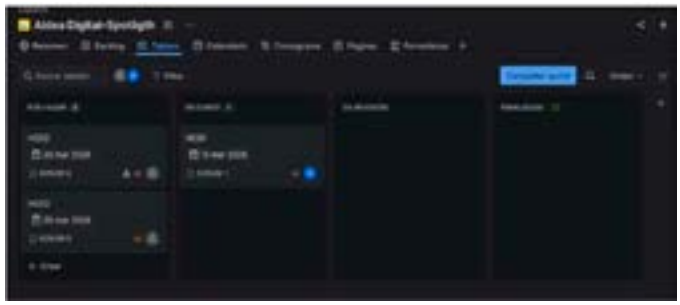


Fig. 3 Tablero en Jira correspondiente a Sprint 01, autoría propia

IV. Resultados

Uno de los resultados parciales obtenidos se relaciona directamente con la encuesta. La encuesta aplicada a las empresas del municipio se desarrolló mediante Forms, en donde se emplearon diferentes preguntas con el fin de obtener en primer lugar la justificación de la problemática, en donde se identifica que en realidad las micro, pequeñas e informales empresas no cuentan con una digitalización comercial en el momento, y en segundo lugar obtener las funcionalidades que al emprendedor le gustaría observar y tener en la Aldea Digital, además de la aceptación que tendría por su parte la implementación de la misma.

Para la encuesta aplicada a los usuarios finales se utilizó forms como herramienta de creación de formularios, las respuestas que se obtuvieron de los usuarios varían dentro de diferentes rangos de edad y que son consumidores frecuentes de productos que se ofrecen en el municipio de Ubaté, en donde se aplicaron preguntas especificas con el objetivo de conocer la frecuencia de consumo en el comercio local, si alguna vez a comprado en línea y si estaría de acuerdo y seria cliente si la Aldea Digital se implementara, y si su respuesta es afirmativa, preguntas

para lograr capturar algunas funcionalidades que ellos como usuarios les gustaría ver en la plataforma.

V. Conclusiones

El proyecto culmina la fase de investigación, con bases concretas tanto conceptuales, teóricas, legales y tecnológicas sobre las cuales se sustenta el desarrollo de Spotlight como plataforma web (Aldea digital) para las micro, pequeñas e informales empresas de la Villa de San Diego de Ubaté. Dentro de este proceso, permitió identificar y documentar el problema central que motiva el proyecto; la poca visibilidad de un tejido empresarial activo pero ajeno al ecosistema digital, lo que limita su competitividad y la posibilidad de crecer dentro de un entorno económico cada vez más digitalizado.

Dentro del levantamiento de los requerimientos funcionales, se aplicaron dos instrumentos de recolección de información; una encuesta orientada a los consumidores de la región de Ubaté, para identificar sus hábitos de búsqueda digital y sus expectativas frente a una plataforma de este estilo, y la segunda encuesta dirigida a los empresarios locales, con el enfoque de adoptar herramientas digitales. Los resultados parciales de las dos encuestas aportan a la construcción del Product Backlog y la priorización de los módulos a desarrollar en los siguientes sprints.

A la fecha se cuenta con el desarrollo 100% funcional de casi 5 módulos de la plataforma, en donde se ven integradas las funcionalidades propuestas para cada uno de los roles y la interacción que los usuarios pueden tener con cada una de las empresas y emprendimientos, se encuentra en fase final el sprint 04.

Referencias

[1] Michelle, K., Reyes, V., Meléndez Caudillo, A. I., Enrique, L., Fuentes, V., Michelle, M., Morales, S., Viianto, L. A., & García Barragán, F. (2022). Las Aldeas Digitales y su Implementación en Guanajuato. JÓVENES EN LA CIENCIA, 16, 1–15. https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3576

[2] López Ayala, V. M., González Rodríguez, S., & Reza Villalpando, A. (2016). El networking y el e-commerce en los dispositivos móviles como una estrategia para impulsar la competitividad en las Pymes mexicanas. Horizontes de la Contaduría, (4), 119-141.

[3] Garzón Zambrano, A. M. (2024). Ruta de mejoramiento orientada a la transformación digital de 2 MiPyMEs vinculadas al Centro de Desarrollo Empresarial – CDE de la UNAB [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Bucaramanga].

[4] Montaño Núñez, J. A. (2021). Transformación digital e innovación de las PYMES en Colombia y el E-commerce como alternativa al comercio tradicional [Trabajo de grado, 71 Diplomado en Gerencia Estratégica y Transformación Digital with SAP S4/HANA]. Universidad Militar Nueva Granada.

[5] W. Mogollón, S. Suarez. red de conectividad digital con enfoque en la innovación tecnológica para las MiPymes de Villa de San Diego de Ubaté. 2025.

[6] K. Schwaber y J. Sutherland, *La Guía Scrum: La guía definitiva de Scrum: Las reglas del juego*. Scrum.org, 2020. [En línea]. Disponible en: https://scrumguides.org

[7] M. Tamayo y Tamayo, *El proceso de la investigación científica*, 4.ª ed. Ciudad de México, México: Limusa, 2004.

[8] R. Hernández-Sampieri y C. Mendoza, *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Ciudad de México, México: McGraw-Hill, 2018.

[9] F. G. Arias, *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica*, 6.ª ed. Caracas, Venezuela: Episteme, 2012.

Respuesta empática para robots sociales: una propuesta basada en modelo de empatía

1st Sebastián Solorzano-Paipa
Estudiante de Ingeniería Electrónica
Universidad Santo Tomás, Colombia
Bogotá D.C., Colombia
solorzanosebastian@usantotomas.edu.co

2nd J. Diego Báez-Guerrero
Estudiante de Ingeniería Electrónica
Universidad Santo Tomás, Colombia
Bogotá D.C., Colombia
juanbaezg@usantotomas.edu.co

3rd M. Alejandra Pinzón-Farfán
Estudiante doctoral DISA
Universidad Andrés Bello
Santiago, Chile
m.pinzonfarfan@uandresbello.edu

4th Valentina Pérez-Fernández
Estudiante de Ingeniería Electrónica
Universidad Santo Tomás, Colombia
Bogotá D.C., Colombia
valentinaperezf@usantotomas.edu.co

5th Juan D. Avendaño-Garzón
Ingeniero Electrónico
Universidad Santo Tomás, Colombia
Bogotá D.C., Colombia
juandavid29171@gmail.com

6th Wladimir Toro-Tovar
Docente de Ingeniería Electrónica
Universidad Santo Tomás
Bogotá D.C., Colombia
billytoro@usta.edu.co

***Resumen*—Se presenta el desarrollo de un sistema de HIR (interacción humano-robot) orientado a entornos de robótica social, con énfasis en la asistencia a personas mayores. El trabajo se enmarca en los lineamientos de RoboCup@Home, donde se prioriza la integración de soluciones que mejoren la calidad de vida mediante robots de servicio autónomos. La propuesta consiste en un modelo de respuesta empática que permite al robot interpretar estados emocionales del usuario y generar interacciones contextualizadas y naturales. Para ello, se integran dos módulos principales: un sistema de visión computacional para el reconocimiento de expresiones faciales y un módulo de procesamiento de señales de voz basado en características de amplitud y frecuencia. La información obtenida se fusiona en un sistema de decisión que adapta el comportamiento del robot en tiempo real. La solución fue implementada en plataformas robóticas como Pepper y MILO, validada experimentalmente y presentada en RoboCup 2025.**

***Palabras clave*—Interacción Humano-Robot, Robótica Social, Modelo de Empatía, Visión Computacional, Procesamiento de Voz**

I. Introducción

La robótica social se ha consolidado como un área de gran interés dentro de la ingeniería, enfocándose en el desarrollo de robots autónomos capaces de interactuar, asistir y convivir con los seres humanos en diferentes entornos [1]. Este tipo de tecnologías busca apoyar actividades cotidianas mediante sistemas inteligentes que permitan facilitar tareas repetitivas o de alto esfuerzo, especialmente en poblaciones con limitaciones físicas como los adultos mayores [2]. En este contexto, la Interacción Humano-Robot (HRI, por sus siglas en ingles) representa uno de los principales desafíos para lograr una integración natural y eficiente entre las personas y los sistemas robóticos en escenarios domésticos o de asistencia social [3].

A pesar de los avances recientes en robótica social, los robots presentan actualmente limitaciones relacionadas con la interpretación adecuada de emociones humanas y la generación de respuestas sociales acordes al contexto de interacción [4]. Estas limitaciones generan una barrera empática entre el ser humano y la máquina, afectando la naturalidad de la comunicación y reduciendo la capacidad de adaptación del robot frente a diferentes estados emocionales del usuario [5]. Debido a esto, surge la necesidad de desarrollar modelos de empatía computacional que permitan mejorar la comprensión emocional dentro de los sistemas HRI, favoreciendo una interacción más cercana, intuitiva y adaptativa [1].

Con el propósito de contribuir al desarrollo de soluciones orientadas a la HRI, este trabajo integra diferentes áreas tecnológicas, entre las que destacan la Visión Computacional (CV, por sus siglas en inglés) y el procesamiento de voz. La CV permite al robot interpretar expresiones faciales y estimar emociones a partir de características visuales, mientras que el procesamiento de voz facilita el análisis de parámetros asociados al habla, como la amplitud y la frecuencia, permitiendo complementar la interpretación emocional del usuario [6]. Para la integración de estos módulos se emplea ROS (Sistema operativo Robotico), el cual posibilita la comunicación entre procesos mediante nodos distribuidos, permitiendo la ejecución simultánea de múltiples tareas relacionadas con percepción, análisis e interacción [3].

Asimismo, durante el proceso de clasificación a RoboCup@Home 2025, el sistema fue presentado como una propuesta orientada al fortalecimiento de los procesos de HRI mediante la plataforma robótica Pepper. Posteriormente, con el objetivo de validar el modelo en escenarios reales de interacción, el sistema fue implementado y evaluado durante RoboCup@Home 2025 utilizando la plataforma robótica MILO, desarrollada por el equipo binacional AndesRobot

conformado por la Universidad Santo Tomás y la Universidad Andrés Bello [2]. Las pruebas realizadas permitieron identificar limitaciones asociadas a condiciones del entorno, como ruido, variaciones de iluminación y diferencias en el contraste visual facial, factores que afectaron parcialmente el desempeño del reconocimiento emocional y la precisión del sistema durante algunos escenarios de interacción [5] [6].

La estructura de este artículo es la siguiente: en la Sección II, se detalla la metodología y arquitectura del modelo de empatía computacional basado en visión y voz. En la Sección III se especifican las características de las plataformas robóticas. En la Sección IV, se describe el desarrollo y la implementación del sistema en las plataformas Pepper y MILO durante la competencia RoboCup@Home 2025. En la Sección V, se presentan los resultados obtenidos y el análisis de las limitaciones del sistema. Finalmente, en la Sección VI, se exponen las conclusiones y trabajos futuros.

II. Metodología

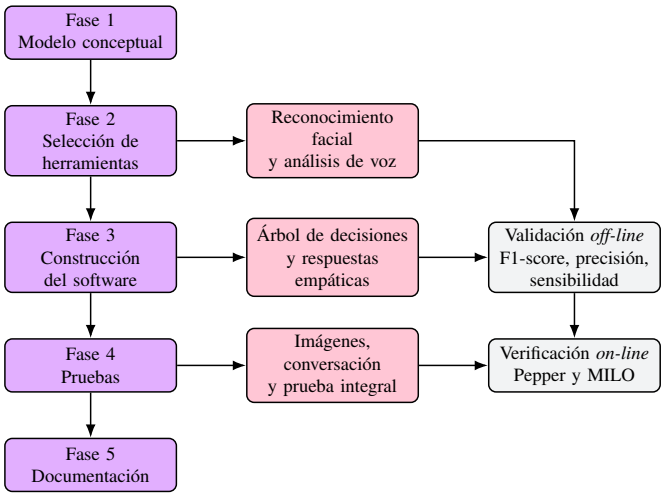


Figura 1. Esquema metodológico propuesto para el desarrollo y validación del sistema de interacción humano-robot basado en reconocimiento emocional.

En la figura 1 se presenta el flujo de la metodología, enfocándose en el diseño e integración de un modelo de respuesta empática para HRI, utilizando CV, procesamiento de voz y una arquitectura basada en ROS. Asimismo, se implementaron pruebas sobre las plataformas Pepper y MILO para evaluar el desempeño del sistema en escenarios controlados de robótica social.

III. Plataformas Robóticas

A. *Pepper*

Esta plataforma robótica es un robot humanoide fabricado por la compañía Softbank Robotics, diseñada principalmente para resolver tareas de ámbito social. En las tablas I y II se presentan las especificaciones técnicas del robot y las características de la cámara incorporada.

Tabla I
Especificaciones del hardware utilizado en la plataforma robótica Pepper

Parámetro	**Valor**
Procesador	Atom E3845
CPU	Quad core
Velocidad de reloj	1.91 GHz
Memoria RAM	4 GB DDR3
Memoria Flash	8 GB eMMC
Micro SDHC	16 GB

Tabla II
Especificaciones técnicas de la cámara OV5640 utilizada en Pepper

Categoría	**Parámetro**	**Valor**
Cámara	Modelo	OV5640
	Tipo	Sensor CMOS System-on-a-Chip
Arreglo de imagen	Resolución	5 MP
	Formato óptico	1/4 inch
	Píxeles activos	2592 × 1944
Sensibilidad	Tamaño de píxel	1.4 μm × 1.4 μm
	Rango dinámico	68 dB @ 8x gain
	Relación señal/ruido	36 dB
	Responsividad	600 mV/Lux-sec
Salida	Resolución de salida	640 × 480 @ 30fps
	Formato de datos	YUV y RGB
	Tipo de obturador	Rolling shutter
Vista	Campo de visión	67.4° DFOV
	Tipo de enfoque	Auto focus

B. *MILO*

La plataforma robótica de la figura 2 es desarrollo propio del equipo AndesRobot, fue diseñada y construida bajo el concepto de *Low Cost* y fácil replicabilidad. Si bien en el momento en que se desarrolló este trabajo el robot no contaba con una unidad de procesamiento embebida, se utilizó una estación de trabajo externa, presentando sus características en la tabla III.



Figura 2. Plataforma robótica MILO.

Tabla III
ESPECIFICACIONES DEL HARDWARE UTILIZADO EN LA PLATAFORMA ROBÓTICA MILO

Parámetro	**Valor**
Procesador	AMD Ryzen 5 5500U
CPU	12 CPUs (6 núcleos / 12 hilos)
Velocidad de reloj	2.1 GHz
Memoria RAM	8 GB
Memoria Flash	237 GB
Almacenamiento	237 GB

IV. DESARROLLO

A. *Diseño del software de respuesta empático*

*1) **Sistema de reconocimiento de voz**:* Para la determinación del estado emocional durante la HRI, se propone que el robot establezca la conversación por medio de preguntas contextualizadoras y naturales del idioma español como "¿Cómo estás?", buscando obtener respuestas directas con emociones básicas del tipo "feliz" o "triste". Las palabras identificadas son utilizadas posteriormente dentro del sistema de decisión para complementar el análisis emocional y generar respuestas empáticas acordes al contexto de interacción.

*a) **Servicio ALVoiceEmotionAnalysis**:* Para el análisis emocional de la voz se utilizó el servicio ALVoiceEmotionAnalysis integrado en la plataforma robótica Pepper. Este servicio permite procesar características asociadas al habla, como frecuencia e intensidad de la voz, facilitando la identificación de patrones emocionales relacionados principalmente con estados de felicidad y tristeza. Asimismo, el sistema utiliza imágenes estéreo para enfocar la captura de voz sobre la persona ubicada frente al robot, reduciendo parcialmente el impacto del ruido presente en el entorno y mejorando la estabilidad del reconocimiento emocional durante la interacción.

*2) **Sistema de Visión Computacional**:* Con el fin de realizar la identificación y extracción de características faciales, se realizó como primera instancia la construcción del dataset, compuesto por 370 imágenes de rostros humanos, considerando variaciones de iluminación, posición facial y distancia respecto a la cámara para mejorar la generalización del modelo. Las imágenes fueron distribuidas en tres clases: alegría, tristeza y no reconocido; esta última fue incorporada con el propósito de mejorar la capacidad del modelo para identificar expresiones faciales que no correspondieran directamente a las emociones principales trabajadas.

Posteriormente, el sistema fue entrenado mediante una Red Neuronal Convolucional (CNN) específicamente el modelo YOLOv8. Durante el entrenamiento se configuraron diferentes parámetros relacionados con el número de épocas, optimizador y validación del modelo, permitiendo obtener métricas de desempeño orientadas a evaluar la precisión y capacidad de reconocimiento emocional dentro de entornos de robótica social [1].

B. *Integración del sistema*

Debido a la utilización de ROS1 en su versión Noetic dentro de la plataforma Pepper, fue necesario implementar el entorno de desarrollo sobre Ubuntu 20.04, permitiendo garantizar compatibilidad entre librerías, dependencias y servicios utilizados durante la ejecución del modelo empático. A partir de esta arquitectura se integraron los módulos de reconocimiento facial, procesamiento de voz y generación de respuestas mediante nodos de ROS, facilitando la comunicación entre sensores, algoritmos y procesos de HRI.

De acuerdo con lo anterior, para aprovechar los recursos de ROS, se implementó una arquitectura cliente-servidor para el sistema de respuesta empática con el propósito de reducir las limitaciones de hardware presentes en la plataforma Pepper. En este esquema, Pepper funcionó como cliente utilizando sus cámaras, micrófonos y sensores integrados para la captura de información, mientras que un computador externo actuó como servidor encargado del procesamiento del modelo de reconocimiento emocional y la ejecución de los algoritmos de CV. Esta implementación permitió mejorar el desempeño computacional del sistema y facilitar la adaptación del modelo a diferentes plataformas robóticas compatibles con ROS.

El modelo de empatía fue implementado previamente en pruebas controladas realizadas mediante la plataforma robótica Pepper en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Santo Tomás (Bogotá D.C., Colombia), siendo posteriormente integrado en MILO durante la competencia.

Durante las pruebas realizadas en RoboCup@Home 2025, el sistema permitió generar respuestas adaptativas basadas principalmente en emociones de felicidad y tristeza, favoreciendo la naturalidad de la HRI en escenarios de acompañamiento y asistencia.

C. *Determinación de la respuesta empática*

Como etapa final para la determinacion de la respuesta empatica se sigue un proceso de los siguientes dos pasos:

- **Algoritmo de ponderación:** Para integrar los resultados obtenidos de forma individual por el estado emocional, tanto por CV como por audio, se emplea el Algoritmo 1:

Algoritmo 1 Clasificador de emoción por votación ponderada

Entrada: $facial$, voz, $palabras$
Salida: $emocion\_detectada$

$pesos \leftarrow \{0:0,\ 1:0,\ 2:0\}$
$pesos[facial] \mathrel{+}= 0.45$
$pesos[voz] \mathrel{+}= 0.35$
$pesos[palabras] \mathrel{+}= 0.20$
$emocion\_detectada \leftarrow \arg\max_k\ pesos[k]$
return $emocion\_detectada$

- **Máquina de estados para la respuesta:** La generación de respuestas empáticas según la emoción detectada por el servicio *ALVoiceEmotionAnalysis*, se implementó la máquina de estados descrita en el Algoritmo 2.

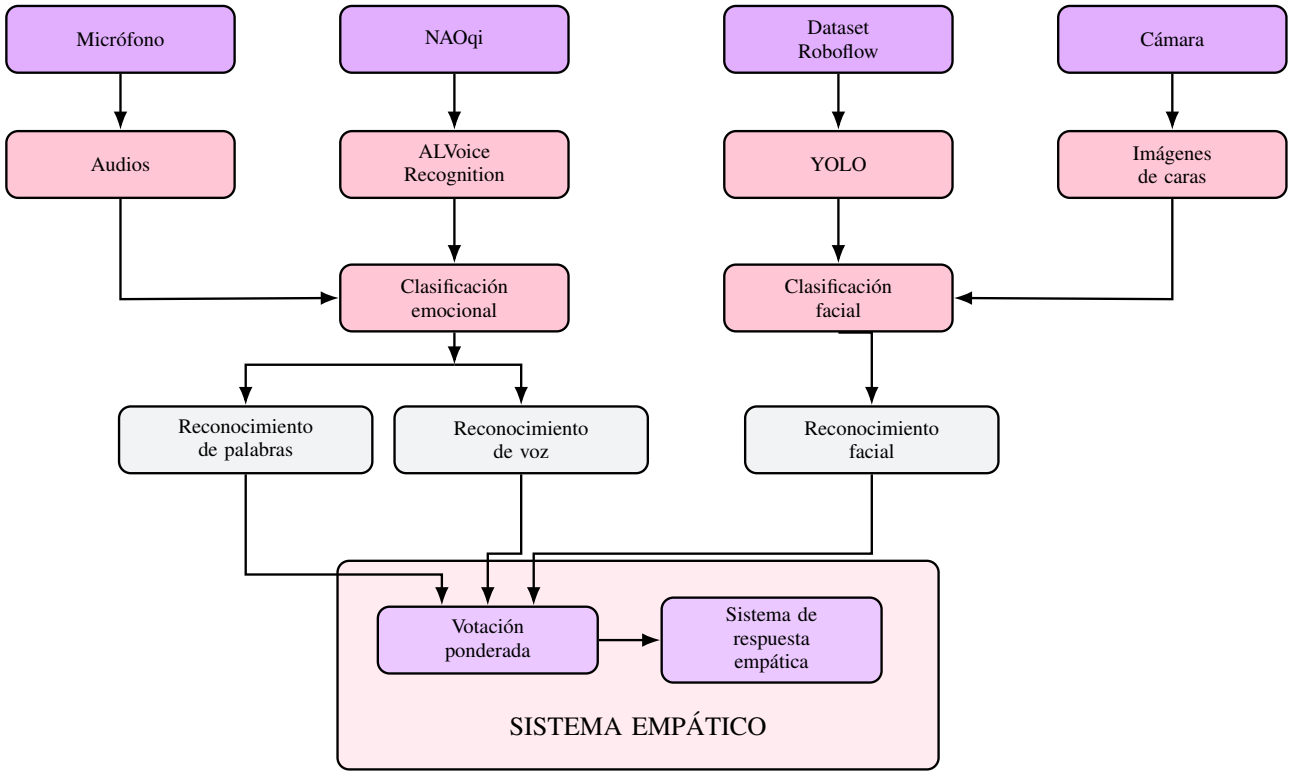


Figura 3. Arquitectura general del sistema empático basado en reconocimiento de voz, palabras y rostro.

Algoritmo 2 Máquina de estados para respuesta empática

Entrada: $emotion\_data$, $emociones\_detectadas$
Salida: $mensaje\_final$

if $emotion\_data \neq \emptyset$ **then**
  $indice \leftarrow emotion\_data[0][0]$
  $nivel \leftarrow emotion\_data[0][1]$
  $emociones\_detectadas[indice] \mathrel{+}= 1$
  if $indice = 3$ **then**
    `say("¡Parece que estás contento, me alegra!")`
  else if $indice = 4$ **then**
    `say("Oh, noto que estás triste. Estoy aquí para apoyarte.")`
  end if
end if
$esperar(2)$
$predominante \leftarrow \arg\max_k \ emociones\_detectadas[k]$
if $predominante = 3$ **then**
  $mensaje\_final \leftarrow$ "En general, parecías feliz durante la conversación."
else if $predominante = 4$ **then**
  $mensaje\_final \leftarrow$ "En general, parecías triste durante la conversación."
else if $predominante \neq \emptyset$ **then**
  $mensaje\_final \leftarrow$ "Detecté varias emociones sin predominante clara."
else
  $mensaje\_final \leftarrow$ "No pude detectar ninguna emoción."
end if
return $mensaje\_final$

V. Resultados

Durante las pruebas realizadas se identificaron limitaciones asociadas a condiciones de iluminación y ruido en entornos no controlados. Las variaciones lumínicas afectaron el reconocimiento facial y la detección de patrones visuales utilizados durante el análisis emocional, mientras que las interferencias acústicas redujeron parcialmente la precisión del procesamiento de voz, basado en parámetros como frecuencia, intensidad y tonalidad.

Las principales limitaciones de procesamiento de la plataforma robótica Pepper se encuentran vinculadas a la Tabla I, donde se observan restricciones relacionadas con capacidad de memoria y procesamiento para ejecutar modelos de CV en tiempo real. A continuación se listan las características técnicas de la plataforma robótica de las pruebas realizadas:

- Cámara: cámara integrada OV5640
- Micrófono: micrófonos genéricos con características de frecuencia aproximada: 200 Hz a 7 kHz y sensibilidad: menos 12 dBV

La utilización de la arquitectura cliente-servidor permitió aprovechar los sensores integrados de Pepper mientras el procesamiento de inferencia y reconocimiento emocional era ejecutado externamente, facilitando la integración del modelo de empatía computacional en diferentes plataformas robóticas orientadas a HRI.

A. *Identificación emocional y generación de respuestas*

El sistema desarrollado integró reconocimiento facial y análisis de voz para identificar emociones asociadas principalmente a tristeza y alegría. A partir de esta detección, se generaron respuestas mediante un sistema de decisión orientado a adaptar la interacción del robot según el estado emocional identificado. Las figuras 5 y 4 muestran ejemplos del proceso de reconocimiento emocional durante las pruebas realizadas.



Figura 4. Salida en consola SSH del sistema de reconocimiento emocional implementado sobre la plataforma Pepper.



Figura 5. Detección emocional de una fotografía durante pruebas experimentales. Adaptado de [7].

B. *Evaluación del modelo de reconocimiento emocional*

Con el objetivo de analizar el desempeño del modelo de reconocimiento emocional implementado mediante YOLOv8, se realizaron diferentes pruebas utilizando métricas de validación *off-line* orientadas a evaluar la capacidad de clasificación del sistema sobre las emociones seleccionadas: alegría, tristeza y no reconocido [4]. Estas pruebas permitieron analizar el comportamiento del modelo durante el entrenamiento, así como la distribución de los datos utilizados y el desempeño obtenido durante la clasificación emocional.

La Tabla IV presenta los parámetros compartidos durante las diferentes pruebas realizadas por el sistema de reconocimiento emocional. En todas las pruebas se mantuvo la misma estructura de almacenamiento, procesamiento y clasificación emocional, permitiendo evaluar la estabilidad del modelo frente a diferentes condiciones visuales y escenarios de HRI.

Tabla IV
PARÁMETROS COMUNES EN LOS CUADROS DE ANÁLISIS EMOCIONAL.

Prueba	Parámetro	Valor
Niño con expresión triste	Ruta de la imagen	catkin_ws/src/Pepper_controller/scripts/imagen.jpg
	Directorio de guardado	runs/detect/predict
	Leyenda de emociones	0=Tristeza, 1=Alegría, 2=No reconocido
Hombre alegre tono de piel oscuro	Ruta de la imagen	catkin_ws/src/Pepper_controller/scripts/imagen.jpg
	Directorio de guardado	runs/detect/predict
	Leyenda de emociones	0=Tristeza, 1=Alegría, 2=No reconocido
Joven con expresión de sorpresa	Ruta de la imagen	catkin_ws/src/Pepper_controller/scripts/imagen.jpg
	Directorio de guardado	runs/detect/predict
	Leyenda de emociones	0=Tristeza, 1=Alegría, 2=No reconocido
Interacción multimodal "feliz"	Ruta de la imagen	—
	Directorio de guardado	—
	Leyenda de emociones	0=Tristeza, 1=Alegría, 2=No reconocido
Imagen con dos personas	Ruta de la imagen	catkin_ws/src/Pepper_controller/scripts/imagen.jpg
	Directorio de guardado	runs/detect/predict
	Leyenda de emociones	0=Tristeza, 1=Alegría, 2=No reconocido
Persona con gafas	Ruta de la imagen	catkin_ws/src/Pepper_controller/scripts/imagen.jpg
	Directorio de guardado	runs/detect/predict
	Leyenda de emociones	0=Tristeza, 1=Alegría, 2=No reconocido
Condiciones de baja luz	Ruta de la imagen	catkin_ws/src/Pepper_controller/scripts/imagen.jpg
	Directorio de guardado	runs/detect/predict
	Leyenda de emociones	0=Tristeza, 1=Alegría, 2=No reconocido
Interacción multimodal "reinicio"	Ruta de la imagen	—
	Directorio de guardado	—
	Leyenda de emociones	0=Tristeza, 1=Alegría, 2=No reconocido

La figura 6 presenta la curva F1-Confidence obtenida durante el entrenamiento del modelo. Esta métrica permitió analizar el comportamiento de precisión y sensibilidad respecto a los niveles de confianza del sistema, evidenciando un mejor desempeño para las clases asociadas a alegría y tristeza dentro del conjunto de entrenamiento.

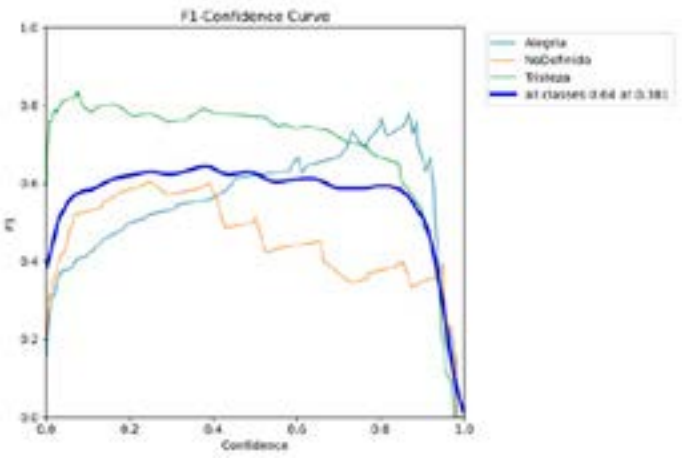


Figura 6. Curva F1-Confidence obtenida durante el entrenamiento del modelo de reconocimiento emocional.

Por otro lado, la figura 7 muestra la distribución espacial y estadística del conjunto de datos utilizado durante el en-

trenamiento. Estas gráficas permitieron analizar la cantidad de instancias por emoción y la distribución de los cuadros delimitadores utilizados por el modelo para identificar rostros faciales.

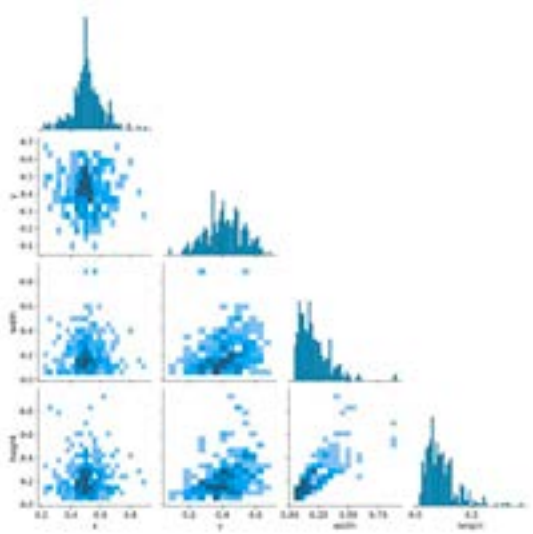


Figura 7. Distribución de datos y localización espacial de las muestras utilizadas durante el entrenamiento.

Asimismo, la figura 8 presenta el análisis estadístico de correlación entre variables espaciales relacionadas con altura, ancho y posición de los rostros detectados. Este análisis permitió identificar el comportamiento geométrico de las muestras utilizadas dentro del dataset.

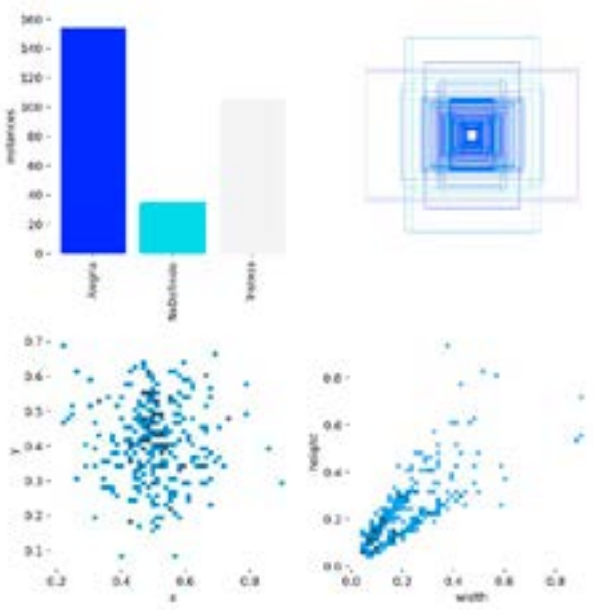


Figura 8. Análisis estadístico y distribución geométrica de las muestras utilizadas en el dataset.

Finalmente, la figura 9 presenta la matriz de confusión normalizada obtenida durante la validación del modelo. Los resultados evidencian una mayor precisión en la clasificación de emociones asociadas a alegría y tristeza, mientras que la categoría "no reconocido" presentó mayores variaciones debido a condiciones del entorno y limitaciones relacionadas con iluminación, expresiones faciales y contraste visual.

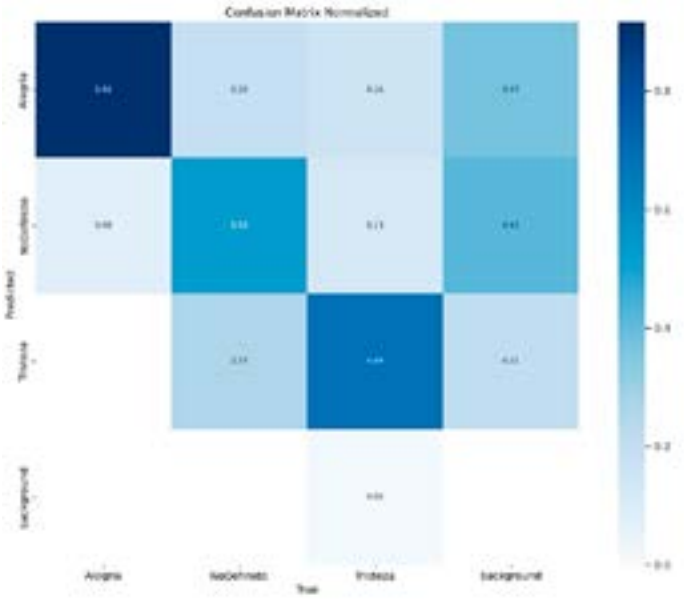


Figura 9. Matriz de confusión normalizada obtenida durante la validación del modelo emocional.

C. *Desempeño del sistema*

La validación del modelo se realizó mediante pruebas experimentales sobre las plataformas robóticas Pepper y MILO, evaluando el comportamiento del sistema tanto en entornos controlados como en escenarios dinámicos de HRI. Adicionalmente, se emplearon métricas de evaluación como F1-score para analizar el desempeño del reconocimiento emocional.

Las pruebas realizadas con la plataforma Pepper permitieron verificar el funcionamiento del modelo empático en condiciones controladas, evidenciando estabilidad durante la detección emocional y la generación de respuestas adaptativas. Sin embargo, las limitaciones de hardware asociadas a la cámara y al micrófono integrado afectaron parcialmente algunos procesos de reconocimiento facial y procesamiento de voz.

La plataforma robótica MILO fue utilizada durante RoboCup@Home 2025 para validar el modelo en escenarios reales de HRI. Durante las pruebas realizadas, el sistema presentó un mejor desempeño en la captura de audio e imagen; no obstante, factores del entorno como ruido, iluminación y condiciones dinámicas de interacción afectaron parcialmente la precisión del reconocimiento emocional y la estabilidad de algunas respuestas empáticas.



Figura 10. Plataforma robótica Pepper utilizada durante pruebas preliminares del modelo empático.

D. Análisis de interacción humano-robot

A pesar de las limitaciones identificadas durante las pruebas realizadas en escenarios dinámicos, el modelo empático permitió evidenciar una interacción más natural entre los usuarios y las plataformas robóticas utilizadas. La integración del reconocimiento emocional permitió adaptar parcialmente las respuestas generadas por el robot de acuerdo con el estado emocional detectado, favoreciendo una comunicación más fluida durante la HRI.

Tanto en las pruebas realizadas con Pepper en entornos controlados como durante RoboCup@Home 2025 utilizando la plataforma MILO, el sistema permitió fortalecer procesos de comunicación orientados a robótica social y asistencia a personas mayores, evidenciando el potencial de este tipo de modelos para aplicaciones de acompañamiento e interacción adaptativa.



Figura 11. HRI utilizando la plataforma Pepper durante pruebas del modelo empático.

VI. Conclusiones

En este trabajo se logró la integración de un modelo conceptual empático aplicable a robots sociales, orientado a la interpretación de estados emocionales mediante sistemas de percepción multimodal. Para ello, se desarrollaron modelos de clasificación de emociones basados en el entrenamiento con conjuntos de datos de imágenes y audios, permitiendo reconocer señales afectivas asociadas principalmente a expresiones faciales y características de la voz. Los resultados obtenidos en condiciones controladas evidenciaron un desempeño adecuado del sistema, con niveles favorables de precisión en el reconocimiento emocional, tiempos de inferencia reducidos y una confiabilidad aceptable en la integración multimodal mediante votación ponderada.

Además, la arquitectura propuesta se plantea como una alternativa de bajo costo computacional, al favorecer modelos ligeros y una distribución eficiente de las tareas de procesamiento, lo que facilita su implementación en plataformas robóticas con recursos limitados. No obstante, las pruebas también mostraron limitaciones en escenarios reales de operación, especialmente ante variaciones de iluminación, ruido ambiental y restricciones de hardware, por lo que futuras iteraciones deberán enfocarse en ampliar los conjuntos de datos, mejorar la robustez del procesamiento de audio e imagen, y validar el sistema en entornos más dinámicos y no controlados.

References

[1] M. I. Gómez-León, "Development of empathy through social emotional artificial intelligence," *Papeles del Psicólogo*, vol. 43, no. 3, pp. 218–224, 2022.

[2] A. Pinzón-Farfán, D. López, and J. A. Rivera-Gutiérrez, *Andesrobot team description paper for robocup@home 2026*, RoboCup@Home Team Description Paper, Universidad Andrés Bello (Chile) and Universidad Santo Tomás (Colombia), 2025.

[3] N. F. Garzón Alvarez and J. C. Romero Moreno, "Implementación de un sistema de interacción humano-máquina que emplee lenguaje multimodal en una plataforma robótica basada en ros," Tesis doctoral, Ph.D. dissertation, Universidad Santo Tomás, n.d.

[4] P. Ekman and W. V. Friesen, "Constants across cultures in the face and emotion," *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 17, no. 2, pp. 124–129, 1971. DOI: 10.1037/h0030377. [Online]. Available: https://gunfreezone.net/wp-content/uploads/2008/12/Universal-Facial-Expressions-of-Emotions1-2015_03_12-21_10_38-UTC.pdf.

[5] P. Ekman and W. V. Friesen, *Unmasking the Face: A Guide to Recognizing Emotions from Facial Expressions*. Malor Books, 2003, ISBN: 978-1883536367. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Unmasking_the_Face.html?id=TukNoJDgMTUC.

[6] A. Lausen and K. Hammerschmidt, "Emotion recognition and confidence ratings predicted by vocal stimulus type and prosodic parameters," *Humanities and Social Sciences Communications*, vol. 7, no. 2, 2020. DOI: 10.1057/s41599-020-0499-z. [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/s41599-020-0499-z.

[7] PNGTree, *Sad little boy cry green little*, https://es.pngtree.com/freepng/sad-little-boy-cry-green-little_20566816.html, Imagen digital consultada el 11 de mayo de 2026, 2025.

MangroveSense IoT: Intelligent Monitoring of Mangrove Ecosystems

Cristian Enrique Ortiz Villarreal
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
cenriqueortiz@unibarranquilla.edu.co

Pau Daniel Chavarro Mercado
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
pchavarro@unibarranquilla.edu.c

Santiago De Jesús Cuesta Novoa,
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
sdcuesta@unibarranquilla.edu.co

Jesús Daniel Verbel Forero
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
jverbel@unibarranquilla.edu.co

Luz E. Marquez
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
lmarquez@unibarranquilla.edu.co

Lourdes De Ávila,
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
ldavila@unibarranquilla.edu.co

Abstract — The mangrove ecosystems of the Atlántico department — particularly Ciénaga de Mallorquín — face progressive deterioration driven by water pollution, deforestation, sedimentation, and anthropogenic intervention. This degradation disrupts ecological balance, threatens biodiversity, and undermines the economic activities of local communities. The absence of accessible monitoring systems limited the acquisition of real-time environmental data, hindering the detection of critical changes and evidence-based decision-making for ecosystem conservation. In response to this problem, through a mixed-methods approach guided by a pragmatic paradigm, a telematic system prototype was developed based on Internet of Things technologies, web development, and artificial intelligence, aimed at monitoring environmental variables such as pH, temperature, humidity, turbidity, and total dissolved solids. The system integrated ESP32 microcontrollers with LoRa wireless communication organized into a wireless sensor network, which transmitted data to a Gateway and subsequently to a web server developed in Flask, connected to a MySQL database for storage and management. Information was presented through an interactive Dashboard and an AI-assisted ChatBot, facilitating its interpretation by end users. Functional tests of the sensors and the system were subsequently carried out for further validation. Field and laboratory tests transmitted readings with a high consistency rate, while the Dashboard displayed real-time updates with no critical latency issues. Early results showed the prototype proved capable of measuring data in both controlled and field contexts, and that the ChatBot was able to access this data and provide assistance according to context, even when spelling errors were present during interaction.

Keywords —Internet of Things (IoT), Environmental Monitoring, Mangroves, Telemetry, Artificial Intelligence (AI).

I. Introduction

Mangroves are coastal ecosystems of high ecological, economic, and climatic relevance. Although they represent only 1% of tropical forests, they fulfill essential ecological functions such as coastal protection, sediment filtration, excess nutrient removal, carbon capture, and biodiversity support. Mangroves serve as nurseries for approximately 75% of commercial fish and shellfish species. However, these ecosystems are threatened by human activities and phenomena associated with climate change. These factors have caused the disappearance of nearly one-fifth of mangrove cover worldwide. Climate change further worsens this situation: the year 2024 was the hottest on record, with an average increase of 1.28 °C above pre-industrial reference values.

In the department of Atlántico, the Ciénaga de Mallorquín represents a critical case of environmental degradation. Factors such as water pollution, sedimentation, and urban expansion have significantly affected their ecological balance. One of the main limitations in addressing this problem is the absence of continuous monitoring systems that provide reliable real-time data to guide the appropriate actions of regulatory agencies and the Asoplaya community, to control and mitigate the changes that are detrimental to the proper care and conservation of these ecosystems.

The Internet of Things (IoT) presents itself as a viable solution, enabling the automatic collection and transmission of environmental data. In this context, the present work proposes Mangrove Sense-IoT, a telematic system that integrates IoT technologies, web development, and artificial intelligence for environmental monitoring and conservation-oriented decision-making.

II. Research Problem

The department of Atlántico is home to various mangrove ecosystems in areas such as the Ciénaga de Mallorquín, Piojó, Puerto Colombia, Luruaco, Tubará, and Juan de Acosta. In Colombia, the loss of rainforests increased from 0.07 Mha in 2023 to 0.10 Mha in 2024, including mangrove areas [1]. At the national level, mangrove coverage decreased from approximately 331,356 hectares in 1984 to 283,419 hectares in 2020 [2].

The Ciénaga de Mallorquín, located north of the Barranquilla metropolitan area, concentrates several degradation factors: road construction, agricultural activities, contamination from leached metals, deforestation, sedimentation, filling of water buffer zones, wastewater discharge, and urban expansion [3]. In the El Tambo area, where the Association of Fishermen of the Corregimiento de La Playa (Asoplaya) is based, communities depend on artisanal fishing for their livelihoods. The progressive deterioration of the ecosystem has reduced fish populations and compromised local food security [4], while the absence of reliable environmental data prevents entities such as Asoplaya from accurately assessing the state of the ecosystem and acting in a timely manner.

This technological gap is at the core of the problem: communities settled in mangrove areas lack real-time monitoring systems that would allow them to identify degradation trends, document contamination events, and make informed decisions about sustainable practices. Existing solutions, in addition to being largely inaccessible, lack scalable data architectures that ensure the structured storage of time series data, efficient processing, and integration with georeferenced information.

Based on the above, the following research question emerges:

How can a telematic system be developed for monitoring environmental variables in the mangrove ecosystems of the department of Atlántico?

III. Rationale

The development of this project is of vital importance for the communities of the department of Atlántico, particularly those settled around the Ciénaga de Mallorquín, which depend directly on the health of this ecosystem for their livelihoods. Access to environmental telemetry data would allow them to direct their activities toward mangrove restoration and the protection of the species on which they rely. In this regard, the project seeks to actively involve Asoplaya in the collection, access, and interpretation of environmental data, strengthening citizen science, and a sense of community belonging toward the ecosystem.

Furthermore, the continuous monitoring of variables such as pH, turbidity, water temperature, and total dissolved solids (TDS) enables the early detection of contamination events and the generation of a historical database for identifying seasonal trends, anomalies, and degradation patterns. This information constitutes a foundational scientific tool for evidence-based ecosystem restoration strategies.

Additionally, the use of IoT technologies — and LoRa in particular — is especially well-suited to the conditions of Atlántico, given its transmission range of up to 15–20 km, low energy consumption compatible with solar power, signal penetration through dense vegetation, and ability to operate in areas without cellular coverage or with difficult access.

Finally, the proposed solution aligns with the United Nations Sustainable Development Goals: SDG 2 (Zero Hunger), SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), SDG 13 (Climate Action), SDG 14 (Life Below Water), and SDG 15 (Life on Land). Likewise, the project falls within the framework of Colombia's National Policy on Inland Wetlands and national climate change adaptation strategies, serving as a practical tool for implementing these policies at the local level.

IV. Theoretical Framework

A. *Internet of Things (IoT):*

IoT refers to the vast interconnected network of computing devices, such as sensors and everyday objects, that exchange data with the goal of connecting humans with machines and intelligent technologies [5].

B. *Wireless Technologies:*

These technologies enable the transmission of data captured by sensor nodes without the use of cables. Factors such as communication range, transmission speed, energy consumption, costs, and scalability are determining factors when choosing an appropriate technology [6].

C. *Telemetry:*

Telemetry is defined as the automated collection and transmission of data and measurements from remote sources to a central system for analysis [7].

D. *Chatbot:*

A chatbot is a computer program that simulates and processes human conversations, allowing humans to interact with digital devices as if they were communicating with a real person [8].

E. *Ecological Thresholds:*

An ecological threshold is the point at which a comparatively small environmental change triggers an abrupt and disproportionately large ecological response [9].

V. State of the Art

This section presents a selection of projects, both national and international, that share methodological or functional similarities with the present work. These references cover cases related to the use of web dashboards and/or IoT prototypes, both at the national and international level.

A. International Projects:

Boonrat et al. [10] designed an IoT network focused on monitoring greenhouse gases in mangroves using LoRa technology. Their proposal included nodes with SCD41 sensors that measure carbon dioxide, temperature, humidity, and heat index. The prototype was tested in a mangrove in Phuket, Thailand, where, using two lithium-ion batteries, the nodes collected data every 10 minutes over five days. Transmission to a gateway located at a research station was successfully carried out via LoRa, enabling continuous cloud-based analysis. The results demonstrated reliable and accurate readings even under adverse weather conditions, underscoring the effectiveness of IoT and LoRa for environmental monitoring in mangroves.

Usman et al. [11] implemented a Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) in indonesia to monitor water levels in peatlands, focusing on overcoming the limited cellular coverage in remote areas. The system employed LoRaWAN gateways and ChirpStack servers, integrating a time-series database and an interface for visualizing measurements.

B. National Projects:

Arbeláez et al. [12] created a web application for monitoring air quality in the municipality of Segovia, Antioquia — an area affected by intensive mining activities that lacked an environmental surveillance system. The system was developed using C#, HTML5, CSS, and JavaScript for the interface, with SQL Server as the database management system. The goal was to facilitate access to information and encourage discussion of solutions in the face of potential environmental impacts.

Colmenares-Quintero et al. [13] developed a conceptual design for an IoT network focused on monitoring energy generation systems in Non-Interconnected Zones (ZNI) of Colombia. These regions present geographical challenges that limit connectivity, so the study identified technical requirements and compared different technologies — Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, and LoRa — based on their suitability for rural contexts. The proposal integrates geographical, coverage, and energy infrastructure variables, estimating a positive impact on approximately two million inhabitants in these vulnerable areas. The study provides a useful methodological framework for implementing environmental monitoring solutions in isolated ecosystems such as mangroves.

C. Contribution and Differentiation of the Proposal:

The reviewed literature demonstrates significant advances along two separate lines: on one hand, projects focused on data acquisition through IoT and LoRa networks; on the other, projects oriented toward the development of web platforms and environmental visualization dashboards. However, none of the works reviewed simultaneously integrates field data acquisition, relational data management, and an artificial intelligence-assisted interpretation component aimed at non-specialized communities.

VI. Objectives

A. General Objective

To develop a prototype of a telematic system with Artificial Intelligence (AI) for monitoring environmental variables in mangrove ecosystems of the department of Atlántico.

B. Specific Objectives

- To identify the technical requirements of the system and the environmental needs associated with the monitoring of mangrove ecosystems in the department of Atlántico.
- To design the system architecture by defining the microcontroller configuration, communication network, database structure, and user interface, in accordance with the determined technical requirements.
- To build the telematic prototype, including the relevant hardware and software components for the operation of the system.
- To validate the functional performance of the prototype through operational testing, verification of data captured by the sensors, and evaluation of the effectiveness of the AI-assisted Chatbot.

VII. Methodology

The study is framed within applied research with a mixed-methods approach, combining quantitative data obtained from sensors with qualitative information gathered from the local community.

The study area corresponds to the Ciénaga de Mallorquín, specifically in the El Tambo sector. Two monitoring points were selected based on environmental criteria and community knowledge. The Association of Fishermen of La Playa (Asoplaya) participated in the identification of the system's needs and requirements.

The project was developed in four phases:

- Requirements analysis: Identification of environmental variables and system needs.
- System design: Definition of architecture, selection of sensors, and technologies.
- Prototype development: Integration of hardware and software.
- Validation: Testing in laboratory and real-world conditions.

VIII. Results And Discussions

A. Technical Requirements Analysis of the Monitoring System

Technical requirements analysis of the monitoring system In the development of the Mangrove Sense IoT project, the technical, environmental, and functional requirements necessary for monitoring environmental variables in the mangroves of the Atlántico department were defined.

Initially, with the goal of establishing a work area, mangrove zones of environmental interest within the Atlántico department were identified. Subsequently, criteria such as ecosystemic relevance and the presence of communities dependent on the ecosystem were taken into account. Based on this, the Tambor zone in the Ciénaga de Mallorquín, located in the district of La Playa, was selected as the main site, where the fishing community of La Playa (Asoplaya) operates.

Once the work area was defined, the client's needs had to be established. To this end, Luis Ávila, leader of Asoplaya, was interviewed. From this interview, the following conclusions were reached:

- The Asoplaya community depends economically on its fishing activities, using them both as a food source and as a commercial activity. For this reason, variables such as air temperature, air humidity, heat index, pH level, and turbidity were chosen.
- The community previously had mechanisms for measuring environmental variables; however, it lacked a platform where such data could be visualized, consulted, and analyzed in an accessible way.
- The Dashboard should be intuitive and easy to navigate, accessible from mobile devices and tablets, considering that not all users have access to a computer.

B. System Design

The Mangrove Sense IoT system is composed of four main layers:

a) *Sensing layer:* Environmental sensors (DHT22, pH, turbidity- Table I) capture data in real time. Table I presents the monitored variables and the specific sensors used for each variable.

b) *Communication layer:* Transmission via LoRa technology, allowing long range and low energy consumption.

c) Processing layer: Flask web server that manages the data and stores it in MySQL.

d) Application layer: Web dashboard for data visualization and a chatbot for user assistance.

Figure 1 depicts the overall architecture of the proposed Mangrove Sense IoT system.

TABLE I. ENVIRONMENTAL VARIABLES MONITORED

Table of monitored variables		
Variable	***Sensor***	***Unit***
Temperature	DHT22	°C
Humidity	DHT22	%
pH	SEN0161	pH
Turbidity	TSW-20M	NTU
CO_2	MQ-135	ppm



Fig. 1. General architecture of the Mangrove Sense IoT system.

Also, a relational database was also defined for the structured storage of the collected data.

Likewise, the web platform was developed using technologies such as HTML, CSS, and JavaScript, enabling data visualization through a clear and accessible interface, as was previously established within the technical requirements. The main objective of this platform is to allow users to consult the environmental information measured in real time by the sensors and subsequently recorded in the web system in an easy, simple, and understandable way, avoiding failures or errors that could result in a frustrating experience or constant interruptions.

The roles managed in the Dashboard will include the following: User and Administrator. Additionally, with the objective of providing assistance and solutions to problems during the process of using the web platform, the implementation of a Chatbot is proposed, which will always be available to the user. Its purpose is to guide and advise the *u*ser taking into account the current state of the measurements or any situations that may arise for the user.

With this in mind, and with the objective of identifying the limitations and capabilities of the different types of users who can access the Dashboard, a use case diagram (UML) was developed to represent the permissions of a regular user and a system administrator (see Fig. 2).



Fig. 2. Use case diagram (UML) for the development of the platform.

Furthermore, a MySQL database was implemented, ensuring the availability of the information measured and transmitted by the sensors for subsequent visualization, consultation, and analysis by the Asoplaya community.

C. *Prototype Development*

Once the requirements and system design were defined, the implementation and development of the IoT prototype was carried out through the integration of environmental sensors connected to microcontrollers, enabling the capture of environmental data in real time. Figure 3 shows the physical implementation and assembly of the sensors for subsequent use in the prototype.



Fig. 3. Physical implementation of the sensors

Consequently, various flow diagrams were designed with the objective of indicating the operation of the system and the components that make it up (see Fig. 4).

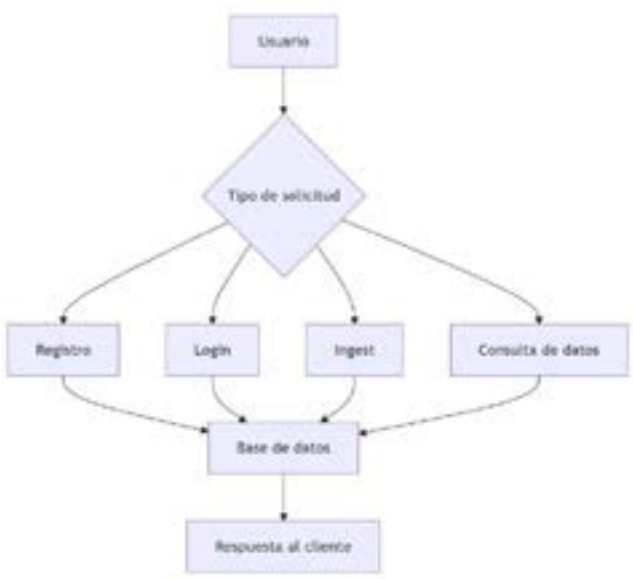


Fig. 4. Flow diagram of the main processes of the system.

D. *System Validation and Data Visualization*

The system was validated through laboratory and field tests.

a) Laboratory Tests

- Humidity: 96% – 97%
- pH: 9.05 – 9.20
- Turbidity: stable values

b) Field Tests

- Temperature: 30.7°C – 31.8°C
- Humidity: 67% – 72%
- Heat index: up to 38.8°C

The results showed in Fig. 5 demonstrate stability in measurements and consistency in data transmission.



Fig. 5. Data visualization on the dashboard

Additionally, various functional tests were conducted on the chatbot to evaluate its ability to respond to requests, as shown in Fig. 6.



Fig. 6. Data visualization on the dashboard

The results obtained demonstrate that the use of IoT technologies allows for significant improvement in environmental monitoring in remote ecosystems. Unlike traditional methods, the proposed system offers continuous monitoring and remote access to information.

The incorporation of a chatbot facilitates data interpretation, especially for users without technical training. Likewise, the use of LoRa ensures connectivity in areas without cellular coverage.

The participatory approach strengthens technological ownership by the community and promotes citizen science.

IX. Conclusions

The Mangrove Sense IoT prototype demonstrates the feasibility of integrating IoT technologies, web development, and artificial intelligence for environmental monitoring.

The system enables the collection, storage, and real-time visualization of data, contributing to informed decision-making and the conservation of mangrove ecosystems. Its low cost and scalability make it a replicable solution in other contexts.

As future work, the expansion of the sensor network and the incorporation of predictive models are proposed.

References

[1] Goldman E, Carter S, and Sims M, "Fires Drove Record-breaking Tropical Forest Loss in 2024 | World Resources Institute Research," *Latest Analysis on Deforestation Trends*, May 2025, Accessed: Jan. 31, 2026. [Online]. Available: https://gfr.wri.org/latest-analysis-deforestation-trends

[2] P. J. Murillo-Sandoval, L. Fatoyinbo, and M. Simard, "Mangroves Cover Change Trajectories 1984-2020: The Gradual Decrease of Mangroves in Colombia," *Front. Mar. Sci.*, vol. 9, p. 892946, Jul. 2022, doi: 10.3389/FMARS.2022.892946/BIBTEX.

[3] INVEMAR, "La restauración de los manglares en Colombia," Dec. 2022. Accessed: Jan. 31, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Alexandra-Rodriguez-30/publication/366357041_La_restauracion_de_los_manglares_en_Colombia_Tecnicas_saberes_y_experiencias/links/639ce801e42faa7e75cb178a/La-restauracion-de-los-manglares-en-Colombia-Tecnicas-saberes-y-experiencias.pdf

[4] FAO, "Global effort to safeguard mangroves steps up," *FAO*, Jul. 2023, Accessed: Jan. 31, 2026. [Online]. Available: https://www.fao.org/newsroom/detail/global-effort-to-safeguard-mangroves-steps-up/en?utm_source=chatgpt.com

[5] A. Gazis, "What is IoT? The Internet of Things explained," *Academia Letters*, Jun. 2021, doi: 10.20935/AL1003.

[6] F. Cuomo *et al.*, "Modeling Radio Wave Propagation for Wireless Sensor Networks in Vegetated Environments: A Systematic Literature Review," *Sensors 2022, Vol. 22, Page 5285*, vol. 22, no. 14, p. 5285, Jul. 2022, doi: 10.3390/S22145285.

[7] IBM, "What Is Telemetry? | IBM," Oct. 2025, Accessed: Jan. 31, 2026. [Online]. Available: https://www.ibm.com/think/topics/telemetry

[8] Oracle, "Qué es un bot conversacional ? | Oracle América Latina," Oct. 2020, Accessed: Jan. 31, 2026. [Online]. Available: https://www.oracle.com/latam/chatbots/what-is-a-chatbot/

[9] M. J. Osland *et al.*, "Ecological thresholds and transformations due to climate change: The role of abiotic stress," *Ecosphere*, vol. 16, no. 4, p. e70229, Apr. 2025, doi: 10.1002/ECS2.70229;WEBSITE:WEBSITE:ESAJOURNALS;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:21508925;WGROUP:STRING:PUBLICATION.

[10] P. Boonrat, P. Boonrat, and A. Aharari, "LoRa Technology for GHG Monitoring in Mangrove Ecosystem," *GCCE 2024 - 2024 IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics*, pp. 848–851, 2024, doi: 10.1109/GCCE62371.2024.10760552.

[11] S. Usman, R. L. Atimi, M. Anhar, and A. Susanto, "Low-Cost LoRaWAN Solution for Groundwater Monitoring in Peatlands," *Journal of Information Systems and Informatics*, vol. 6, no. 4, pp. 2777–2793, Dec. 2024, doi: 10.51519/JOURNALISI.V6I4.923.

[12] D. Arbeláez, A. Albus, S. Vallejo, and R. Botero, "Aplicativo web para el monitoreo y la gestión de la información de la calidad del aire en el municipio de Segovia, Antioquia," Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia, 2020. Accessed: Feb. 17, 2026. [Online]. Available: https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/1461

[13] R. F. Colmenares-Quintero, M. Baquero-Almazo, D. Kasperczyk, K. E. Stansfield, and J. C. Colmenares-Quintero, "Analysis of IoT technologies suitable for remote areas in Colombia: Conceptual design of an IoT system for monitoring and managing distributed energy systems," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 21, p. 100783, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.CLET.2024.100783.

Misión 2030: Gamificación con IA como herramienta transformadora para el desarrollo de competencias en los ODS en Ingeniería Industrial en la Universidad de Córdoba

1st Echeverri Flórez Heidi María
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad de Córdoba
Colombia, Montería
hecheverri@correo.unicordoba.edu.co

2nd Luna Noriega Celinne Giovanna
Facultad de Ingeniería Industrial
Universidad de Córdoba
Colombia, Montería
clunanoriega90@correo.unicordoba.edu.co

***Resumen*— La formación en ingeniería industrial demanda estrategias pedagógicas que desarrollen competencias de sostenibilidad alineadas con la Agenda 2030. Sin embargo, los enfoques pedagógicos tradicionales han mostrado limitaciones evidentes en la apropiación efectiva de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) por parte de los estudiantes, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas innovadoras que promuevan el aprendizaje activo y el pensamiento crítico en contextos de ingeniería.**

En este contexto, la integración de herramientas de gamificación e inteligencia artificial (IA) ha emergido como un enfoque prometedor para fortalecer competencias en sostenibilidad. La gamificación, al incorporar mecánicas de juego en entornos educativos, favorece la motivación y el compromiso de los estudiantes, mientras que la IA permite adaptar dinámicamente los escenarios de aprendizaje para simular dilemas reales de sostenibilidad en los que un estudiante pueda verse involucrado en su vida personal y profesional.

Este estudio evalúa el efecto de Misión 2030, una intervención gamificada apoyada en inteligencia artificial diseñada para fortalecer dichas competencias, sobre la adquisición de conocimiento en los ODS en estudiantes de Ingeniería Industrial de la Universidad de Córdoba, Colombia. Se implementó un diseño cuasi-experimental pre-post con un solo grupo (n = 20), los participantes desarrollaron una charla introductoria de 20 minutos junto a una sesión de 90 minutos que combinó un juego de roles con tablero, 63 casillas de retos vinculados a los ODS y roles profesionales fijos (ingeniero, empresario, urbanista), con escenarios adaptativos generados por IA que simularon dilemas reales de sostenibilidad.

El conocimiento se midió con una rúbrica validada de respuesta abierta (0–80 pts). Una prueba t pareada evidenció una mejora estadísticamente significativa (M: 18.4 → 39.6; t(19) = 8.13, p < .001, d = 1.82), indicando un tamaño del efecto grande. Asimismo, se observó una mayor capacidad de los estudiantes para aplicar conceptos de sostenibilidad en contextos simulados, lo que refleja no solo ganancia de conocimiento declarativo, sino también el desarrollo de competencias aplicadas. La intervención ofrece un modelo replicable y de bajo costo para incorporar competencias de sostenibilidad, especialmente en los ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y 12 (Producción y Consumo Responsables) en currículos STEM de ingeniería, estos hallazgos destacan el potencial de la gamificación aumentada con IA como estrategia efectiva para promover el aprendizaje activo, en coherencia con los principios de una educación en ingeniería orientada al desarrollo sostenible e inclusivo, con implicaciones directas para instituciones comprometidas con la transformación educativa.

Índice de Términos*— *Gamificación aumentada con IA, competencias ODS en educación en ingeniería, juegos serios para la sostenibilidad.

I. Introducción

La Agenda 2030 de las Naciones Unidas, con sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establece un marco integral para abordar desafíos globales interconectados, como el cambio climático, la desigualdad urbana y la innovación industrial, integrando dimensiones ambientales, económicas y sociales 2020 [1]. En el ámbito de la educación superior, particularmente en disciplinas STEM como la Ingeniería Industrial, la promoción de los ODS es esencial para capacitar a profesionales en la optimización de procesos con enfoque en sostenibilidad, como la gestión de recursos hídricos, energía asequible y reducción de desigualdades [2]. Sin embargo, revisiones bibliométricas revelan un incremento en la

producción investigativa sobre EDS en instituciones de educación superior desde 2018, con un énfasis predominante en aspectos ambientales y económicos, y una subrepresentación de lo social, lo que subraya la necesidad de enfoques más equilibrados, por otro lado, se ha identificado a las IEs como ejes centrales para lograr la sostenibilidad a niveles locales [3].

La gamificación ha surgido como una estrategia pedagógica prometedora para fomentar el aprendizaje en sostenibilidad, mejorando el engagement y la toma de decisiones mediante juegos serios que simulan escenarios reales, como en revisiones de 42 juegos sobre cambio climático que reportan un efecto medio en conocimiento factual y motivación [4]. La efectividad de estas estrategias radica en su capacidad para recrear contextos complejos de toma de decisiones, permitiendo que los participantes experimenten las consecuencias de sus acciones en entornos simulados y seguros. En este sentido, los juegos serios han demostrado ser herramientas valiosas para promover el compromiso de los estudiantes con problemáticas ambientales y de sostenibilidad, al favorecer el aprendizaje experiencial, la reflexión crítica y la comprensión de fenómenos complejos relacionados con el cambio climático y el desarrollo sostenible. Asimismo, estos entornos lúdicos facilitan la construcción de conocimientos aplicados y fortalecen la participación activa de los estudiantes, contribuyendo a una mayor apropiación de conceptos vinculados con la sostenibilidad y la responsabilidad social [5]. La integración de inteligencia artificial (IA) en gamificación amplifica estos impactos, ofreciendo experiencias adaptativas y personalizadas que abordan oportunidades y desafíos en EDS, como herramientas inteligentes para fomentar competencias éticas y ciudadanía global [6], [7].

A pesar de estos avances, persisten importantes vacíos en la literatura relacionados con el diseño y la evaluación de estrategias innovadoras para integrar los Objetivos de Desarrollo Sostenible en la educación superior, particularmente en programas de ingeniería. Las revisiones sistemáticas evidencian que, si bien las instituciones de educación superior han incrementado la incorporación de los ODS en sus funciones de docencia, investigación y extensión, aún existen desafíos para consolidar metodologías activas que promuevan el aprendizaje significativo y el desarrollo de competencias para la sostenibilidad. En este contexto, son escasos los estudios que combinan gamificación, inteligencia artificial y enfoques participativos para favorecer un aprendizaje transformador y contextualizado de los ODS [8]. Estudios en juegos serios para gestión ambiental destacan su eficacia en mejora de decisiones sostenibles [9], mientras que aplicaciones en planificación del uso del suelo con adolescentes generan datos espaciales valiosos para ODS 11 y 15 [10], pero faltan evidencias en contextos cuasi-experimentales que evalúen impactos cognitivos en roles profesionales, como el ingeniero industrial en ODS 9, 10 y 11.

El presente estudio aborda esta brecha mediante un diseño cuasi-experimental pre-post con un solo grupo (n=20 estudiantes de Ingeniería Industrial), evaluando el impacto de la lúdica "Misión 2030", un juego de roles gamificado con 63 casillas de retos y simulaciones IA, en la incentivación de la divulgación de los ODS. La pregunta de investigación es: ¿Cómo influye la aplicación de la lúdica “Misión 2030” en el aprendizaje de los 17 objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030 en los estudiantes de ingeniería industrial en la Universidad de Córdoba? Los hallazgos contribuyen a la literatura al demostrar la efectividad de gamificación IA en EDS, ofreciendo implicaciones para currículos en ingeniería que promuevan innovación sostenible.

II. Justificación

La Agenda 2030 de las Naciones Unidas establece un marco de acción global cuya implementación efectiva depende, en gran medida, de la formación de profesionales capaces de tomar decisiones con enfoque en sostenibilidad. En el caso particular de la Ingeniería Industrial, disciplina orientada a la optimización de sistemas productivos, la cadena de suministro y la planificación de procesos, la integración de los ODS se convierte en una herramienta estructural para responder a los retos del desarrollo sostenible en los contextos industriales y urbanos del siglo XXI.

Sin embargo, la evidencia bibliométrica disponible señala que la enseñanza de los ODS en instituciones de educación superior (IES) ha descansado, predominantemente, en metodologías transmisivas centradas en la exposición de contenidos y la memorización de definiciones. Estos enfoques han demostrado limitaciones evidentes para generar una capacidad de decisión responsable en contextos complejos [3], [11]. Esta brecha entre la formación recibida y las competencias exigidas por la Agenda 2030 justifica la búsqueda de estrategias pedagógicas alternativas.

En este orden de ideas, la gamificación, entendida como la incorporación de mecánicas y dinámicas propias del juego en entornos no lúdicos con fines de aprendizaje, ha demostrado efectividad para promover el engagement cognitivo, la motivación intrínseca y la comprensión de problemáticas complejas en contextos educativos [12]. A diferencia de los enfoques tradicionales, los entornos gamificados sitúan al estudiante como agente activo de decisiones, exponiendo las consecuencias de sus elecciones en tiempo real, lo que favorece la construcción de aprendizajes significativos y transferibles [13].

Por otra parte, la integración de inteligencia artificial en los entornos de aprendizaje amplía significativamente su potencial pedagógico al posibilitar experiencias educativas personalizadas, retroalimentación en tiempo real y simulaciones interactivas que favorecen la comprensión de problemas complejos relacionados con la sostenibilidad. En un estudio internacional basado en el análisis de 20 casos de estudio y una encuesta aplicada a docentes de 45 países, Leal [14] concluyen que la IA mejora la experiencia de aprendizaje al adaptar los contenidos a las necesidades de los estudiantes, incrementar su participación y fortalecer habilidades como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la toma de decisiones frente a desafíos ambientales y sociales. Asimismo, los autores destacan que estas herramientas facilitan el acceso a recursos relacionados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promueven el aprendizaje colaborativo y permiten el diseño de escenarios educativos dinámicos, lo que las convierte en un recurso prometedor para la innovación

educativa orientada a la sostenibilidad, siempre que su implementación considere principios éticos y de uso responsable.

La Universidad de Córdoba, institución pública ubicada en una región con índices de vulnerabilidad ambiental, social y económica significativos, representa un escenario de alta pertinencia para intervenciones educativas orientadas a los ODS. Los estudiantes de Ingeniería Industrial de esta institución están llamados a desempeñar roles estratégicos en sectores productivos locales que enfrentan retos directamente vinculados a ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y 12 (Producción y Consumo Responsables).

Por último, a pesar del creciente interés académico en la gamificación para la educación para el desarrollo sostenible, persiste una laguna en la literatura respecto a intervenciones que combinen juego de roles físico, mecánicas gamificadas y generación de escenarios por IA en contextos de ingeniería industrial de América Latina, específicamente en Colombia. Los estudios disponibles se concentran, en su mayoría, en poblaciones europeas o norte-americanas, entornos digitales y disciplinas distintas a la ingeniería de procesos [10], [15], [4]. Esta investigación contribuye a cerrar esa brecha al aportar evidencia empírica desde un contexto latinoamericano, con un diseño híbrido (físico-digital), lo que enriquece el cuerpo de conocimiento disponible sobre educación para el desarrollo sostenible en programas STEM en el caribe colombiano.

III. Objetivos

Objetivo General

Evaluar el efecto de la intervención educativa gamificada "Misión 2030", apoyada en inteligencia artificial, sobre la adquisición de conocimiento en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en estudiantes de Ingeniería Industrial de la Universidad de Córdoba, como estrategia para el fortalecimiento de competencias en sostenibilidad alineadas con la Agenda 2030.

Objetivos Específicos

- Determinar la variación en el conocimiento declarativo sobre los ODS antes y después de la intervención gamificada.
- Examinar la calidad del razonamiento aplicado sobre sostenibilidad manifestado por los estudiantes en la post-intervención.
- Identificar las características pedagógicas de "Misión 2030" que favorecen su replicabilidad en currículos STEM.

IV. Marco Teórico

A. *Efectos de la Gamificación en Resultados de Aprendizaje Sostenible*

La gamificación genera impactos positivos significativos en los resultados de aprendizaje. Según el meta-análisis de Sailer y Homner, basado en 19 estudios sobre resultados cognitivos, establece que la gamificación genera efectos positivos significativos en los resultados de aprendizaje, especialmente cuando se integran elementos de ficción de juego e interacción social. Estos autores demuestran que la gamificación no es solo un elemento motivacional, sino que facilita la adquisición de conocimientos complejos mediante la retroalimentación inmediata y la simulación de escenarios. Esto se alinea con la teoría de la autodeterminación, donde elementos como la autonomía en retos gamificados incrementan la motivación intrínseca para acciones ecológicas.

En contextos aplicados, Novo et al. [17] evaluaron una app web gamificada (GoBeEco) con 24 participantes portugueses, encontrando que el 76% reportó cambios positivos en comportamiento, el 94% en conciencia ecológica y el 88% en motivación y conocimiento. Los elementos gamificados cerraron la brecha entre conciencia y acción, promoviendo hábitos alineados con los ODS 11 y 12, como movilidad sostenible y consumo responsable. Esto demuestra que la gamificación transforma el aprendizaje pasivo en activo, fomentando la internalización de los ODS mediante retroalimentación inmediata y recompensas.

B. *Aplicaciones Prácticas en Educación y Planificación Sostenible*

En escenarios educativos orientados a la sostenibilidad, los juegos serios han demostrado ser una estrategia efectiva para involucrar a los estudiantes en procesos de aprendizaje activo y toma de decisiones. Hennig et al. diseñaron e implementaron un juego serio para la planificación participativa del uso del suelo con estudiantes de una comunidad rural de Islandia, encontrando que la experiencia facilitó la discusión de alternativas de desarrollo, promovió la comprensión de los conflictos asociados a la gestión territorial y estimuló la participación de los estudiantes en procesos de reflexión sobre la sostenibilidad. Estos resultados evidencian el potencial de la gamificación para abordar problemáticas complejas mediante metodologías experienciales y colaborativas.

Estudios en ingeniería, como el de Tang y Hare, con un juego serio gamificado para 49 estudiantes de ingeniería temprana, mostraron mejoras significativas en conocimiento de lógica binaria y diseño sostenible (pre-post: $t(48)=7.2$, $p<0.001$) y percepciones positivas (82% efectivo), reforzando ODS 4 y 9 al integrar elementos de innovación tecnológica. Similarmente, Madani et al. revisaron juegos serios sobre gestión ambiental, encontrando que la gamificación mejora el aprendizaje y la toma de decisiones (efecto positivo en engagement y conocimiento), promoviendo acciones alineadas con ODS 13.

En educación superior, trabajos como el de Jain et al. [17], con gamificación en cursos de ingeniería para estudiantes universitarios, reportaron incrementos en motivación y adquisición de conocimiento sostenible, con alta aplicación en proyectos reales. Esto respalda la teoría del aprendizaje situado (Lave & Wenger, 1991), donde contextos gamificados simulan escenarios sostenibles, fortaleciendo la transferencia de aprendizaje de ODS.

C. *Integración con IA y Enfoques Participativos en EDS*

La convergencia de gamificación con IA amplifica el aprendizaje de ODS en la era de Industry 4.0. Abulibdeh et al. analizaron literatura sobre IA en EDS, concluyendo que

herramientas gamificadas como chatbots (e.g., ChatGPT) mejoran aprendizaje continuo y ético, abordando desafíos de ODS mediante simulación de escenarios sostenibles. En este marco, la IA potencia las capacidades de las lúdicas gamificadas para ofrecer escenarios de aprendizaje más ricos y personalizados, favoreciendo la adquisición de conocimientos complejos como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). De acuerdo con lo anterior, en estudios recientes se evidencia que "la integración de elementos propios de la gamificación con experiencias de aprendizaje personalizado basadas en IA podría ayudar a reducir el estrés y aumentar la motivación entre los estudiantes" al tiempo que mejora la experiencia educativa general [18].

Asimismo, Khakpour y Colomo-Palacios [19] identificaron, a partir de una revisión sistemática de la literatura, que la integración de técnicas de aprendizaje automático con estrategias de gamificación permite desarrollar entornos de aprendizaje adaptativos capaces de personalizar la experiencia educativa de acuerdo con las características y el desempeño de cada estudiante.

V. Metodología

A. *Diseño de la Investigación*

Esta investigación adopta un diseño cuasi-experimental de pre-test y post-test con un solo grupo, enfocado en evaluar el impacto de una intervención educativa lúdica apoyada en inteligencia artificial (IA) sobre el conocimiento y la intención de promover los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en estudiantes de Ingeniería Industrial. El enfoque se centra en la gamificación como herramienta pedagógica para integrar los 17 ODS, con énfasis en los ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y 12 (Producción y consumo responsables), alineados con el rol del ingeniero industrial en la sostenibilidad.

1. Participantes

El estudio involucró a 20 participantes, estudiantes de Ingeniería Industrial de la facultad de ingenierías de la Universidad de Córdoba. La selección fue por conveniencia, asegurando diversidad en edad (rango de 17-24 años), semestre (del 3° al 8°) y programa académico. Todos los participantes proporcionaron consentimiento informado y se garantiza la confidencialidad de los datos conforme a estándares éticos de investigación.

2. Variables

Variable Independiente: Modalidad del taller "Misión 2030", implementada como una práctica lúdica apoyada en IA.

Variable Dependiente: Media del puntaje en la prueba de conocimiento post-test.

Variables de Control: Nivel de conocimiento inicial de los participantes (medido mediante pre-test); edad, semestre y programa académico de los participantes.

El control estadístico de las variables de control se realizó aplicando un test inicial para medir el nivel de conocimiento previo, permitiendo comparar los cambios pre-post intervención.

3. Hipótesis

Hipótesis Nula (H_0): La aplicación de la lúdica "Misión 2030" no se correlaciona con la incentivación de la difusión y promoción de los ODS en la educación STEM, indicando una diferencia nula en el cambio de conocimiento de los participantes.

Así: $\mu_{post} = \mu_{pre}$ Indicará diferencia nula en el cambio de conocimiento de los participantes.

Hipótesis Alternativa (H_1): La aplicación de la lúdica "Misión 2030" contribuye a la incentivación de la difusión y promoción de los ODS en la educación STEM, indicando que la implementación de la lúdica apoyada en IA resulta en una mejora en el nivel de conocimiento de los participantes.

Así, si: $\mu_{post} > \mu_{pre}$ Indicará que la implementación de la lúdica apoyada en IA resulta en una mejora mayor del nivel de conocimiento de los ODS.

En cambio, sí $\mu_{post} < \mu_{pre}$ Se evidencia que la implementación de la lúdica apoyada en IA resulta en un descenso del nivel de conocimiento de los ODS.

4. Procedimiento

La intervención se estructuró en 4 (cuatro) etapas secuenciales para maximizar el control sobre la investigación y de las variables de análisis. Así:

Pre-test (Evaluación Inicial): Al inicio de la sesión, se aplicó la "Evaluación de Validación de Conocimientos Pre-Taller", un instrumento con 10 preguntas abiertas sobre escenarios prácticos relacionados con los objetivos de desarrollo sostenible, enfatizando en los ODS 9, 11 y 12, y el rol del ingeniero industrial en cada uno de los casos. Las respuestas se calificaron en una escala de 0-10 puntos por pregunta, basada en criterios de precisión, alineación con los ODS y profundidad analítica.

Charla Introductoria: Se realizó una exposición de 20 minutos sobre el papel del ingeniero industrial en los ODS, cubriendo temas como el marco general de la Agenda 2030, la integración de sostenibilidad en procesos industriales, y aplicaciones transversales como la economía circular y la gestión de cadenas de suministro.

Intervención Lúdica: Se implementó la lúdica "Misión 2030" durante aproximadamente 90 minutos. Esta actividad, apoyada en IA para simulaciones de decisiones, involucró un juego de roles en un tablero con dados y fichas de colores. A cada participante se le asignó un rol fijo (e.g., empresario, ingeniero de procesos, urbanista, comunidad, gobierno, consumidor). Los jugadores avanzaban resolviendo retos vinculados a los ODS, tomando decisiones que simulaban impactos en sostenibilidad (e.g., optimización de procesos para reducir emisiones, diseño de infraestructuras urbanas resilientes). La IA generó escenarios dinámicos basados en un prompt predefinido, explicando cómo cada decisión afectaba

el cumplimiento de los ODS. Materiales: tablero de juego, dados, fichas; grupo de 20 personas.

Temas cubiertos en la lúdica y en la charla introductoria:

De forma general, se dió un contexto de qué son los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la relevancia en la Agenda 2030 para la sociedad. Se socializó también sobre el rol del ingeniero industrial en la producción, optimización e innovación sostenibles.

Los ODS priorizados son los que tienen una relación directa con el campo de aplicación de la ingeniería industrial, siendo estos los ODS 9, 11 y 12. (Innovación tecnológica, digitalización sostenible, infraestructuras resilientes; Movilidad urbana, gestión de residuos, vivienda sostenible; Reducción de desperdicios, ecodiseño, criterios de sostenibilidad en suministros). Para finalizar la charla, se hizo un breve repaso sobre decisiones equilibradas (económico-social-ambiental), cadena de suministro sostenible y economía circular.

Post-test (Evaluación Final): Inmediatamente después de la lúdica, se aplicó la "Evaluación de Validación de Conocimientos Post-Taller", un instrumento paralelo con 10 preguntas abiertas similares al pre-test, evaluando los mismos constructos. La calificación siguió los mismos criterios.

La duración total de la sesión fue de aproximadamente 160 minutos, realizada en un aula equipada para actividades grupales.

5. Instrumento de Medición

Para la recolección de datos se diseñó un instrumento ad hoc elaborado por las autoras de la investigación, compuesto por un cuestionario aplicado en dos momentos (pretest y postest), orientado a la validación del conocimiento y la comprensión aplicada de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en el contexto de la ingeniería industrial.

El cuestionario estuvo conformado por 10 ítems de respuesta abierta, estructurados a partir de escenarios problematizados vinculados a situaciones reales de organizaciones productivas, territorios urbanos y cadenas de suministro. Los ítems permitieron evaluar el conocimiento de los ODS desde tres ejes analíticos claramente identificables en el instrumento:

i. comprensión conceptual de la sostenibilidad y los ODS,

ii. capacidad de aplicación de los ODS en contextos productivos, organizacionales y territoriales, y

iii. análisis del rol estratégico del ingeniero industrial en la toma de decisiones sostenibles

La evaluación de conocimiento no se centró en la memorización de definiciones, sino en la capacidad argumentativa, el razonamiento sistémico y la coherencia de las decisiones propuestas por los participantes frente a problemáticas asociadas principalmente a los ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y 12 (Producción y consumo responsables).

El contenido del instrumento fue sometido a validación por juicio de experto, siendo revisado y aprobado por una docente con experiencia en sostenibilidad y formación en educación superior como ingeniera industrial, con el fin de asegurar la pertinencia temática, claridad de los escenarios planteados y coherencia con los objetivos de aprendizaje propuestos.

Adicionalmente, la medición del cambio actitudinal se abordó en el postest mediante preguntas directas de carácter cualitativo, orientadas a explorar la intención de los participantes de promover los ODS en su proceso formativo y en su futura práctica profesional. Estas preguntas fueron aplicadas a un subconjunto de participantes seleccionados al azar, como complemento interpretativo de los resultados de validación del conocimiento.

B. Análisis de Datos

El análisis de los datos se realizó en dos fases. En primer lugar, las respuestas abiertas del pretest y el postest fueron codificadas mediante una rúbrica de evaluación, diseñada para transformar el contenido cualitativo en puntajes cuantificables a partir de criterios como la identificación de los ODS, la coherencia de las propuestas y la aplicación del rol del ingeniero industrial. Este proceso permitió obtener puntajes totales por participante en ambos momentos de medición.

Posteriormente, los puntajes fueron analizados mediante estadística descriptiva, usando la media, desviación estándar, además del cálculo de mínimos y máximos para obtener un panorama general de los datos. A continuación, se realizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk (ya que n=20) para verificar la distribución normal de los datos. Por último, se usó el Paired t-Test para el análisis de los datos. Asimismo, se estimó el tamaño del efecto para evaluar la magnitud del impacto de la intervención. El análisis se realizó con el software RStudio versión 2026.01.0-392, junto con el programa R en su versión 4.5.2 estableciendo un nivel de significancia de $p < 0.05$.

C. Consideraciones Éticas

Se obtuvo aprobación institucional para el estudio. Los participantes fueron informados sobre el propósito, voluntariedad y anonimato, minimizando sesgos mediante asignación aleatoria de roles en la lúdica.

VI. Resultados

Los análisis descriptivos e inferenciales se realizaron utilizando el software R (versión 4.5.2) para evaluar el impacto de la intervención lúdica gamificada apoyada en IA sobre el conocimiento y la intención de promover los ODS en los participantes. La muestra consistió en 20 estudiantes de Ingeniería Industrial (edad media = 21.5 años, SD = 2.3; 55% mujeres), con puntajes totales derivados de una rúbrica validada (rango 0-80 puntos de calificación).

A. Estadística Descriptiva

TABLA I.
Estadística Descriptiva para los Datos Recolectados en la Intervención

Estadística Descriptiva	Test	
	Pre	Post

Media	18,4	39,6
Desv estándar	6,692	9,949
Mínimo	5	26
Máximo	31	67

La Tabla 1 resume las medidas descriptivas de los puntajes en el pretest y posttest. Se observó un incremento notable en la media de los puntajes post-intervención (M = 39.6, SD = 9.949) en comparación con el pretest (M = 18.4, SD = 6.692). El rango de puntajes varió de 5 a 31 en el pretest y de 26 a 67 en el posttest, indicando una mejora generalizada con mayor dispersión post-intervención.

B. Prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

Para verificar las asunciones de la prueba paramétrica, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk a los puntajes pretest, posttest y diferencias (posttest - pretest). Los resultados indicaron que las distribuciones no desviaban significativamente de la normalidad: pretest ($W = 0.98441$, $p = 0.9777$), posttest ($W = 0.92618$, $p = 0.1304$) y diferencias ($W = 0.93322$, $p = 0.178$). Estos valores $p > 0.05$ confirman la adecuación para análisis paramétricos.

C. Prueba t para Muestras Pareadas

Se realizó una prueba t pareada unidireccional para comparar los puntajes pretest y posttest, con la hipótesis alternativa de que los puntajes post-intervención serían superiores (H_1: $\mu\_post > \mu\_pre$). Los resultados revelaron una diferencia media significativa de 21.45 puntos ($t(19) = 8.1273$, $p < 0.001$), con un intervalo de confianza del 95% [16.86838, Inf]. Además, el tamaño del efecto (Cohen's $d = 1.817$) indica un impacto grande de la intervención.

Así, estos hallazgos cuantitativos respaldan la efectividad de la lúdica en la mejora del conocimiento evaluado.

VII. Conclusiones

Este estudio cuasi-experimental proporciona evidencia empírica de que la lúdica gamificada "Misión 2030", apoyada en IA para generar escenarios dinámicos de roles y retos vinculados a los 17 ODS (con énfasis en ODS 9, 11 y 12), mejora significativamente el conocimiento sobre sostenibilidad en estudiantes de Ingeniería Industrial, como se demuestra por el incremento en puntajes post-intervención ($t(19) = 8.127$, $p < 0.001$, $d = 1.817$). La estructura del juego, con 63 casillas que incorporan elementos como cumbres internacionales con avances o retrocesos, acciones personales y simulaciones de impactos reales (e.g., reducción de mortalidad infantil alineada con ODS 3 o contaminación por combustibles fósiles con ODS 7, 6 y 13), facilitó un aprendizaje cognitivo aplicado, promoviendo la comprensión de interconexiones entre ODS. Este enfoque se alinea con meta-análisis que reportan efectos positivos de la gamificación en resultados cognitivos [12] y extiende hallazgos de juegos serios en gestión ambiental, donde la gamificación mejora la toma de decisiones y el engagement [9], así como en planificación urbana, donde simula preferencias sostenibles para generar datos espaciales valiosos [10].

El análisis cualitativo de las respuestas post-test evidenció que los estudiantes no solo incrementaron su conocimiento factual sobre los ODS, sino que desarrollaron una capacidad argumentativa más elaborada: sus respuestas incorporaron propuestas concretas. Esta evidencia indica que el juego de roles, al exigir la toma de decisiones en contextos simulados con consecuencias visibles para los estudiantes, activó competencias de razonamiento sistémico coherentes con los marcos de referencia en educación para el desarrollo sostenible [20]. La mayor dispersión observada en los puntajes post-test (SD: 6.69 → 9.95) sugiere además que la intervención generó trayectorias de aprendizaje diferenciadas, lo que abre líneas de análisis sobre el efecto moderador del semestre cursado o la familiaridad previa con los ODS.

Por otro lado, los resultados obtenidos sugieren que Misión 2030 constituye una intervención pedagógica viable, ya que puede ejecutarse en una sola sesión de aproximadamente 160 minutos, con materiales de bajo costo (tablero físico, dados y fichas) y soporte de herramientas de IA generativa de acceso libre. Esta accesibilidad lo posiciona como una estrategia replicable en instituciones de educación superior con distintos niveles de dotación tecnológica, especialmente en contextos del Sur Global donde los recursos pedagógicos especializados en ODS son escasos. Las características estructurales que explican su efectividad, roles profesionales contextualizados, retos graduados por ODS, retroalimentación inmediata mediada por IA y dinámica colectiva de decisiones, son transferibles a otros programas STEM, e incluso a disciplinas de ciencias sociales o administración con énfasis en sostenibilidad. Futuras implementaciones deberían incorporar grupos control, muestras más amplias y seguimiento longitudinal para validar la persistencia del aprendizaje.

En conjunto, los resultados derivados de los tres objetivos específicos permiten concluir que la lúdica gamificada "Misión 2030" es una intervención pedagógica efectiva, contextualmente pertinente y metodológicamente replicable para la enseñanza de los ODS en Ingeniería Industrial. Su implementación contribuye no solo a incrementar el conocimiento declarativo sobre la Agenda 2030, sino a desarrollar en los estudiantes capacidades de razonamiento sistémico y toma de decisiones sostenibles que los preparan para su futura práctica profesional. Estos hallazgos fortalecen el argumento a favor de la integración de la gamificación aumentada con IA en los currículos STEM de la educación superior, y abren una agenda de investigación orientada a validar este modelo en poblaciones más amplias, contextos culturales diversos y diseños con mayor control experimental.

References

[1] United Nations Development Programme (UNDP), "Human Development Report 2020: The Next Frontier: Human Development and the Anthropocene." New York, NY, USA: UNDP, 2020. doi: 10.18356/9789210055161.

[2] M. Chankseliani and T. McCowan, "Higher education and the Sustainable Development Goals," Higher Education, vol. 81, no. 1, pp. 1–8, Jan. 2021, doi: 10.1007/s10734-020-00652-w.

[3] W. L. Filho, C. Shiel, and A. Paço, "Implementing and operationalising integrative approaches to sustainability in higher education: the role of project-oriented learning," Journal of Cleaner Production, vol. 133, pp. 126–135, May 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.079.

[4] T. Ouariachi, M.-D. Olvera-Lobo, J. Gutiérrez-Pérez, and E. Maibach, "A framework for climate change engagement through video games," Environmental Education Research, vol. 25, no. 5, pp. 701–716, 2019, doi: 10.1080/13504622.2018.1545156.

[5] Y.-M. Cheng, S.-J. Lou, S.-H. Kuo, and R.-C. Shih, "Investigating elementary school students' technology acceptance by applying digital game-based learning to environmental education," Australasian Journal of Educational Technology, vol. 29, no. 1, pp. 96–110, Feb. 2013, doi: 10.14742/ajet.65.

[6] A. Abulibdeh, E. Zaidan, and R. Abulibdeh, "Navigating the confluence of artificial intelligence and education for sustainable development in the era of Industry 4.0: Challenges, opportunities, and ethical dimensions," Journal of Cleaner Production, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140527.

[7] A. Khaldi, R. Bouzidi, and F. Nader, "Gamification of e-learning in higher education: A systematic literature review," Smart Learning Environments, vol. 10, Art. no. 10, 2023, doi: 10.1186/s40561-023-00227-z.

[8] P. G. Serafini, J. M. de Moura, M. R. de Almeida, and J. F. D. de Rezende, "Sustainable Development Goals in Higher Education Institutions: A systematic literature review," Journal of Cleaner Production, vol. 370, Art. no. 133473, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133473.

[9] K. Madani, T. W. Pierce, and A. Mirchi, "Serious games on environmental management," Sustainable Cities and Society, vol. 29, pp. 1–11, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.scs.2016.11.007.

[10] B. D. Hennig, B. F. Roberts, J. T. Welling, M. Pinal, and J. Ólafsson, "Playing for the Planet? A Serious Game Approach to Land Use Planning with Students in Rural Iceland," Societies, vol. 15, no. 1, Art. no. 14, 2025, doi: 10.3390/soc15010014.

[11] L. F. Garcés Giraldo, R. Liza, J. A. Velásquez Ochoa, G. Pérez Pulido, C. F. Henao Villa, J. A. Londoño Arias, and J. Hoyos Rentería, "Education for Sustainable Development in Higher Education: Bibliometric Analysis of Trends, Innovations and Institutional Commitment to the SDGs (2018–2025)," Societies, vol. 16, no. 6, Art. no. 178, 2026, doi: 10.3390/soc16060178.

[12] M. Sailer and L. Homner, "The gamification of learning: A meta-analysis," Educational Psychology Review, vol. 32, no. 1, pp. 77–112, Mar. 2020, doi: 10.1007/s10648-019-09498-w.

[13] J. Lave and E. Wenger, Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1991. doi: 10.1017/CBO9780511815355.

[14] A. Mohamed and A. Mohammed, "Artificial intelligence and gamification in education: Impacts on motivation and stress reduction," Computers and Education: Artificial Intelligence, vol. 7, Art. no. 100325, 2024, doi: 10.1016/j.caeai.2024.100325.

[15] W. Leal Filho, E. Kim, J. M. L. S. Borsatto, and C. B. Marcolin, "Using artificial intelligence in sustainability teaching and learning," Environmental Sciences Europe, vol. 37, Art. no. 124, 2025, doi: 10.1186/s12302-025-01159-w.

[16] Y. Tang and R. Hare, "Combining gamification and intelligent tutoring systems in a serious game for engineering education," arXiv (Cornell University), May 2023, doi: 10.48550/arxiv.2305.16568.

[17] C. Novo, C. Zanchetta, E. Goldmann, and C. V. de Carvalho, "The Use of Gamification and Web-Based Apps for Sustainability Education," Sustainability, vol. 16, no. 8, Art. no. 3197, 2024, doi: 10.3390/su16083197.

[18] R. Jain, R. K. Joshi, V. Dwivedi, S. Kumar, and S. Gupta, "Gamification for Teaching Sustainability to Engineering Students," in Proc. IEEE Frontiers in Education Conf. (FIE), 2022, doi: 10.1109/FIE56618.2022.9962626.

[19] A. Khakpour and R. Colomo-Palacios, "Convergence of Gamification and Machine Learning: A Systematic Literature Review," Technology, Knowledge and Learning, vol. 26, no. 4, pp. 597–636, 2021, doi: 10.1007/s10758-020-09456-4.

[20] W. Wiek, L. Withycombe, and C. L. Redman, "Key competencies in sustainability: A reference framework for academic program development," Sustainability Science, vol. 6, no. 2, pp. 203–218, Jul. 2011, doi: 10.1007/s11625-011-0132-6.

De los prototipos académicos al software funcional: Un marco de pruebas para transformar los proyectos finales de Ingeniería de Sistemas

1st Marvin Santiago Carabali
Facultad de Ingenierías, programa de Ingeniería de Sistemas
Institución Universitaria Antonio José Camacho
Cali, Colombia
Msantiagocarabali@estudiante.uniajc.edu.co

2nd Beatriz Eugenia Marín
Facultad de Ingenierías, grupo de investigación GRINTIC
Institución Universitaria Antonio José Camacho
Cali, Colombia
Bmarin@profesores.uniajc.edu.co

Resumen - En la actualidad, la Calidad de software se ha consolidado como un factor determinante en el éxito de un producto tecnológico. Sin embargo, un análisis realizado a los proyectos de grado en Ingeniería de Sistemas de la Institución Universitaria Antonio José Camacho (UNIAJC), entre los años 2022 y 2024, revelaron una deficiencia en estrategias estandarizadas de pruebas donde solo el 50% de los proyectos implemento pruebas estructuradas, mientras que un 28% las menciona sin evidencia y el 11% las aplican parcialmente, lo cual compromete la robustez y confiabilidad de las aplicaciones desarrolladas por los estudiantes. Ante este escenario, este articulo propone un marco de pruebas de software basado en metodologías y herramientas contextualizadas para los proyectos de grado de la institución. La investigación adopta un enfoque aplicado desarrollado en tres fases: la exploración, mediante una revisión sistemática de literatura para identificar tipos de pruebas y herramientas; el diseño de una arquitectura modular fundamentada en estándares como la ISO/IEE 29119 y el STLC; y la implementación, a través de la aplicación del marco en un proyecto de grado para documentar su efectividad.

Palabras claves: Marco de pruebas, Calidad de software, Proyectos de grado.

I. Introducción

En el panorama actual del desarrollo de software, la demanda de productos de alta calidad ha crecido exponencialmente, haciendo que la fase de pruebas tenga una alta relevancia en el éxito de cualquier producto de software ya que esta se encarga de verificar su correcto funcionamiento [1]. Esta etapa, que, aunque se estima que puede consumir más del 50% del costo total del proyecto, asegura que un producto cumpla con todos los requisitos funcionales y no funcionales planteados, previniendo fallos que pueden causar pérdida de confianza, económica y la insatisfacción del usuario final.

Otro aspecto poco considerado en las evaluaciones es la calidad de las herramientas utilizadas, ya que, una prueba deficiente puede omitir la detección de errores, generando resultados poco fiables y afectando negativamente tanto la fase de desarrollo como la de producción. Por tal motivo, las pruebas deben verse como una cadena de herramientas en las cueles se integran múltiples soluciones que apoyan a la efectividad del proceso [2].

En el ámbito académico específicamente en los proyectos de grado de Ingeniería de Sistemas de la Institución Universitaria Antonio José Camacho (Uniajc), se tiene un tiempo limitado para el desarrollo de estos, debido a que solo se tiene tres semestres académicos en los cuales se contextualiza el problema, se diseña y desarrolla la solución y finalmente se implementa, por tal motivo esta restricción de tiempo impone un límite estricto que dificulta la adaptación de requisitos cambiantes y, frecuentemente, relega a un segundo plano las actividades de aseguramiento de calidad. Para dimensionar esta problemática se identificó una muestra de 18 proyectos publicados entre 2022 y 2024 reveló que solo el 50% implementaba pruebas estructuradas. Un 28% mencionaba su intención sin presentar evidencia, y un 11% realizaba pruebas de forma parcial o limitada. Esta falta de una estrategia unificada y estandarizada compromete la calidad, la confiabilidad y la rigurosidad técnica de los productos de software desarrollados como trabajo de grado.

Frente a esta necesidad, en esta investigación se propuso desarrollar un marco de pruebas de software estructurado como una guía metodológica para los estudiantes. El marco, basado en buenas prácticas y estándares internacionales, busca facilitar la estandarización del proceso de pruebas, fortalecer las competencias de los futuros ingenieros y proporcionar a los profesores una herramienta pedagógica para la enseñanza y evaluación de la calidad del software. Este artículo describe el proceso de desarrollo del marco, su arquitectura modular, y los resultados de su implementación en un proyecto de grado.

II. Marco Teórico

Las pruebas de software son un proceso de validación dinámica que verifica que un sistema se comporte según lo esperado [3]. Además, su objetivo principal no solo es encontrar defectos, sino aportar calidad al producto final, de tal manera que estas se van integrando dentro de las diferentes fases del ciclo de vida de la ingeniería. Si bien, es claro que cuanto más pronto el equipo de desarrollo reciba retroalimentación de las

pruebas, más pronto se podrán solucionar aspectos como el fallo de arquitectura, funcionalidades incorrectas, fallas de seguridad o malas decisiones de diseño entre otros aspectos.

A continuación, se presentan algunos fundamentos teóricos, los cuales ayudaran a contextualizar la presente investigación.

A. Calidad del software

Durante años, algunos autores y organizaciones han definido el termino de "calidad" de diferentes maneras. Por ejemplo, [4] afirma que este concepto se define como la conformidad con los requisitos funcionales y de rendimientos establecidos. Mientras, [5] define el termino como el grado en que un sistema, componente o proceso cumple con los requisitos especificados y las necesidades o expectativa del cliente.

B. Clasificación y tecnicas de pruebas de software

Existen diferentes tipos de pruebas para el software las cuales tienen la finalidad de asegurar la calidad y correcto funcionamiento de dicho software, estas pruebas se categorizan de la siguiente manera en la *fig 1*.



Fig 1. Clasificación de pruebas, tomado de: autoría propia.

En este contexto, las pruebas guiadas según el momento de aplicación, como las **dinámicas** las cuales se realizan ejecutando el código fuente de una aplicación. A diferencia de las pruebas estáticas, estas evalúan el comportamiento del software, midiendo las entradas y salidas en tiempo real. Normalmente estas pruebas se utilizan para identificar errores que solo se pueden detectar durante la ejecución, como problemas de rendimiento, funcionalidad y seguridad. Mientras, las pruebas **estáticas** son una técnica de revisión de software que se realiza sin la ejecución de código. Este método examina el software y todos los documentos asociados al proyecto como los requisitos, casos de pruebas o especificaciones de diseño, el objetivo de las pruebas estáticas radica en la verificación de estabilidad del código antes de pasar a las pruebas dinámicas, adoptando un enfoque preventivo, ayudando a ahorrar tiempo y reduciendo costos de repetición.

En cuanto a las pruebas guiadas según su propósito, tenemos a las **funcionales**, las cuales evalúan si el software cumple con los requisitos funcionales especificados. Según [6] en este tipo de pruebas no se suele enfocar en cómo se generan las respuestas del sistema sino en el análisis del comportamiento externo del software. A diferencia de las **no funcionales**, donde [7] firma que estas tienden a ser las que más calidad refleja en los productos desde la perspectiva del cliente, ya que su objetivo es identificar como opera un sistema, evaluando atributos no funcionales como el rendimiento, compatibilidad, portabilidad, entre otras.

Al llegar al nivel de arquitectura, tenemos las **unitarias**, donde se centra en verificar el correcto funcionamiento de la parte más pequeña de un software, como un módulo o componente individual [4]. En las de **integración**, el propósito fundamental es tomar esas unidades que ya fueron probadas individualmente y unirlas en la estructura general del programa para probarlas e identificar errores asociados a los componentes. Por otro lado, las de **sistemas** comprenden una serie de pruebas distintas, cada una con un propósito específico, pero todas convergentes en el objetivo de ejercitar exhaustivamente el sistema computacional integrado, y las de **usabilidad**, que principalmente se centran en evaluar la facilidad con la que los usuarios pueden utilizar un sistema. El objetivo de estas es determinar qué tan intuitivo, amigable y sencillo resulta para el usuario final interactuar con la aplicación [8].

En el mecanismo, se encuentran las **manuales** que como su mismo nombre lo indica, estas se realizan de forma manual, donde una persona ejecuta casos de pruebas sin el uso de herramientas automatizadas, interactuando con la aplicación directamente. Pero, las **automatizadas** se refieren al proceso de utilizar herramientas de software para ejecutar pruebas predefinidas en una aplicación. De acuerdo con [8], una de las principales ventajas al usar herramientas es la reducción considerable de tiempo y costos, además de que se pueden obtener informes rápidamente.

Y para finalizar, tenemos a las pruebas guiadas según el conocimiento, el cual contiene a las de **caja blanca** donde estas pretenden investigar sobre la estructura interna de uno o varios componentes del código, exceptuando los datos de entrada y salida, probando la lógica del programa desde un punto de vista algorítmico [9]. A diferencia de la de **caja negra**, o también llamadas pruebas de comportamiento, esta valida todos los requisitos funcionales con parámetros de entrada predefinidos, verificando el comportamiento de la aplicación y evaluando todas sus salidas correspondientes.

C. Ciclo de vida de las pruebas de software

Este se define como una secuencia estructurada y planificada de actividades esenciales para llevar a cabo las pruebas de software de manera sistemática y estructurada. Es importante resaltar que este constituye un subconjunto del ciclo de vida del desarrollo de software.



Fig 2. Fases del ciclo de vida de las pruebas de software, tomado de: autoría propia.

Cada fase desempeña un papel crucial, teniendo como punto de partida el análisis de requerimientos y finalizando con el cierre del ciclo de pruebas, los cuales contribuyen a la mejora de confiabilidad, funcionalidad y alineación del software con los objetivos del negocio en particular.

D. Herramientas para las pruebas de software

Los lenguajes de programación han evolucionado de manera paralela con el hardware, pasando desde instrucciones en código maquina hasta la creación de aplicaciones móviles y web complejas [10]. Por tal motivo, la selección de herramientas es un proceso relevante y debe tenerse en cuenta diferentes factores como el ecosistema tecnológico del proyecto a probar, el nivel de pruebas a aplicar y presupuesto.

A continuación, se exponen brevemente algunas herramientas relevantes en el ámbito de pruebas.

Selenium

Esta herramienta de software libre se utiliza principalmente para la ejecución de pruebas funcionales, contiene Selenium IDE, que genera el entorno de desarrollo y permite crear los casos de prueba para sistemas web, el Selenium WebDriver que ejecuta las pruebas en diferentes navegadores y por último Selenium Grid, la cual permite ejecutar pruebas en varios equipos y navegadores simultáneamente [8].

JMeter

Es una herramienta gratuita, utilizada principalmente para la ejecución de pruebas de carga para analizar y medir el rendimiento de una variedad de servicios [8].

Useberry

Es una plataforma de pruebas de usabilidad remota y no moderada diseñada para validar prototipos y sitios web con usuarios reales. Esta se integra con herramientas como Figma o Adobe XD para obtener métricas de comportamiento (mapas de calor, flujos de usuario) sin escribir código [11], facilitando la toma de decisiones de diseño. Cabe recalcar que esta herramienta tiene una versión gratuita la cual esta diseñada para ser implementada en proyecto pequeño, teniendo limitaciones en respuestas, pero su versión de pago elimina restricciones y añade funciones avanzadas con un mayor almacenamiento de pruebas.

Jest

Es una de las bibliotecas gratuita de pruebas de JavaScript más populares, esta se utiliza generalmente para pruebas unitarias y de integración, siendo compatible con distintos marcos de JavaScript, como React, Angular, NestJS y Express [12].

Postman

Esta plataforma con versión gratuita y de pago, permite a los desarrolladores y probadores comunicarse con las API, autorizando a los usuarios crear solicitudes, analizar respuestas y validar el comportamiento de las API. En lugar de adivinar si algo funciona, se puede enviar una solicitud y ver la respuesta rápidamente [13].

E. Normativas y estandares internacionales

Estas constituyen un conjunto de directrices, buenas prácticas y marcos de referencia que permiten llevar a cabo procesos de prueba de forma sistemática, controlada y repetible. Estas guías son fundamentales para asegurar la calidad del producto, mejorar la eficiencia del proceso de pruebas, y garantizar la conformidad con requisitos técnicos, legales y del negocio.

En la actualidad, existen varios órganos reguladores internacionales que documentan en sus normas varios estándares para las pruebas de software, como:

ISO/IEC 29119

Esta norma es un conjunto de estándares, el cual se puede utilizar dentro de cualquier ciclo de vida u organización que se dedique al ámbito de la programación. El objetivo principal de esta norma es definir un solo estándar de pruebas el cual cubra todo el ciclo de vida del software, incluyendo aspectos iniciales desde la organización, gestión, y diseño, hasta los técnicos, como lo son la ejecución y documentación [14].

Este estándar se estructura en 5 partes diferentes como lo son la *ISO/IEC/IEEE 29119-1* el cual se enfoca en los conceptos y definiciones, la *ISO/IEC/IEEE 29119-2* que se encarga de definir el proceso de pruebas para realizarlas de manera genérica, donde se pueda utilizar en cualquier desarrollo, la *ISO/IEC/IEEE 29119-3* que especifica la documentación a seguir de manera adaptable a cada proyecto y la *ISO/IEC/IEEE 29119-4* que define las diferentes técnicas de pruebas con sus correspondientes coberturas y por último la *ISO/IEC/IEEE 29119-5* la cual se encarga de definir los requisitos en los marcos para las pruebas basadas en palabras clave y los requerimientos mínimos para las herramientas de apoyo.

ISO/IEC 25010

Esta normativa forma parte de la serie de estándares internacionales SQuaRE (Software product Quality Requirements and Evaluation). [15] su principal función es establecer los parámetros mínimos y criterios comunes para determinar si un producto de software puede considerarse de calidad. Esta describe un modelo bipartido que abarca tres 3 dimensiones principales para evaluar un producto de software los cuales son: calidad interna, calidad externa y calidad de uso.

La funcionalidad, fiabilidad, usabilidad, eficiencia de desempeño, seguridad, compatibilidad, portabilidad y mantenibilidad son las 8 características fundamentales que propone esta norma para facilitar la evaluación además de subdividirse en sub-características que se manifiestan externamente cuando el software se utiliza como parte de un sistema informático.

III. Metodología

Esta investigación se fundamenta en un enfoque metodológico aplicado, orientado principalmente al desarrollo de una solución técnica para el contexto académico de la Universidad Antonio José Camacho. El proceso se estructuro en las siguientes fases:

1) Exploración del ecosistema de pruebas de software

Durante esta fase inicial se realizó una revisión sistemática de la literatura para identificar los principales enfoques, metodologías y herramientas utilizadas en las pruebas de software. Para ello, se utilizaron bases de datos académicas como Dimensions AI, Google Academic y The lens con el objetivo de identificar los elementos más relevantes y aplicables al contexto de los proyectos de grado de Ingeniería de Sistemas.

2) Diseño de la arquitectura del marco de pruebas

Basándose en los hallazgos de la información recopilada en la etapa exploratoria, se procedió al diseño de la arquitectura general del marco de pruebas. Además, esta se estructuró en cinco capas funcionales que representan las diferentes etapas del proceso de pruebas de software.

3) Implementación para evaluación del marco

Para verificar la aplicabilidad y efectividad de la investigación propuesta, Se realizó la implementación del marco de pruebas en un proyecto de grado dentro de la institución. El proyecto correspondió a un sistema de monitoreo de calidad del agua desarrollado bajo metodología ICONIX, el cual se encontraba en una fase avanzada de construcción, permitiendo aplicar diferentes niveles y tipos de pruebas de software.

IV. Resultados

La arquitectura que se propuso se fundamenta principalmente en el STLC (Ciclo de vida de pruebas de software) y se adapta a las características y recursos de un proyecto de grado académico.

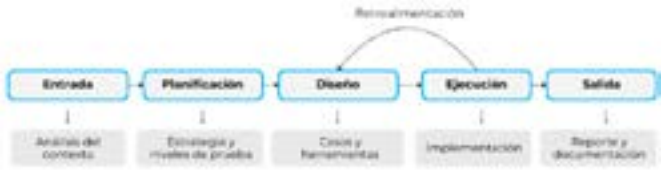


Fig 3. Componentes generales de la arquitectura propuesta, tomado de: autoría propia.

Esta ha sido diseñada bajo un enfoque modular, el cual, facilita la mantenibilidad y compresión del sistema al dividirlo en componentes con funciones específicas, permitiendo la adaptabilidad e integración según la necesidad [4].

A continuación, se detallan los elementos y actividades de cada capa propuesta en el marco de pruebas para proyectos de grado de Ingeniería de Sistemas:

A. Capa de entrada: Análisis del contexto y requisitos del proyecto

El objetivo de este primer módulo es la caracterización del proyecto de grado a evaluar, de tal forma que se logre determinar el alcance y las necesidades en la planificación. Aquí se toma como entrada la información preliminar como el tipo de proyecto, metodología utilizada, arquitectura del sistema, tecnologías utilizadas, requerimientos funcionales y no funcionales en conjunto de los criterios de calidad a evaluar.

B. Capa de planificación: Definición de estrategias y niveles de prueba

En este segundo modulo, las actividades propuestas es la elaboración del plan de pruebas el cual contenga información relevante como el alcance, los objetivos, criterios de aceptación y suspensión, riesgos, recursos, y cronograma. Además, se propone una pirámide de pruebas adaptada a los proyectos de grado, que incluye en su base niveles como pruebas unitarias y SAST (Pruebas de seguridad estáticas), de integración, de rendimiento, de sistemas y de aceptación. También se tiene en cuenta la selección de las herramientas.

C. Capa de diseño: Construcción de artefactos de prueba

En este tercer modulo, se convierte la estrategia en elementos concretos como la creación de casos de pruebas y su correspondiente priorización, la preparación de los datos de pruebas y la configuración de los escenarios y herramientas de automatización.

D. Capa de ejecución: Implementación y registro de pruebas

Aquí se ejecutan los casos de pruebas escritos anteriormente y se registran todos los defectos encontrados, además de gestionar los incidentes y realizar su respectivo seguimiento.

E. Capa de salida: Evaluación, informes y cierre final.

Se analizan los resultados obtenidos, se generan informes que evidencien el proceso de pruebas y se evalúa el cumplimiento de los criterios de aceptación, en conjunto de documentar las lecciones aprendidas.

V. Desarrollo e Implementación

El marco de pruebas fue validado en el proyecto de grado titulado como "*Desarrollo de un sistema de monitoreo de la calidad del agua del arroyo de la sede sur de la Institución Universitaria Antonio José Camacho utilizando inteligencia artificial y diseño centrado en el usuario*". [16] Este sistema, desarrollado bajo la metodología ICONIX, se caracterizó por integrar una arquitectura de IoT (Internet de las cosas) con una aplicación web moderna, lo que lo convierte en un escenario ideal para colocar a prueba el marco diseñado.

El proceso de verificación se inició aplicando la primera fase del marco, cuyo objetivo principal es lograr una comprensión del proyecto a evaluar. Durante esta etapa, se llevó a cabo una reunión de transferencia de conocimiento con el desarrollador del proyecto, complementada con una revisión de la documentación técnica, que incluyo los requerimientos funcionales y no funcionales, diagramas de casos de uso, de secuencia, robustez y de despliegue definidos en su metodología. Como resultado de este análisis, se determinó que su arquitectura se compone de un nodo IoT con sensores, un backend en NestJS, un frontend en Next.js y su base de datos en PostgreSQL, donde la comunicación entre hardware y software se realiza mediante el protocolo MQTT.

Adicionalmente, se identificó y consolido un total de 16 requisitos, discriminados en 12 funcionales, que abarcaban desde la captura y transmisión de datos hasta la clasificación del riesgo y exportación de reportes. Por otro lado, 4 no funcionales, los cuales incluyen atributos críticos como la usabilidad, eficiencia y seguridad del sistema.

Esta actividad permitió identificar inequívocamente las funcionalidades de mayor criticidad para el usuario, como el cálculo del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA), visualización de parámetros, la generación y configuración de alertas, estableciendo una base sólida y trazable para la posterior definición de la estrategia de pruebas.

Una vez caracterizado el proyecto, se avanzó hacia la Capa de Planificación. En esta fase, se elaboró el plan de pruebas del proyecto, un documento que formalizó la estrategia de verificación a seguir. En este plan se definió de manera precisa el alcance de las pruebas, especificando qué funcionalidades serían evaluadas y cuáles quedarían fuera del ciclo de verificación. Asimismo, se establecieron los criterios de aceptación y rechazo para determinar el éxito de cada prueba, así como los criterios de suspensión y reanudación para gestionar situaciones imprevistas durante la ejecución. Se identificaron y documentaron los riesgos potenciales del proceso, junto con sus correspondientes planes de contingencia. El plan también detalló los recursos de hardware y software necesarios para la configuración del entorno de pruebas, se definió la matriz de responsabilidades, y se estableció un cronograma con las fechas clave para cada actividad del ciclo de pruebas. Esta planificación garantizó que la ejecución se llevara a cabo de manera ordenada.

Con la estrategia definida, se procedió con la Capa de Diseño. El objetivo de esta etapa fue transformar la planificación en elementos concretos y ejecutables. Se procedió al diseño y la redacción detallada de los casos de prueba, asegurando que cada uno incluyera la descripción del escenario, los pasos a seguir, los datos de entrada requeridos y el resultado esperado. Estos casos de prueba fueron posteriormente priorizados según su nivel de relevancia funcional y criticidad para el usuario, garantizando que los flujos más importantes, como el cálculo del IRCA y la generación de alertas, fueran verificados en primer lugar.

La verificación práctica del software se llevó a cabo en la Capa de Ejecución. Donde, se ejecutaron de manera sistemática los casos de prueba previamente diseñados y priorizados sobre el sistema funcional. Los resultados de cada ejecución fueron registrados meticulosamente, documentando tanto los casos exitosos como los fallidos. Cuando se identificaban defectos o comportamientos inesperados, estos se reportaban formalmente y se gestionaban de manera colaborativa con el desarrollador del proyecto, quien se encargaba de su corrección.

Finalmente, se abordó la Capa de Salida. En esta última etapa, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de todos los resultados obtenidos durante la fase de ejecución. Toda la información recopilada, incluyendo el registro de ejecución, los defectos encontrados, su estado final y las métricas de cobertura de pruebas, se consolidó en un informe final de pruebas. Este documento no solo sirvió como evidencia formal del proceso de verificación, sino también como un instrumento de validación de la calidad del sistema, destacando el cumplimiento de los criterios de aceptación establecidos en la planificación. Como complemento esencial, se documentaron las lecciones aprendidas a lo largo de todo el ciclo de pruebas, identificando tanto las fortalezas como las oportunidades de mejora en la aplicación del marco.

VI. Conclusiones

El desarrollo de esta investigación permite concluir que la ausencia de una estrategia de pruebas estandarizada en los proyectos académicos de Ingeniería de Sistemas es una problemática abordable mediante la adopción de marcos de trabajo estructurados y contextualizados.

Al clasificar las técnicas y evaluar herramientas se proporciona un criterio técnico solido el cual reduce la incertidumbre y la improvisación en la fase planificación, ayudando al estudiante a tomar decisiones eficaces e informadas. Asimismo, el diseño de la arquitectura general basada en cinco capas independientes pero interconectadas facilita su integración con diversas metodologías de desarrollo garantizando que sea una guía aplicable gracias a su flexibilidad.

Por otra parte, el impacto de esta investigación es significativo, ya que no solo se limita a la propuesta técnica, sino que se traduce en un aporte directo en el área de aseguramiento de la calidad del software. Los diferentes artefactos como el plan de pruebas, análisis del contexto o informe de pruebas, ofrece un camino claro y accesible para que los estudiantes transiten de la teoría a la práctica, aplicando buenas prácticas y estándares de la industria en sus proyectos académicos. Esta experiencia formativa fortalece su perfil profesional al desarrollar un pensamiento crítico orientado a la calidad desde la etapa universitaria. En paralelo, el proyecto proporciona a los docentes del programa de Ingeniería de Sistemas una herramienta pedagógica estructurada que enriquece sus metodologías de enseñanza y evaluación, permitiéndoles

abordar los contenidos de verificación de software de una manera más aplicada y efectiva, integrando casos de estudio reales como el abordado en esta investigación.

Referencias

[1] Calpa Bravo Adriana Carolina y Garzón Mora Jeferson Steven, «De las pruebas manuales a las pruebas automáticas en el desarrollo ágil de software: caso de estudio Universidad de Nariño». Accedido: 1 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://sired.udenar.edu.co/8108/

[2] J. Thörn, P. E. Strandberg, D. Sundmark, y W. Afzal, «Quality assuring the quality assurance tool: applying safety-critical concepts to test framework development», *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 8, p. e1131, oct. 2022, doi: 10.7717/peerj-cs.1131.

[3] H. Washizaki, «SWEBOK». [En línea]. Disponible en: https://ieeecs-media.computer.org/media/education/swebok/swebok-v4.pdf

[4] *Ingeniería del software: un enfoque práctico*, Séptima edición. México; Bogotá; Buenos Aires; Caracas; Guatemala; Madrid: McGraw-Hill Education, 2013. [En línea]. Disponible en: https://apps.utel.edu.mx/recursos/files/r161r/w25309w/Libroingenieria.PDF

[5] The Institute of Electrical and Electronics Engineers., *IEEE Standard Glossary Of Software Engineering Terminology*. 1990. Accedido: 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: http://archive.org/details/ieee-standard-glossary-of-software-engineering-terminology.

[6] E. C. Morales, M. E. R. Rivera, y E. R. Lizama, «Desarrollo de un Modelo de Pruebas Funcionales de Software Basado en la Herramienta SELENIUM», *Ind. Data*, vol. 20, n.º 1, Art. n.º 1, jul. 2017, doi: 10.15381/idata.v20i1.13498.

[7] E. Guillén Figueroa, «Incorporación de pruebas no funcionales al proceso de desarrollo de software en la Unidad de Gestión de Proyectos de la Universidad de Costa Rica», 2017, Accedido: 18 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/19524

[8] S. W. Durand, «Análisis y Requerimientos de Software: manual autoformativo interactivo», *Univ. Cont.*, p. 128, 2017.

[9] D. Darias Pérez y L. Escalona Peral, «Analisis y diseno de componentes para pruebas de caja blanca», bachelorThesis, 2008. Accedido: 18 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uci.cu/jspui/handle/ident/TD_1017_08

[10] N. P. Layedra Larrea, M. V. Ramos Valencia, S. A. Salazar Cazco, y B. A. Baldeón Hermida, «Análisis de los lenguajes de programación más utilizados en el desarrollo de aplicaciones web y móviles», *Dominio Las Cienc.*, vol. 8, n.º 3, p. 132, 2022.

[11] «Useberry: cómo funciona y por qué nos gusta | Torresburriel Estudio». Accedido: 15 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://torresburriel.com/weblog/useberry-como-funciona-y-por-que-nos-gusta/

[12] I. Adewakun, «Jest adoption guide: Overview, examples, and alternatives», LogRocket Blog. Accedido: 15 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://blog.logrocket.com/jest-adoption-guide/

[13] Nehal Sharma, «What Is Postman? How to Use Postman to Test APIs?» Accedido: 15 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.igmguru.com/blog/what-is-postman

[14] W. A. Cárdenas Hernández, «Elaboración de un marco de trabajo para pruebas de software, basado en el estándar ISO/IEC/IEEE 29119 y su impacto en el proceso de evaluación del software», masterThesis, 2019. Accedido: 13 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/9758

[15] J. L. P. Medina y I. C. Sánchez, «Hacia la extensión del método GRAY WATCH basado en el estándar de calidad ISO/IEC 25010», *Publicaciones En Cienc. Tecnol.*, vol. 6, n.º 1, pp. 5-19, jun. 2012.

[16] J. Velez, «Desarrollo de un sistema de monitoreo de la calidad del agua del arroyo de la sede sur de la Institución Universitaria Antonio José Camacho utilizando inteligencia artificial y diseño centrado en el usuario». Institución Universitaria Antonio José Camacho, 2026. «No publicado»

IoT GoLab: Kit Modular Portátil para Experimentación IoT

Ansoni D. Suárez González
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
adayfransuarez@unibarranquilla.edu.co

Vladimir E. Navarro Palacio
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
venavarro@unibarranquilla.edu.co

Luz E. Marquez
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
lmarquez@unibarranquilla.edu.co

Saleth Hadechni Ospina
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia shadechni@unibarranquilla.edu.co

Resumen—Este artículo presenta el desarrollo de IoT GoLab, un kit modular portátil para la experimentación en Internet de las Cosas (IoT), construido como una herramienta didáctica para apoyar el aprendizaje práctico de electrónica, programación, automatización e integración de dispositivos. El proyecto nace de una necesidad observada en espacios académicos y de semillero: muchos estudiantes que se acercan por primera vez a proyectos tecnológicos no cuentan con bases suficientes para conectar sensores, comprender señales digitales, manejar microcontroladores o resolver problemas reales de alimentación y cableado. La propuesta se desarrolla inicialmente con un ESP32, sensores como HC-SR04, DHT11 e infrarrojo, actuadores como relé, módulo RGB y láser, y un sistema de alimentación con fuente de 12 V y regulador LM2596. La metodología se basa en el diseño, prueba e integración progresiva de módulos, documentando tanto los resultados funcionales como los errores encontrados durante el proceso. Como resultado parcial se obtiene un prototipo funcional capaz de medir variables, detectar eventos y generar respuestas visuales o de control, además de evidenciar aprendizajes técnicos sobre limitaciones de GPIO, pines especiales, GND común, protección de entradas y estabilidad eléctrica. IoT GoLab se proyecta como una plataforma replicable para fortalecer la formación práctica en IoT y facilitar la participación de estudiantes en proyectos académicos y de investigación.

Palabras clave—Internet de las Cosas, ESP32, kit didáctico, sistemas embebidos, aprendizaje práctico.

I. INTRODUCCIÓN

El Internet de las Cosas (IoT) se ha convertido en una de las áreas más representativas de la transformación digital, porque permite conectar objetos físicos a redes de comunicación para recolectar datos, analizarlos y generar acciones sobre el entorno. En la actualidad, su aplicación se observa en procesos industriales, hogares inteligentes, monitoreo ambiental, educación, salud, agricultura, ciudades inteligentes y automatización de espacios. Por esta razón, el IoT ya no es un tema aislado de la electrónica o de la programación, sino un punto de encuentro entre telecomunicaciones, redes, sensores, software y sistemas embebidos.

A pesar de su importancia, el aprendizaje de IoT puede resultar complejo para estudiantes que apenas inician su formación tecnológica. Para desarrollar un sistema IoT no basta con escribir código; también es necesario comprender cómo se alimentan los módulos, qué voltajes manejan, cuáles pines pueden utilizarse, cómo se interpreta una señal digital, qué pasa cuando dos módulos comparten recursos y por qué una mala conexión puede impedir que todo el sistema funcione. Estos detalles suelen aprenderse en la práctica, pero muchas veces el proceso se realiza de forma desordenada, con cables sueltos, pruebas aisladas y poca documentación.

Frente a esta situación se propone IoT GoLab, un kit modular portátil para experimentación IoT. La idea central es construir una maleta didáctica que funcione como un pequeño laboratorio transportable, donde distintos sensores y actuadores puedan integrarse alrededor de un microcontrolador. Su propósito no es únicamente mostrar que los módulos pueden encender o responder, sino permitir que el estudiante entienda el funcionamiento real del sistema: desde la señal que entra por un sensor hasta la acción que produce un actuador.

El prototipo inicial se desarrolló con un ESP8266 por ser una tarjeta accesible, compacta, compatible con Arduino IDE y con conectividad WiFi-integrada. Posteriormente, se desarrolla el sistema con el ESP32. Durante el proceso se trabajó con módulos como sensor ultrasónico HC-SR04, sensor DHT11 de temperatura y humedad, sensor infrarrojo de obstáculos, módulo RGB, relé de un canal, botón pulsador y módulo láser. Además, se implementó una alimentación externa de 12 V regulada a 5 V mediante un LM2596, lo que permitió analizar la importancia de la estabilidad eléctrica y del GND común.

II. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

En los programas relacionados con telecomunicaciones, electrónica, redes e informática, el aprendizaje de tecnologías IoT se ha vuelto cada vez más necesario. Sin embargo, en espacios académicos y de investigación se evidencia una dificultad frecuente: los estudiantes que ingresan por primera vez no siempre poseen conocimientos previos en programación, electrónica básica, integración de sensores o manejo de microcontroladores. Esto puede generar inseguridad, retrasos en el aprendizaje y dependencia excesiva de instrucciones ya resueltas.

El problema se vuelve más visible cuando el estudiante intenta participar en proyectos de semillero o desarrollar prototipos funcionales. En estos contextos se requiere conectar diferentes módulos, organizar la alimentación, leer sensores, depurar código, corregir errores eléctricos y tomar decisiones de diseño. Si el estudiante no ha tenido una experiencia previa guiada, puede limitarse a copiar conexiones sin comprender por qué funcionan o por qué fallan.

Durante la construcción del prototipo inicial de IoT GoLab se confirmó esta dificultad desde la práctica. Al utilizar el ESP8266 NodeMCU se encontraron limitaciones reales, como la cantidad reducida de GPIO disponibles, el comportamiento especial de algunos pines durante el arranque, el conflicto entre los pines TX/RX y el monitor serial, la diferencia entre señales de 5 V y entradas de 3.3 V, y la necesidad de una alimentación regulada. Estos aspectos suelen quedar por fuera de una explicación básica, pero son decisivos cuando se construye un sistema funcional. Dada estas limitaciones se procede a adquirir e integrar al sistema la tarjeta de desarrollo ESP32.

Por lo tanto, se identifica la necesidad de contar con una herramienta didáctica estructurada, portátil y modular, que permita aprender IoT de manera progresiva. Esta herramienta debe permitir que el estudiante pase de ejercicios simples, como leer un botón o controlar un LED, a integraciones más completas donde varios sensores y actuadores trabajen juntos. Desde esta necesidad surge la pregunta orientadora: ¿cómo desarrollar un kit modular portátil que facilite la experimentación práctica en IoT y fortalezca competencias en electrónica, programación e integración de dispositivos en estudiantes que se encuentran en etapas iniciales de formación?

III. OBJETIVOS DEL PROYECTO

A. *Objetivo general*

Desarrollar un kit modular portátil para experimentación IoT que permita integrar sensores y actuadores con fines educativos, fortaleciendo el aprendizaje práctico de electrónica, programación, automatización e IoT en estudiantes de áreas tecnológicas.

B. *Objetivos específicos*

- Diseñar la estructura general de una maleta didáctica portátil que permita organizar módulos electrónicos de forma clara, segura y funcional.
- Integrar a un microcontrolador, como unidad principal, múltiples sensores y actuadores, para su configuración y conexión.
- Realizar pruebas prácticas con los distintos módulos de entrada y salida para validar la funcionalidad del prototipo.
- Documentar el proceso de construcción, errores, ajustes y aprendizajes para facilitar la replicabilidad del proyecto.

IV. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló bajo un enfoque aplicado y experimental. Aplicado porque busca resolver una necesidad educativa concreta mediante una herramienta funcional; experimental porque el proceso se construyó a partir de pruebas, errores, ajustes y validaciones prácticas con componentes reales.

A. *Identificación de la necesidad*

Primero se reconoció que muchos estudiantes necesitan una plataforma sencilla para acercarse a IoT antes de participar en proyectos más complejos. La maleta didáctica fue pensada como un puente entre la teoría y la práctica, permitiendo iniciar con ejercicios básicos y avanzar hacia integraciones de mayor nivel.

B. *Selección de componentes*

Se seleccionó el ESP32 como controlador inicial por su bajo costo, conectividad WiFi y facilidad de programación. Luego se escogieron módulos representativos para trabajar diferentes conceptos: sensores de distancia, temperatura, humedad y obstáculos; actuadores visuales y de control; y un sistema de alimentación regulada.

C. *Pruebas individuales*

Cada módulo se probó de manera independiente antes de integrarlo al sistema completo. Se realizaron pruebas con el LED interno del ESP8266, el módulo RGB, el sensor ultrasónico, el DHT11, el relé, el botón, el sensor infrarrojo y el láser. Esta fase permitió comprobar el funcionamiento de cada elemento y detectar comportamientos particulares, como la lógica invertida del LED interno o la activación LOW del relé.

D. *Integración multisensor*

Luego de validar los módulos por separado, se integraron varios componentes dentro de un mismo programa. Se implementaron respuestas basadas en eventos, como cambios de color del RGB según la distancia medida por el HC-SR04 o según la temperatura del DHT11. También se probó el botón como entrada para generar cambios aleatorios de color y el sensor infrarrojo como detector de proximidad.

E. *Documentación de problemas y ajustes*

Una parte fundamental de la metodología fue documentar los problemas encontrados. En lugar de ocultar los errores, se asumieron como evidencia del aprendizaje. Se registraron limitaciones de pines, conflictos con Serial, necesidad de protección en ECHO, importancia del GND común, ajuste de sensibilidad en sensores y decisiones como remover el buzzer para liberar recursos.

V. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

IoT GoLab se concibe como una plataforma modular donde cada componente cumple una función didáctica. El microcontrolador central es el ESP32 NodeMCU, encargado de ejecutar la lógica programada, leer entradas digitales y activar salidas. A su alrededor se integran sensores y actuadores que permiten desarrollar prácticas relacionadas con medición, detección, visualización, automatización y control.

El sistema fue distribuido físicamente sobre una base rígida tipo MDF o cartón técnico, buscando una organización visual clara. La ubicación de los módulos se pensó para facilitar la observación, el cableado y el mantenimiento. El ESP32 se

ubicó en una zona central, el regulador LM2596 en la parte superior, el RGB y sensores en zonas visibles, y los actuadores en puntos separados para evitar confusión entre alimentación, señal y tierra.

La selección de módulos se realizó con intención pedagógica. El HC-SR04 permite trabajar medición de distancia y tiempos de respuesta; el DHT11 permite observar variables ambientales como temperatura y humedad; el sensor infrarrojo permite detectar presencia u obstáculos; el RGB permite representar estados visuales; el relé permite comprender la activación de cargas externas; el botón introduce el concepto de entrada digital con INPUT_PULLUP; y el láser sirve como actuador visual simple.

TABLE I. MÓDULOS INTEGRADOS EN EL PROTOTIPO

Módulo	Función didáctica	Tipo
ESP32	Control principal y comunicación WiFi	Microcontrolador
HC-SR04	Medición de distancia	Sensor
DHT11	Temperatura y humedad	Sensor
Sensor infrarrojo	Detección de obstáculos	Sensor
LDR	Resistencia fotosensible	Sensor
MQ135	Detección de presencia de gases	Sensor
RGB	Indicador visual de estados	Actuador
Relé 1 canal 5 V	Simulación de control de carga	Actuador
Botón pulsador	Entrada digital	Entrada
Módulo láser	Salida visual controlada	Actuador
LM2596	Regulación de alimentación	Potencia

A. DISEÑO ELÉCTRICO Y ASIGNACIÓN DE PINES

Uno de los aprendizajes más importantes del proyecto fue comprender que la asignación de pines no puede hacerse de manera improvisada. Aunque el ESP32 NodeMCU ofrece varios pines identificados como D0, D1, D2 y así sucesivamente, no todos se comportan igual. Algunos tienen funciones especiales durante el arranque, otros están relacionados con la comunicación serial y otros pueden generar errores si se conectan a módulos que fuerzan niveles lógicos incorrectos.

La distribución utilizada en el prototipo permitió integrar varios módulos de forma simultánea, aunque también dejó en evidencia la limitación de GPIO del ESP8266. El buzzer, por ejemplo, fue retirado posteriormente para liberar RX y reducir conflictos con el monitor serial. El módulo láser fue ubicado en TX, pero se identificó que este pin puede parpadear durante el arranque y afectar la depuración. Estos resultados muestran la importancia de enseñar al estudiante no solo a conectar, sino a analizar las consecuencias de cada decisión.

TABLA II. MAPA DE PINES UTILIZADO EN EL PROTOTIPO

Pin ESP8266	Módulo conectado	Observación
D0	TRIG HC-SR04	Salida digital para disparo
D1	Relé	Salida de control
D2	Botón	Entrada con INPUT_PULLUP
D3	Sensor IR	Pin especial de arranque, usar con cuidado
D4	DHT11	Pin especial de arranque, usar con cuidado
D5	RGB rojo	Salida PWM
D6	RGB verde	Salida PWM
D7	RGB azul	Salida PWM
D8	ECHO HC-SR04	Requiere divisor resistivo
TX	Láser	Puede interferir con Serial
RX	Libre	Inicialmente buzzer, luego removido

En cuanto al sensor ultrasónico HC-SR04, se identificó un punto crítico: su pin ECHO entrega una señal de aproximadamente 5 V, mientras que las entradas del ESP8266 trabajan con lógica de 3.3 V. Por esta razón, se planteó el uso de un divisor resistivo antes de conectar la señal al pin D8. Este tipo de protección es fundamental para evitar daños en el microcontrolador y permite introducir al estudiante en el concepto de compatibilidad de niveles lógicos.

B. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

El sistema de alimentación fue diseñado a partir de una fuente principal de 12 V y un módulo regulador LM2596 Step Down. Esta decisión se tomó porque el ESP8266 y la mayoría de los módulos del prototipo no pueden alimentarse directamente con 12 V. El regulador permite obtener una salida estable de 5 V, útil para alimentar módulos como el relé, el sensor ultrasónico y otros actuadores de bajo consumo.

La conexión básica del LM2596 se realizó conectando IN+ a la fuente de 12 V, IN- a GND, OUT+ como salida regulada de 5 V y OUT- al mismo GND común. Antes de conectar los módulos, la salida debe ajustarse con multímetro para asegurar que el voltaje sea adecuado. Este procedimiento es importante porque una salida mal ajustada puede dañar componentes o generar inestabilidad.

Durante las pruebas se aprendió que uno de los conceptos más importantes en sistemas electrónicos integrados es el GND común. Todos los módulos deben compartir una misma referencia de tierra: ESP8266, LM2596, sensores y actuadores. Si esto no se cumple, las señales pueden interpretarse de manera incorrecta, aparecer lecturas falsas o fallar la activación de salidas. Este aprendizaje es central dentro del propósito didáctico del kit, porque muestra que la electrónica no depende únicamente del código, sino también de una correcta referencia eléctrica.

VI. RESULTADOS PARCIALES

Inicialmente se obtuvieron varias opciones para el diseño de la maleta, con lo cual se determina la disposición más adecuada para cada elemento.



Fig. 1Diseño de la maleta IoT.

Teniendo esto en mente, se procede a avanzar en el diseño 3D de la maleta externa.

El prototipo se encuentra en una etapa funcional de integración multisensor. Hasta el momento, IoT GoLab permite medir distancia, leer temperatura y humedad, detectar obstáculos, controlar iluminación RGB, activar un relé, responder a un botón y manejar un módulo láser. Estas funciones demuestran que el sistema puede ser utilizado como plataforma básica para prácticas de electrónica e IoT.

Uno de los resultados más visibles fue el uso del módulo RGB como indicador de estados. Con el sensor ultrasónico se implementó una lógica donde los colores representan niveles de proximidad: azul para lejos, verde para una distancia media, amarillo para cerca y rojo para muy cerca. Esta práctica es sencilla, pero permite comprender la relación entre una variable física, una lectura del sensor y una respuesta visual programada.

También se realizaron pruebas con el DHT11, donde el RGB cambia según la temperatura. De esta manera, el estudiante puede observar cómo una medición ambiental se traduce en un comportamiento del sistema. Este tipo de práctica es valiosa porque conecta programación, sensores y visualización de datos de una forma clara y fácil de entender.

Otro resultado importante fue la validación del sistema de alimentación independiente. Al utilizar el LM2596 se logró trabajar con una fuente externa, reduciendo la dependencia del puerto USB y permitiendo alimentar módulos que requieren mayor estabilidad. Esta experiencia permitió entender por qué un sistema IoT debe considerar consumo, regulación y distribución de energía desde el diseño.

Sin embargo, los resultados también mostraron límites importantes del ESP8266. La cantidad de pines disponibles se volvió un factor crítico al integrar múltiples módulos. Además, el uso de pines especiales como D3, D4 y D8 requiere cuidado para evitar problemas de arranque. Estos hallazgos no reducen el valor del prototipo; al contrario, fortalecen su sentido educativo, porque muestran situaciones reales que un estudiante debe aprender a resolver.



Fig. 2Borrador en curso del prototipo .

VII. DISCUSIÓN

La experiencia de construcción de IoT GoLab permite afirmar que un kit didáctico modular puede mejorar la forma en que los estudiantes se acercan al IoT. Al tener los módulos organizados en una plataforma física, el estudiante puede relacionar con mayor facilidad el código con la respuesta del hardware. Esta relación es fundamental, porque muchas dificultades aparecen cuando se trabaja únicamente desde ejemplos aislados o simulaciones.

El proyecto también demuestra que las limitaciones técnicas pueden convertirse en oportunidades de aprendizaje. El hecho de que el ESP8266 tenga pocos pines obliga a planificar, priorizar módulos y entender qué pines conviene usar. El conflicto con TX y RX permite explicar la importancia del monitor serial en la depuración. La necesidad del divisor resistivo en ECHO permite introducir protección electrónica. La alimentación con LM2596 permite hablar de regulación, corriente y estabilidad. Cada problema aporta una enseñanza concreta.

Desde una perspectiva académica, el mayor valor del proyecto está en su capacidad para acompañar un proceso progresivo. Un estudiante principiante puede iniciar encendiendo un LED o leyendo un botón, luego avanzar hacia sensores y finalmente construir una automatización básica. Esta progresión evita que el estudiante se enfrente de golpe a un sistema complejo y favorece una apropiación más natural del conocimiento.

VIII. TRABAJO FUTURO

Aunque el prototipo actual es funcional, se proyectan mejoras importantes para una versión más robusta. La primera mejora es migrar de ESP8266 a ESP32, debido a que este ofrece mayor cantidad de GPIO, mejor capacidad de procesamiento y más posibilidades de comunicación. Esta migración permitiría integrar más sensores simultáneamente sin depender de pines delicados o de compartir recursos críticos.

También se plantea incorporar una pantalla OLED para mostrar datos de sensores en tiempo real, desarrollar una interfaz web para control o monitoreo, agregar comunicación Bluetooth o WiFi avanzada, incluir servomotores, crear modos automáticos y diseñar una PCB o placa base que reduzca el desorden del cableado. A largo plazo, el sistema podría convertirse en una herramienta institucional para prácticas de laboratorio, actividades de semillero, ferias académicas y proyectos de formación en IoT.

IX. CONCLUSIONES

IoT GoLab demuestra que es posible construir una herramienta didáctica funcional a partir de componentes accesibles, siempre que exista una metodología clara de diseño, prueba y documentación. El prototipo no solo integra sensores y actuadores, sino que permite comprender conceptos fundamentales como señales digitales, alimentación regulada, GND común, compatibilidad de voltajes, limitaciones de pines y lógica basada en eventos.

El uso del ESP8266 NodeMCU fue adecuado para una primera versión, porque permitió desarrollar prácticas reales de IoT con bajo costo y facilidad de programación. No obstante, las pruebas realizadas evidenciaron que para versiones más amplias será necesario considerar controladores con mayor capacidad, como el ESP32.

Finalmente, el proyecto tiene un valor educativo importante porque acerca al estudiante al aprendizaje práctico de una forma clara, progresiva y humana. IoT GoLab no pretende reemplazar la teoría, sino complementarla con experiencia real. Al permitir que el estudiante conecte, pruebe, falle, corrija y entienda, el kit se convierte en un apoyo para fortalecer competencias técnicas y facilitar la participación en proyectos académicos y de investigación.

X. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Semillero de Investigación de Aplicaciones Telemáticas y al programa académico por promover espacios donde los estudiantes puedan construir, experimentar y aprender a partir de problemas reales. También se reconoce el valor del aprendizaje colaborativo y de la orientación docente en el desarrollo de prototipos tecnológicos.

REFERENCIAS

[1] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “The Internet of Things: A survey,” Computer Networks, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.

[2] A. Bahga and V. Madisetti, Internet of Things: A Hands-On Approach. VPT, 2014.

[3] Espressif Systems, ESP8266EX Datasheet. Espressif Systems.

[4] Espressif Systems, ESP8266 Technical Reference Manual. Espressif Systems.

[5] S. Monk, Programming Arduino: Getting Started with Sketches, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2016.

[6] M. McRoberts, Beginning Arduino, 2nd ed. New York, NY, USA: Apress, 2013.

[7] Arduino, Arduino Documentation. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc.

Determinación de aflatoxina M1 en leche bovina cruda producida en áreas rurales del municipio de Florencia, Caquetá

1st **Gabriel González García**
Programa de Ingeniería de Alimentos
Universidad de la Amazonia
Florencia, Colombia
ga.gonzalez@udla.edu.co

2nd **Jorge Iván Arredondo Marín**
Programa de Ingeniería de Alimentos
Universidad de la Amazonia
Florencia, Colombia
j.arredondo@udla.edu.co

Resumen—La *aflatoxina M1* (AFM1) en leche bovina constituye un problema relevante para la inocuidad alimentaria y la salud pública, especialmente en regiones con actividad ganadera como el departamento del Caquetá. Este compuesto es un metabolito derivado de la *aflatoxina B1*, producida por hongos del género *Aspergillus*, capaces de contaminar los alimentos destinados a la alimentación del ganado bovino. Tras la ingestión de *aflatoxina B1*, esta es metabolizada en el hígado del animal y transformada en *aflatoxina M1*, la cual puede ser excretada en la leche.

El objetivo de este estudio fue determinar la presencia y los niveles de *aflatoxina M1* en leche bovina cruda procedente de fincas rurales del municipio de Florencia, Caquetá. Se recolectaron quince muestras en quince fincas y se analizaron mediante la técnica inmunoenzimática ELISA utilizando el kit AgraQuant®, con una metodología adaptada de un procedimiento previamente publicado para leche cruda y pasteurizada.

Se cuantificaron concentraciones de AFM1 en todas las muestras analizadas, con niveles en el rango de 0,01 a 2,10 µg/Kg. La concentración media fue de 0,475 µg/Kg, con una desviación estándar de 0,575 µg/Kg y una mediana de 0,22 µg/Kg. En relación con los límites regulatorios, seis muestras superaron 0,5 µg/Kg y una muestra adicional presentó exactamente 0,50 µg/Kg, mientras que diez muestras superaron 0,05 µg/Kg y una muestra adicional presentó exactamente 0,05 µg/Kg.

El análisis de varianza mostró que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones promedio de AFM1 en las zonas Este, Sur y Norte del municipio [F(2,12) = 0,634; p = 0,548]. Estos resultados evidencian la ocurrencia de *aflatoxina M1* en leche bovina cruda producida en sistemas ganaderos rurales del municipio de Florencia y resaltan la necesidad de fortalecer las estrategias de vigilancia, prevención y control de micotoxinas en la cadena láctea regional.

Palabras clave—*Aflatoxina M1, leche bovina cruda, ELISA, inocuidad alimentaria, producción lechera.*

I. Introducción

La leche bovina es uno de los alimentos de mayor importancia en la dieta humana debido a su alto valor nutricional y a su amplio consumo en diferentes grupos poblacionales. Sin embargo, su calidad e inocuidad pueden verse comprometidas por la presencia de contaminantes químicos y biológicos, entre ellos las micotoxinas. Dentro de este grupo, la *aflatoxina M1* (AFM1) ha sido ampliamente reconocida por su relevancia toxicológica y por su asociación con el consumo de leche y derivados lácteos contaminados [1], [3].

La *aflatoxina M1* es un metabolito hidroxilado de la *aflatoxina B1* (AFB1), producida principalmente por hongos como *Aspergillus flavus* y *Aspergillus parasiticus*. Estos microorganismos pueden contaminar materias primas y alimentos balanceados utilizados en la alimentación del ganado, especialmente cuando existen condiciones inadecuadas de almacenamiento, elevada humedad y temperaturas favorables para su desarrollo. Una vez ingerida por el animal, la *aflatoxina B1* es absorbida y metabolizada en el hígado, generando *aflatoxina M1*, la cual puede ser excretada a través de la leche [1], [2], [23].

La presencia de *aflatoxina M1* en leche cruda representa una preocupación para la salud pública debido a que este alimento es consumido ampliamente por la población y porque la toxina presenta alta estabilidad durante varios procesos de transformación láctea. Por ello, la evaluación de este contaminante en leche constituye una herramienta importante para el aseguramiento de la inocuidad alimentaria y para la vigilancia sanitaria de la cadena láctea [1], [2], [21], [22].

En Colombia, el nivel máximo permitido para *aflatoxina M1* en leche es de 0,5 µg/Kg, de acuerdo con la Resolución 4506 de 2013 [4]. Este valor coincide con el nivel máximo

reportado por el Codex Alimentarius para leche, equivalente a $5x10^{-4}$ mg/Kg o 0,5 µg/Kg [5]. En contraste, la Unión Europea adopta un criterio más estricto de 0,05 µg/Kg, lo cual modifica de manera importante la interpretación del cumplimiento regulatorio [6].

En Colombia, estudios previos realizados en Boyacá han documentado la ocurrencia de *aflatoxina M1* en leche cruda y en tanques de enfriamiento, así como variaciones asociadas a la temporada climática y al manejo del sistema productivo [8], [9]. A nivel internacional, diversos estudios han confirmado la presencia de AFM1 en leche cruda y productos lácteos en sistemas productivos de Irán, Portugal, Pakistán, Tailandia, Kenia, India y Brasil, lo que refuerza la necesidad de fortalecer la vigilancia en regiones con actividad ganadera y condiciones favorables para el desarrollo de hongos toxigénicos [10], [18].

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar la presencia y los niveles de *aflatoxina M1* en leche bovina cruda procedente de fincas rurales del municipio de Florencia, Caquetá, mediante la técnica inmunoenzimática ELISA.

II. Materiales y Métodos

El estudio se desarrolló en el municipio de Florencia, departamento del Caquetá, Colombia, en fincas rurales dedicadas a la producción de leche bovina cruda.

Se recolectaron un total de 15 muestras, correspondientes a 15 fincas, y cada finca aportó una muestra para el análisis. Las muestras fueron transportadas en condiciones de refrigeración, entre 3 y 5 °C, y analizadas dentro de las 24 horas posteriores a su recolección, siguiendo como referencia el esquema de manejo y conservación de muestras descrito por Landeros et al. para la determinación de *aflatoxina M1* en leche [25].

La cuantificación de *aflatoxina M1* se realizó mediante la técnica de ELISA competitivo-directo, empleando el kit AgraQuant® Aflatoxina M1 (Romer Labs), con una metodología adaptada de la descrita por Landeros et al. para leche cruda y pasteurizada [25].

De acuerdo con la información técnica del fabricante, AgraQuant® corresponde a un inmunoensayo cuantitativo diseñado para la determinación de *aflatoxina M1* en leche y productos lácteos [7].

Previo al análisis, las muestras de leche se homogenizaron y se sometieron a enfriamiento y centrifugación para favorecer la separación de la fracción grasa. Posteriormente, se emplearon los estándares y las muestras preparadas en los pocillos de la microplaca, incubándose bajo las condiciones descritas para el ensayo.

Luego de los lavados correspondientes, se adicionaron el conjugado y la solución de sustrato, y finalmente se registró la densidad óptica en un lector de ELISA utilizando filtros de 450 nm para lectura y 630 nm como referencia. Las concentraciones de *aflatoxina M1* se determinaron por extrapolación a partir de la curva de calibración. En la metodología de referencia, el ensayo reportó un límite de detección de 0,005 µg/L [25].

Para el análisis espacial exploratorio, las 15 muestras se agruparon en tres zonas del municipio de Florencia, según la organización del estudio: Este (muestras 1 a 5), Sur (muestras 6 a 10) y Norte (muestras 11 a 15). Se calcularon estadísticos descriptivos de la concentración de *aflatoxina M1*, incluyendo media, desviación estándar, mediana, valor mínimo y valor máximo.

Además, se determinó la cantidad de muestras que superaron el límite de 0,5 µg/Kg, correspondiente a la referencia normativa empleada en Colombia y al nivel máximo reportado por el Codex Alimentarius para leche, así como el número de muestras que excedieron el valor de 0,05 µg/Kg utilizado por la Unión Europea [4], [6].

Para evaluar posibles diferencias en la concentración media de *aflatoxina M1* entre las tres zonas del municipio, se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA), siguiendo el enfoque general de comparación entre grupos, aunque adaptado al diseño del presente estudio reportado por [25].

III. Resultados y Discusión

Se cuantificaron concentraciones de *aflatoxina M1* en las 15 muestras de leche bovina cruda analizadas, con niveles en el rango de 0,01 a 2,10 µg/Kg. La concentración media fue de 0,475 µg/Kg, con una desviación estándar de 0,575 µg/Kg, una mediana de 0,22 µg/Kg, un valor mínimo de 0,01 µg/Kg y un valor máximo de 2,10 µg/Kg.

TABLA I. Concentración de Aflatoxina M1 en Muestras de Leche Bovina Cruda

Muestra	Concentración (µg/Kg)	Zona
1	0,02	Este
2	0,65	Este
3	0,09	Este
4	1,12	Este
5	0,01	Este
6	0,52	Sur
7	0,05	Sur
8	0,88	Sur
9	0,03	Sur
10	2,10	Sur
11	0,15	Norte
12	0,50	Norte
13	0,22	Norte
14	0,74	Norte
15	0,04	Norte

Descriptivamente, la zona Sur presentó la media más alta de AFM1 (0,716 µg/Kg), seguida de la zona Este (0,378 µg/Kg) y la zona Norte (0,330 µg/Kg). Sin embargo, estas diferencias debían ser evaluadas estadísticamente mediante ANOVA.

TABLA II. Estadisticos Descriptivos de la Concentración de AFM1 Por Zona

Zona	Número de muestras	Media (µg/Kg)	Desviación estándar	Mediana (µg/Kg)	Mínimo (µg/Kg)	Máximo (µg/Kg)
Este	5	0,378	0,492	0,09	0,01	1,12
Sur	5	0,716	0,850	0,52	0,03	2,10
Norte	5	0,330	0,285	0,22	0,04	0,74
Total	15	0,474	0,575	0,22	0,01	2,10

En relación con los límites regulatorios, seis muestras superaron el valor de 0,5 µg/Kg y una muestra adicional presentó exactamente 0,50 µg/Kg, límite máximo reportado en la normativa colombiana y en el Codex para leche [4], [5]. Asimismo, diez muestras superaron el valor de 0,05 µg/Kg y una muestra adicional presentó exactamente 0,05 µg/Kg, criterio empleado por la Unión Europea [6].

TABLA III. COMPARACIÓN CON LÍMITES REGULATORIOS

Criterio regulatorio	Muestras que superan el límite	Muestras con valor exacto del límite
Colombia / Codex (0,5 µg/Kg)	6	1
Unión Europea (0,05 µg/Kg)	10	1

Como complemento descriptivo por zonas, en el Este se registraron 2 muestras mayores o iguales a 0,5 µg/Kg y 3 muestras por encima de 0,05 µg/Kg. En el Sur se identificaron 3 muestras mayores o iguales a 0,5 µg/Kg y 3 muestras superiores a 0,05 µg/Kg, además de una muestra exactamente igual a 0,05 µg/Kg. En el Norte se registraron 2 muestras mayores o iguales a 0,5 µg/Kg, una de ellas exactamente 0,50 µg/Kg, y 4 muestras superiores a 0,05 µg/Kg.

El análisis de varianza de una vía se aplicó para comparar las concentraciones de *aflatoxina M1* entre las tres zonas del municipio: Este, Sur y Norte. El resultado fue $F(2,12) = 0,634$; $p = 0,548$, lo que indica que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones promedio de AFM1 en las tres zonas.

TABLA IV. ANOVA DE UNA VÍA PARA LA CONCENTRACIÓN DE AFM1 POR ZONA

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F	p
Entre grupos	0,442	2	0,221	0,634	0,548
Dentro de grupos	4,191	12	0,349		
Total	4,634	14			

La cuantificación de *aflatoxina M1* en todas las muestras analizadas evidencia la ocurrencia de este contaminante en leche bovina cruda procedente de fincas rurales del municipio de Florencia, Caquetá. Este hallazgo coincide con lo reportado en otros estudios, donde la presencia de AFM1 ha sido descrita en leche cruda y pasteurizada, y donde la interpretación del riesgo depende en gran medida del límite regulatorio adoptado [8], [18], [25].

En el presente estudio, los niveles oscilaron entre 0,01 y 2,10 µg/Kg, con una media de 0,474 µg/Kg. Desde el punto de vista regulatorio, la interpretación de estos datos cambia de forma importante según el marco de referencia utilizado. Bajo el criterio de Colombia/Codex (0,5 µg/Kg), una fracción menor de las muestras se ubica por encima del límite; sin embargo, al aplicar el criterio de la Unión Europea (0,05 µg/Kg), el número de muestras que exceden el valor de referencia aumenta considerablemente [4], [6].

Nuestros resultados son comparables con estudios previos realizados en Colombia, particularmente en Boyacá, donde se ha reportado la detección de AFM1 en leche cruda y en tanques de enfriamiento, así como diferencias asociadas a la temporada climática y a la variación estacional [8], [9]. De manera similar, investigaciones realizadas en Irán, Portugal, Pakistán, Tailandia, Kenia, India y Brasil han confirmado la ocurrencia de AFM1 en leche y productos lácteos, con diferencias en prevalencia y concentración según el sistema de producción, el tipo de muestra, el manejo de la alimentación animal y el límite regulatorio adoptado [10], [18].

En cuanto al análisis espacial, aunque la zona Sur presentó la media más alta de AFM1, el ANOVA no mostró diferencias estadísticamente significativas entre las zonas Este, Sur y Norte. Este resultado sugiere que, bajo las condiciones del presente estudio, la distribución espacial de las muestras no mostró un patrón de contaminación claramente diferenciado. No obstante, debe considerarse que el tamaño muestral fue reducido y que cada zona estuvo representada por solo cinco muestras, por lo que estudios futuros con mayor cobertura espacial y temporal podrían ofrecer una caracterización más robusta del comportamiento geográfico de la aflatoxina M1 en leche bovina cruda.

La literatura reciente también ha enfatizado que la AFM1 continúa siendo un peligro persistente en leche y productos lácteos por su estabilidad y por las limitaciones de las estrategias de eliminación durante el procesamiento. Revisiones recientes y estudios de exposición han resaltado la importancia de reforzar el monitoreo del alimento animal, de mejorar los métodos analíticos y de aplicar medidas preventivas a lo largo de la cadena láctea [1], [3], [21], [24].

Desde el punto de vista analítico, los métodos inmunoenzimáticos y cromatográficos siguen siendo herramientas fundamentales para la determinación de AFM1 en leche. En particular, los avances recientes en ELISA, biosensores y ensayos basados en nanocuerpos ofrecen alternativas cada vez más sensibles y específicas para el control de este contaminante en matrices lácteas [2], [7], [24].

En conjunto, los resultados obtenidos en este estudio ponen de manifiesto la necesidad de fortalecer las estrategias de vigilancia, prevención y control de micotoxinas en la cadena productiva láctea del municipio de Florencia. Asimismo, se recomienda ampliar el tamaño muestral y considerar variables como tipo de alimentación, época del año, condiciones de almacenamiento y ubicación específica de las fincas, con el fin de identificar factores asociados a la presencia de *aflatoxina M1*.

IV. CONCLUSIONES

Se cuantificaron concentraciones de *aflatoxina M1* en todas las muestras de leche bovina cruda analizadas, con niveles entre 0,01 y 2,10 µg/Kg, lo que evidencia la ocurrencia de este contaminante en fincas rurales del municipio de Florencia, Caquetá.

La concentración media de AFM1 fue de 0,474 µg/Kg, con una desviación estándar de 0,575 µg/Kg y una mediana de 0,22 µg/Kg. En relación con los límites regulatorios, seis muestras superaron 0,5 µg/Kg y una muestra adicional presentó exactamente 0,50 µg/Kg, mientras que diez muestras superaron 0,05 µg/Kg y una muestra adicional presentó exactamente 0,05 µg/Kg.

El análisis de varianza indicó que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones promedio de AFM1 en las zonas Este, Sur y Norte del municipio [$F(2,12) = 0,634$; $p = 0,548$]. Aunque la zona Sur presentó la media más alta, la variación entre zonas no fue suficiente para establecer diferencias significativas bajo las condiciones del presente estudio.

Estos resultados evidencian la ocurrencia de aflatoxina M1 en leche bovina cruda producida en la zona de estudio y resaltan la necesidad de fortalecer los programas de vigilancia e inocuidad en la cadena láctea regional [4], [6].

Finalmente, se recomienda ampliar el número de muestras e incorporar variables productivas y ambientales en futuras investigaciones, con el fin de profundizar en la caracterización del riesgo sanitario asociado a la presencia de aflatoxina M1 en leche bovina cruda en el municipio de Florencia, Caquetá.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Ingeniería de Alimentos y a la universidad de la Amazonia, por el apoyo académico, técnico y formativo brindado durante el desarrollo de la presente investigación.

De igual manera, se reconoce el valioso acompañamiento del Semillero de Investigación INTECA, cuyo compromiso, orientación y trabajo colaborativo contribuyeron significativamente al cumplimiento de los objetivos propuestos.

Así mismo, se extiende un especial agradecimiento a la docente Delia Magaly Bedoya Páez, por su dedicación, orientación constante y aportes académicos, que fueron fundamentales para el desarrollo, análisis y consolidación de este estudio.

REFERENCIAS

[1] F. B. Campagnollo, K. C. Ganev, A. M. Khaneghah, J. B. Portela, A. G. Cruz, D. Granato, C. H. Corassin, C. A. F. Oliveira, and A. S. Sant'Ana, "The occurrence and effect of unit operations for dairy products processing on the fate of aflatoxin M1: A review," Food Control, vol. 68, pp. 310–329, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.foodcont.2016.04.007.

[2] A. M. Maurelli, L. Catucci, M. Pascale, S. D'Auria, and M. Staiano, "Recent advances in the detection of aflatoxin M1 in milk and dairy products," Biosensors, vol. 15, no. 12, p. 775, 2025, doi: 10.3390/bios15120775.

[3] M. A. Rizk, L. Nehme, S. P. Snini, H. F. Hassan, F. Mathieu, and Y. El Rayess, "Mapping global research trends on aflatoxin M1 in dairy products: An integrative review of prevalence, toxicology, and control approaches," Foods, vol. 15, no. 1, p. 166, 2026, doi: 10.3390/foods15010166.

[4] Ministerio de Salud y Protección Social, "Resolución 4506 de 2013: Por la cual se establecen los niveles máximos de contaminantes en los alimentos destinados al consumo humano y se dictan otras disposiciones," Bogotá, Colombia, 30 oct. 2013.

[5] Codex Alimentarius Commission, General standard for contaminants and toxins in food and feed, CXS 193-1995, última enmienda 2025.

[6] European Commission, "Aflatoxins," Food Safety. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2006/1881/2014-07-01.

[7] Romer Labs, "AgraQuant® Aflatoxin M1 Sensitive 25/500 ELISA kit: https://www.romerlabs.com/at_en/shop/agraquant-r-aflatoxin-m1-elisa-test/

[8] L. E. Tarazona-Manrique, R. J. Andrade-Becerra, and J. C. Vargas-Abella, "Frecuencia de la contaminación de leche cruda de vaca por aflatoxina M1 en tanques de enfriamiento en Boyacá, Colombia," Cienc. Tecnol. Agropecuaria, vol. 23, no. 2, 2022, doi: 10.21930/rcta.vol23_num2_art:2058.

[9] L. E. Tarazona-Manrique, R. J. Andrade-Becerra, and J. C. Vargas-Abella, "Detección de aflatoxina M1 en muestras de leche cruda de vacas en tanques de enfriamiento en Boyacá (Colombia)," Rev. Med. Vet. Zoot., vol. 67, no. 3, 2020, doi: 10.15446/rfmvz.v67n3.93929.

[10] A. A. Fallah, "Assessment of aflatoxin M1 contamination in pasteurized and UHT milk marketed in central part of Iran," Food Chem. Toxicol., vol. 48, no. 3, pp. 988–991, 2010, doi: 10.1016/j.fct.2010.01.014.

[11] S. C. Duarte, A. M. Almeida, A. S. Teixeira, A. L. Pereira, A. C. Falcão, A. Pena, and C. M. Lino, "Aflatoxin M1 in marketed milk in Portugal: Assessment of human and animal exposure," Food Control, vol. 30, no. 2, pp. 411–417, 2013, doi: 10.1016/j.foodcont.2012.08.002.

[12] I. Hussain, J. Anwar, M. R. Asi, M. A. Munawar, and M. Kashif, "Aflatoxin M1 contamination in milk from five dairy species in Pakistan," Food Control, vol. 21, pp. 122–124, 2010, doi: 10.1016/j.foodcont.2008.12.004.

[13] S. Ruangwises and N. Ruangwises, "Occurrence of aflatoxin M1 in pasteurized milk of the School Milk Project in Thailand," J. Food Prot., vol. 72, no. 8, pp. 1761–1763, 2009, doi: 10.4315/0362-028X-72.8.1761.

[14] E. K. Kang'ethe and K. A. Lang'a, "Aflatoxin B1 and M1 contamination of animal feeds and milk from urban centers in Kenya," Afr. Health Sci., vol. 9, no. 4, pp. 218–226, 2009.

[15] C. M. Makau, J. W. Matofari, P. S. Muliro, and B. O. Bebe, "Aflatoxin B1 and deoxynivalenol contamination of dairy feeds and presence of aflatoxin M1 contamination in milk from smallholder dairy systems in Nakuru, Kenya," Int. J. Food Contam., vol. 3, art. no. 6, 2016, doi: 10.1186/s40550-016-0033-7.

[16] N. Akbar, M. Nasir, N. Naeem, M.-u.-D. Ahmad, S. Iqbal, A. Rashid, M. Imran, T. A. Gondal, M. Atif, B. Salehi, J. Sharifi-Rad, M. Martorell, and W. C. Cho, "Occurrence and seasonal variations of aflatoxin M1 in milk from Punjab, Pakistan," Toxins, vol. 11, no. 10, p. 574, 2019, doi: 10.3390/toxins11100574.

[17] D. Hattimare, S. Shakya, A. Patyal, C. Chandrakar, and A. Kumar, "Occurrence and exposure assessment of aflatoxin M1 in milk and milk products in India," J. Food Sci. Technol., vol. 59, pp. 2460–2468, 2022, doi: 10.1007/s13197-021-05265-4.

[18] C. H. Corassin, A. Borowsky, S. Ali, R. E. Rosim, and C. A. F. Oliveira, "Occurrence of aflatoxin M1 in milk and dairy products traded in São Paulo, Brazil: An update," Dairy, vol. 3, no. 4, pp. 842–848, 2022, doi: 10.3390/dairy3040057.

[19] F. Ansari, H. Pourjafar, and L. Christensen, "A study on the aflatoxin M1 rate and seasonal variation in pasteurized cow milk from northwestern Iran," Environ. Monit. Assess., vol. 191, art. no. 6, 2019, doi: 10.1007/s10661-018-7141-1.

[20] K. Nishimwe, E. L. Bowers, J. de D. Ayabagabo, R. Habimana, S. Mutiga, and D. E. Maier, "Preliminary sampling of aflatoxin M1 contamination in raw milk from dairy farms using feed ingredients from Rwanda," Mycotoxin Res., vol. 38, pp. 107–115, 2022, doi: 10.1007/s12550-022-00454-2.

[21] E. Malissiova, G. Tsinopoulou, E. S. Gerovasileiou, E. Meleti, G. Soultani, M. Koureas, I. Maisoglou, and A. Manouras, "A 20-Year data review on the occurrence of aflatoxin M1 in milk and dairy products in Mediterranean countries—Current situation and exposure risks," Dairy, vol. 5, no. 3, pp. 491–514, 2024, doi: 10.3390/dairy5030038.

[22] A. S. Jahromi, M. Jokar, A. Abdous, M. H. Rabiee, F. H. B. Biglo, and V. Rahmanian, "Prevalence and concentration of aflatoxin M1 in milk and dairy products: an umbrella review of meta-analyses," Int. Health, vol. 17, no. 4, pp. 403–415, 2025, doi: 10.1093/inthealth/ihaf002.

[23] Y. Mazaheri, P. Shavali-gilani, N. Shariatifar, A. Bakhtiyari, Z. Hadian, N. Akbari, N. Abdoli, and P. Sadighara, "Effectiveness of various methods to reduce aflatoxin M1 levels in milk, a systematic review," Food Chem. X, vol. 23, p. 101737, 2024, doi: 10.1016/j.fochx.2024.101737.

[24] D. Kourti, M. Angelopoulou, P. Petrou, and S. Kakabakos, "Sensitive aflatoxin M1 detection in milk by ELISA: Investigation of different assay configurations," Toxins, vol. 16, no. 12, p. 515, 2024, doi: 10.3390/toxins16120515.

[25] P. Landeros, M. Noa, Y. López, D. G. González, E. Noa, M. Real, C. Juárez, and M. S. Medina, "Niveles de aflatoxina M1 en leche cruda y pasteurizada comercializada en la zona metropolitana de Guadalajara, México," Rev. Salud Anim., vol. 34, no. 1, 2012.

Percepción del estrés laboral docente y efectividad percibida de las estrategias institucionales de bienestar: un estudio en la Universidad de Córdoba

1st Mercy Vanessa Herrera Petro
Dept. de Ingenieria industrial
Universidad de Córdoba
Montería, Colombia
Mherrerapetro15@correo.unicordoba.edu.co

2nd Ligia Mazo Fernandez
Dept. de Ingenieria industrial
Universidad de Córdoba
Montería, Colombia
Lmazofernandez57@correo.unicordoba.edu.co.

3rd Jeronimo Rincon Peinado
Dept. de Ingenieria Industrial
Universidad de Córdoba
Montería, Colombia
Jrinconpeinado63@correo.unicordoba.edu.co

4th Heidi Maria Echeverri Florez
Dept. de ingenieria industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
hecheverri@correo.unicordoba.edu.co.

Resumen— El estrés laboral entre los docentes universitarios se ha convertido en un factor crítico que afecta la salud, el desempeño profesional y la calidad del proceso educativo. La multiplicidad de funciones asociadas a la docencia —incluyendo la enseñanza, la investigación, la asesoría académica y la formación continua— genera una carga de trabajo que puede superar la capacidad de afrontamiento de los docentes, incrementando sus niveles de estrés e impactando negativamente su bienestar general.

Este estudio analizó la percepción del estrés laboral entre los docentes de la Universidad de Córdoba y evaluó la efectividad percibida de las estrategias institucionales de bienestar implementadas para mitigarlo. Se adoptó un enfoque de métodos mixtos con una muestra no probabilística por conveniencia. La recolección de datos se realizó mediante una encuesta basada en la escala FPEDU, complementada con un instrumento diseñado para evaluar el nivel de conocimiento, la participación y el impacto percibido de las estrategias institucionales de bienestar. El análisis se centró en identificar la relación entre los niveles de estrés y la evaluación que los docentes hacen de estas estrategias.

Los resultados revelaron una prevalencia significativa de estrés laboral, predominando niveles moderados y altos. Además, se identificó un conocimiento parcial de los programas institucionales de bienestar y bajos niveles de participación. Los docentes con mayores niveles de estrés tendieron a percibir estas estrategias como menos efectivas, evidenciando una relación entre el nivel de estrés y la evaluación de las acciones institucionales. Asimismo, se observó que las principales fuentes de estrés no estaban relacionadas exclusivamente con las actividades docentes directas, sino también con la sobrecarga laboral y las exigencias administrativas. Estos hallazgos resaltan la necesidad de fortalecer las estrategias institucionales de bienestar, no solo en términos de su implementación, sino también de su difusión, accesibilidad y alineación con las condiciones reales de trabajo de los docentes.

En conclusión, el estudio demuestra que la gestión del bienestar docente constituye un factor clave para la sostenibilidad del sistema educativo, ya que influye directamente tanto en la salud del profesorado como en la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje en la educación superior.

Palabras clave— Estrés laboral, bienestar institucional, docencia universitaria.

I. Introduccion

La labor del docente universitario no se centra únicamente en la enseñanza: muchos dedican parte de su jornada a otras actividades institucionales como la investigación, las asesorías a estudiantes, la formación continua en sus disciplinas y, en numerosos casos, cuentan con más de un trabajo o responsabilidad simultánea. Estas y otras obligaciones dificultan el equilibrio entre la vida laboral y la vida personal, ya que la sobrecarga de responsabilidades a la que se enfrenta el docente universitario puede generar altos niveles de estrés y afectar negativamente su desempeño, así como su salud mental y física.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el estrés es un estado de preocupación o tensión mental que surge ante la presencia de situaciones difíciles [1]; a pesar de ello, la mayoría de las personas continúa con sus labores diarias, incluidos los docentes, quienes, según Rodríguez y Sánchez [2], ejercen una de las profesiones más propensas a sufrirlo. En el caso de los docentes catedráticos, influyen factores intralaborales como la inseguridad de no contar con un trabajo estable y permanente, además de factores extralaborales como dificultades económicas o familiares que afectan a docentes de todos los perfiles de vinculación. Según Núñez [3], el estrés no solo afecta la salud del docente, sino también su desempeño laboral y sus relaciones interpersonales; asimismo, puede generar tensiones en el clima organizacional y deteriorar la relación con los estudiantes.

En el plano global, un informe de IPSOS publicado en octubre de 2024 revela que tres de cada cinco personas declara haber sentido estrés a un nivel en que este afecta negativamente su vida cotidiana; los encuestados señalan que el estrés es uno

de los mayores problemas a los que se enfrentan las personas hoy en día, incluso por encima del cáncer [5]. En Colombia, el 50 % de los encuestados ha experimentado en algún momento niveles de estrés que le impidieron continuar con su trabajo por un período de tiempo [5], lo que posiciona la salud mental como uno de los principales desafíos de la agenda pública y organizacional del país.

La Universidad de Córdoba, en cumplimiento de su Acuerdo 056 de 2018 [4], dispone de programas de Bienestar Universitario orientados a promover entornos de trabajo saludables para su comunidad académica, incluyendo a los docentes. Sin embargo, no todas las acciones empleadas tienen el impacto esperado en el bienestar de los colaboradores, ya sea por limitaciones en la planificación o la ejecución de las estrategias, o por otros factores que reducen su efectividad. En este contexto, la efectividad percibida de dichas estrategias por parte del profesorado de la Facultad de Ingenierías no ha sido evaluada de manera sistemática, lo que constituye la motivación central del presente estudio.

El presente artículo describe el diseño metodológico, los fundamentos teóricos y los resultados anticipados de la investigación, cuyo propósito es analizar la percepción de los niveles de estrés laboral en los docentes de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Córdoba, así como la efectividad percibida de las estrategias de bienestar institucional implementadas para mitigar dicho estrés.

Pregunta de investigación: ¿Cómo perciben los docentes de la Facultad de Ingenierías la efectividad de las estrategias de bienestar institucional implementadas por la Universidad de Córdoba para reducir el estrés laboral?

II. Justificacion

En el contexto universitario, el docente está expuesto a diversos factores que pueden influir en la aparición del estrés laboral. Esta realidad ha llevado a que muchas universidades, incluida la Universidad de Córdoba, implementen diferentes estrategias a través de sus programas de Bienestar Universitario. Sin embargo, no todas las acciones empleadas tienen el impacto esperado en el bienestar de los colaboradores, ya sea por mala planificación, ejecución deficiente de la estrategia u otros limitantes que reducen su efectividad. Esta situación hace necesario evaluar de forma crítica dichas estrategias para identificar fortalezas, debilidades y oportunidades de mejora que realmente contribuyan a un entorno laboral saludable y productivo.

La relevancia de esta investigación radica en que la satisfacción laboral y el buen manejo del estrés del docente no solo tienen efecto en su salud física y mental: la insatisfacción, la falta de compromiso y la fatiga pueden provocar un distanciamiento del docente con sus estudiantes (Rodríguez et al., 2017, como se citó en García, Duarte y Pineda, 2022), afectando directamente la calidad del proceso de enseñanza y aprendizaje [7]. A pesar de que la literatura revisada muestra que ya se han estudiado ampliamente las causas del estrés laboral en docentes universitarios colombianos, muy pocos estudios hacen énfasis en las estrategias que ya están siendo implementadas por las instituciones y en la percepción que los principales afectados tienen sobre su efectividad.

Es importante comprender, desde la perspectiva del docente universitario, qué estrategias empleadas por la Universidad de Córdoba están siendo efectivas y cuáles presentan dificultades o no cumplen con los objetivos para los que fueron diseñadas, así como su impacto real en el bienestar del profesorado. Este estudio evaluará esa efectividad percibida y generará información útil para el mejoramiento de los programas de bienestar institucional, los cuales, a corto y mediano plazo, podrían impactar positivamente en la felicidad laboral y en el ambiente organizacional de la Facultad de Ingenierías.

Los docentes serán los beneficiarios directos de las mejoras que se deriven de los resultados de esta investigación, al disfrutar de un entorno laboral más motivador y saludable. De manera indirecta, los estudiantes también se verán favorecidos al recibir clases de profesores más comprometidos, con mayor disposición y en mejores condiciones de salud física y mental. En este sentido, el estudio de Plaza Proaño et al. [11] demuestra que las estrategias integrales de bienestar docente no solo fortalecen la salud mental del profesorado, sino que también generan un impacto positivo directo en el ambiente de aprendizaje de los estudiantes, lo que subraya la urgencia de conocer y optimizar las estrategias existentes en el contexto específico de la Facultad de Ingenierías

III. Objetivos

Objetivo General

Analizar la percepción de los niveles de estrés laboral de los docentes de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Córdoba y la efectividad percibida de las estrategias de bienestar institucional implementadas para mitigar dichos niveles

Objetivos Especificos

- Describir el nivel de estrés laboral percibido por los docentes de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Córdoba.
- Identificar las estrategias de bienestar institucional que los docentes reconocen como implementadas por la universidad.
- Identificar oportunidades de mejora a las estrategias de bienestar institucional, a partir de la percepción del docente

IV. Marco Teorico

A. *Estrés Laboral*

El estrés es definido por la Organización Mundial de la Salud como un estado de preocupación o tensión mental que surge ante la presencia de situaciones difíciles [1]. Sin embargo, su naturaleza va más allá de una respuesta emocional puntual: Fierro [17] precisa que el estrés responde a situaciones duraderas o permanentes para las cuales los recursos disponibles resultan insuficientes, diferenciándolo así de las reacciones momentáneas de tensión. Para la Organización Internacional del Trabajo (OIT), el estrés laboral es el primer signo de un daño físico y emocional en el trabajador [9], lo que lo convierte en un

indicador temprano de deterioro en la salud ocupacional que las instituciones no pueden ignorar.

Lazarus, citado en Narváez [6], enriquece esta perspectiva al afirmar que el estrés no depende únicamente de la personalidad del individuo, sino de la relación entre la persona y su medio, una relación que incluye limitaciones, demandas, oportunidades y cultura. Esta visión interaccionista resulta especialmente pertinente para el contexto docente universitario, donde el profesorado debe negociar continuamente entre las exigencias del sistema educativo, las expectativas institucionales y sus propias capacidades y recursos.

En el entorno laboral, la OIT [9] señala que el estrés relacionado con el trabajo surge de múltiples características del entorno organizacional: el desarrollo profesional, la cultura institucional, la carga laboral, el diseño de las tareas, el ambiente físico de trabajo y los horarios laborales. Cuando alguno de estos factores excede la capacidad de respuesta del trabajador de manera sostenida, el estrés se cronifica y comienza a producir consecuencias tanto individuales como organizacionales.

En el ámbito docente universitario, Acero [7] afirma que no solo el trabajador sufre las consecuencias del estrés laboral; la organización también lo resiente, al observar un bajo desempeño del profesorado, distanciamiento social y deterioro del clima laboral. Acero añade que el estrés puede considerarse un concepto subjetivo, al ser una experiencia diferente para cada persona que lo vive, lo cual dificulta su medición objetiva y refuerza la necesidad de abordajes tanto cuantitativos como cualitativos para su estudio.

Por su parte, Núñez [3] sostiene que el estrés docente no solo afecta la salud individual del profesorado, sino también su desempeño laboral, sus relaciones interpersonales y puede generar tensiones en el clima organizacional y en la relación con los estudiantes. En los docentes catedráticos, este fenómeno se agudiza por la presencia de factores intralaborales como la inestabilidad contractual que genera incertidumbre permanente sobre la continuidad laboral y factores extralaborales como las dificultades económicas y familiares que también inciden en su bienestar.

El informe de IPSOS 2024 [5] documenta la magnitud del problema a nivel global y nacional: tres de cada cinco personas reportan estrés que afecta negativamente su vida cotidiana, y en Colombia el 50 % de los encuestados ha experimentado niveles de estrés que le impidieron continuar con su trabajo por algún período. El bienestar mental emerge, así, como uno de los principales desafíos de la agenda pública y organizacional colombiana, posicionando el estudio del estrés docente universitario como un tema de alta relevancia social e institucional.

En cuanto a las consecuencias del estrés laboral crónico, Buitrago Orjuela et al. [18] identifican una amplia gama de efectos negativos que incluyen trastornos físicos insomnio, enfermedades cardiovasculares, trastornos gastrointestinales, cefaleas y psicológicos ansiedad, depresión, irritabilidad, dificultades de concentración. Desde una perspectiva organizacional, estos efectos se traducen en ausentismo, rotación de personal, disminución de la productividad y deterioro del clima laboral, lo que representa costos significativos para las instituciones de educación superior.

Narváez [6] subraya que es de vital importancia que las instituciones adopten medidas para fomentar el mejoramiento de la calidad de vida laboral y personal de sus trabajadores. En el caso de las universidades, esto implica diseñar e implementar programas de bienestar que atiendan de manera efectiva los factores generadores de estrés específicos del ejercicio docente universitario, superando las intervenciones genéricas para ofrecer respuestas pertinentes a las necesidades reales del profesorado.

B. Síndrome de Burnout

El síndrome de burnout representa la expresión más severa y crónica del estrés laboral en el ámbito docente y constituye uno de los fenómenos más estudiados en el campo de la salud ocupacional educativa. Conceptualizado por Maslach y Jackson en 1981 y 1986 citados en Garcés-Delgado et al. [10] el burnout se articula en torno a tres dimensiones centrales que configuran un proceso progresivo de deterioro: el agotamiento emocional, la despersonalización y la falta de realización personal.

El agotamiento emocional se explica como la fatiga física y mental que merma la capacidad de atender, tanto a los demás como a uno mismo; implica sentirse vaciado de recursos emocionales y sin energía para afrontar las demandas cotidianas del trabajo docente [10]. La despersonalización conlleva la manifestación de actitudes o sentimientos nocivos y cínicos en las relaciones con las demás personas en el caso del docente universitario, principalmente con sus estudiantes y colegas, llegando incluso a hacerlos culpables de las propias problemáticas. La falta de realización personal alude a la autovaloración negativa en el desempeño profesional y personal, provocando un bajo autoconcepto sobre las propias capacidades y actitudes para el trabajo (Cruz y Puente, 2017; Maslach y Jackson, 1981; 1986, citados en Garcés-Delgado et al. [10]).

Garcés-Delgado et al. [10] añaden una dimensión de análisis que resulta especialmente relevante para el diseño de estrategias de bienestar diferenciadas: el género incide de manera significativa en la forma en que se experimenta el burnout entre el profesorado universitario. Las docentes tienden a reportar mayores niveles de agotamiento emocional, mientras que los docentes masculinos presentan puntuaciones más altas en despersonalización. Esta diferenciación sugiere que una estrategia de bienestar eficaz no puede ser uniforme, sino que debe considerar las particularidades de los distintos subgrupos del profesorado.

La relevancia del burnout como constructo teórico para el presente estudio radica en que su aparición no es instantánea: es el resultado acumulado de estrés crónico no atendido. Detectar y atender los niveles de estrés laboral en etapas tempranas, antes de que deriven en burnout, es precisamente el propósito preventivo que subyace a los programas de bienestar institucional. Si los docentes de la Facultad de Ingenierías reportan altos niveles de estrés y baja percepción de efectividad de las estrategias de bienestar disponibles, el riesgo de desarrollo de burnout en esa población será considerablemente más elevado, lo que justifica la urgencia de esta investigación.

En el contexto nacional, la investigación de Castaño Ríos [12] en la Universidad de Antioquia encontró que el 41,18 % de los docentes de la muestra presentaban niveles altos o muy altos de estrés laboral, atribuidos principalmente a la inestabilidad contractual, los desplazamientos y la carga laboral. Estos niveles, de no mediar intervenciones institucionales efectivas, representan un terreno fértil para el desarrollo del síndrome de burnout, con consecuencias potencialmente graves tanto para los docentes como para la calidad de la educación impartida.

C. Bienestar Institucional en la Educación Superior

Las instituciones de educación superior cuentan con áreas de Bienestar Institucional cuyo propósito central es promover un entorno de trabajo que favorezca el desarrollo humano integral mediante actividades que estimulen el equilibrio entre la vida laboral y la vida personal de sus colaboradores, tanto docentes como no docentes (Universidad de Córdoba, Acuerdo 056 de 2018 [4]). En el contexto colombiano, este mandato está respaldado por la normatividad del Ministerio de Educación Nacional y se operacionaliza en cada institución a través de planes y programas específicos.

La Universidad de Córdoba, en su Acuerdo 056 de 2018 [4], reglamenta el funcionamiento de su área de Bienestar Universitario y define explícitamente entre sus propósitos la promoción de entornos de trabajo saludables para los docentes. Este marco normativo establece la base institucional sobre la que se diseñan e implementan las estrategias de bienestar que serán evaluadas en el presente estudio. Sin embargo, la existencia de un marco normativo y de un área dedicada al bienestar no garantiza per se la efectividad de las intervenciones.

Buitrago Orjuela et al. [18] señalan que las estrategias de prevención y manejo del estrés laboral deben ser pertinentes, accesibles y comunicadas de forma efectiva a los trabajadores para que puedan generar el impacto esperado. Cuando los docentes desconocen los programas disponibles, o cuando los perciben como inadecuados para sus necesidades reales, la brecha entre la oferta institucional y la demanda docente se amplía, reduciendo significativamente el potencial transformador del bienestar universitario. Esta brecha ha sido documentada en múltiples estudios sobre bienestar docente en el contexto latinoamericano [11], constituyendo uno de los principales obstáculos para la efectividad de las estrategias institucionales.

Plaza Proaño et al. [11] sostienen que la implementación de estrategias integrales de bienestar docente no solo permite el fortalecimiento de la salud mental del profesorado, sino que también genera un impacto positivo directo en el ambiente de aprendizaje de los estudiantes. Esto resalta la doble dimensión del bienestar institucional: por un lado, su efecto en el individuo-docente; por el otro, su efecto sistémico en la calidad del proceso educativo. En este sentido, invertir en estrategias de bienestar efectivas no es únicamente una decisión de responsabilidad social institucional, sino también una decisión de calidad académica.

Para el presente estudio, el concepto de bienestar institucional se operacionaliza como el conjunto de programas, actividades y servicios ofrecidos por la Universidad de Córdoba orientados a promover la salud física, mental y social del profesorado, así como el equilibrio entre sus responsabilidades laborales y personales. La efectividad percibida de estos programas será medida a través de la valoración que los propios docentes hagan de su pertinencia, accesibilidad, cobertura e impacto real en su calidad de vida laboral.

D. Antecedentes

A nivel internacional, Plaza Proaño et al. [11] confirman que las estrategias integrales de bienestar docente tienen un efecto multiplicador: al fortalecer la salud mental del profesorado, mejoran de manera indirecta el clima de aula y la calidad del aprendizaje de los estudiantes. Este hallazgo posiciona las estrategias de bienestar docente no como un gasto institucional, sino como una inversión con retorno en calidad educativa.

En el contexto nacional, el estudio de Castaño Ríos [12], realizado en la Universidad de Antioquia, analizó el estrés laboral en docentes de diferentes facultades. Sus resultados arrojaron que el 41,18 % de los docentes de la muestra presentaba niveles altos o muy altos de estrés laboral, principalmente asociados a la inestabilidad contractual, los desplazamientos y la sobrecarga de trabajo. Este estudio constituye una referencia fundamental para anticipar los rangos de prevalencia esperables en la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Córdoba.

Lemos et al. [15] identificaron que entre los factores psicosociales asociados al estrés en docentes universitarios colombianos sobresalen la sobrecarga laboral, la ambigüedad de rol y la falta de apoyo organizacional. Estos tres factores son potencialmente relevantes en el contexto de Ingenierías, dado que sus docentes deben articular la enseñanza de contenidos altamente especializados con la demanda de proyectos de aula, laboratorios, investigación y extensión.

En el ámbito específico de la Universidad de Córdoba, Racedo Meneses y Claros López [8] desarrollaron en 2024 una investigación sobre la percepción del estrés en docentes de la Facultad de Enfermería de la institución. Este trabajo constituye el antecedente más próximo al presente estudio y confirma que el estrés docente en Unicórdoba es un fenómeno estudiado y de interés institucional, con condiciones favorables para replicar y ampliar la indagación en la Facultad de Ingenierías.

A nivel regional, investigaciones sobre estrés docente en instituciones de educación superior de la región Caribe colombiana como el estudio realizado en el INFOTEP de San Juan del Cesar [16] señalan que los riesgos psicosociales constituyen el factor de mayor incidencia en el profesorado universitario de la costa atlántica, lo que sugiere que los patrones de estrés laboral docente observados en contextos similares podrían tener características comparables con los que se espera identificar en la muestra de la Facultad de Ingenierías.

Finalmente, Uribe Ochoa et al. [14], en un estudio correlacional aplicado a 58 docentes de una facultad de Enfermería de una universidad pública mexicana, hallaron prevalencia de estrés leve en 18 docentes, estrés moderado en 13 y estrés alto en 5, sin que el desempeño docente se viera significativamente afectado en esa muestra en particular. Sin embargo, los autores recomiendan implementar estrategias preventivas sistemáticas, argumentando que incluso cuando el desempeño no se ve comprometido de manera inmediata, el

estrés subyacente no atendido sienta las bases para deterioros mayores a mediano plazo.

.

V. Metodologia

A. Tipo de Investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto. En su dimensión cuantitativa, se recurre a la aplicación de encuestas y al posterior análisis estadístico, con el propósito de evaluar en qué medida las estrategias implementadas por la Universidad de Córdoba resultan efectivas en la gestión del estrés laboral docente, así como para describir los niveles de estrés percibido en la población objeto de estudio. En su dimensión cualitativa, la investigación se orienta a comprender las percepciones, experiencias y apreciaciones subjetivas de los docentes respecto a su carga laboral y al impacto de dichas estrategias en su bienestar personal y profesional. La triangulación de ambas aproximaciones metodológicas permitirá alcanzar una comprensión más robusta y completa del fenómeno estudiado.

B. Hipotesis

Hipótesis nula (H_0): No existe relación estadísticamente significativa entre el nivel de estrés laboral y la percepción de efectividad de las estrategias de bienestar institucional en los docentes de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Córdoba.

Hipótesis alternativa (H_1): Existe relación estadísticamente significativa entre el nivel de estrés laboral y la percepción de efectividad de las estrategias de bienestar institucional en los docentes de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Córdoba.

C. Población y Muestra

La población objeto de estudio corresponde a la totalidad de docentes vinculados a la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Córdoba, configurando una población finita. La Facultad de Ingenierías alberga múltiples programas de formación en ciencias aplicadas y tecnología, con una planta docente diversa en términos de tipo de vinculación contractual docentes de planta y docentes catedráticos y nivel de formación académica.

Dado que el propósito del estudio no es la generalización estadística, sino la comprensión profunda del fenómeno en su contexto específico, la muestra se seleccionará mediante muestreo no probabilístico por conveniencia. Se buscará incluir docentes de los diferentes programas académicos de la Facultad y representar la diversidad en los perfiles de vinculación contractual, con el fin de capturar la variabilidad de experiencias dentro de la población.

D. Instrumento de Recolección de Datos

El instrumento de recolección de datos que se empleará es una versión adaptada de la Escala de Factores Psicosociales Estresantes relacionados a la Docencia Universitaria (FPEDU; Aguirre y Figueroa [13]), ajustada al contexto institucional de la Universidad de Córdoba y a las características particulares de la Facultad de Ingenierías. La escala original FPEDU fue diseñada y validada específicamente para la medición de factores de estrés en docentes universitarios, lo que la convierte en un instrumento con alta pertinencia para los objetivos de este estudio.

La encuesta se aplicará en formato digital mediante la plataforma Google Forms, con el fin de facilitar el acceso y garantizar la cobertura de toda la población docente objeto de estudio. El instrumento está estructurado en tres bloques: el primero recoge información sociodemográfica (edad, sexo, estado civil, número de hijos) y laboral (tipo de vinculación contractual, nivel de formación académica, participación en cargos administrativos, vinculación a procesos de investigación y trabajo en actividades laborales externas a la institución). El segundo bloque incluye una pregunta filtro destinada a identificar si el docente ha experimentado situaciones de estrés en el ejercicio de su labor dentro de la Universidad de Córdoba; en caso de respuesta negativa, el instrumento finaliza en ese punto. El tercer bloque, dirigido exclusivamente a quienes responden afirmativamente, se compone de ítems diseñados bajo una escala tipo Likert, orientados a medir con mayor precisión las percepciones de los docentes sobre su carga laboral, los factores que inciden en el estrés y la efectividad de las estrategias implementadas por la institución para promover un clima de trabajo favorable.

E. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Información

Para el componente cuantitativo se emplearán técnicas de estadística descriptiva frecuencias absolutas y relativas, medias, medianas y desviaciones estándar para caracterizar el perfil de estrés percibido de la muestra y describir las respuestas de los docentes en torno a las estrategias de bienestar. Adicionalmente, se utilizarán técnicas de estadística inferencial correlaciones de Spearman y pruebas de significancia estadística para contrastar las hipótesis planteadas y determinar si existe una relación estadísticamente significativa entre el nivel de estrés percibido y la efectividad percibida de las estrategias de bienestar institucional.

Para el componente cualitativo, las respuestas abiertas del instrumento serán analizadas mediante codificación temática, identificando categorías emergentes relacionadas con las principales fuentes de estrés, las estrategias valoradas positivamente y las oportunidades de mejora percibidas por los docentes. La triangulación metodológica entre los datos cuantitativos y cualitativos permitirá validar y enriquecer los hallazgos, aportando una perspectiva comprensiva del fenómeno en su dimensión tanto estadística como experiencial

.

VI. Resultados Esperados

Dado que la recolección de datos primarios se encuentra actualmente en curso, los resultados esperados se fundamentan en la revisión bibliográfica de estudios realizados en contextos comparables en particular, instituciones de educación superior colombianas y de la región Caribe así como en los antecedentes propios de la Universidad de Córdoba.

En primer lugar, se anticipa que una proporción considerable de docentes de la Facultad de Ingenierías reportará niveles moderados a altos de estrés laboral, asociados principalmente a la carga académica, la inestabilidad contractual y la acumulación

simultánea de roles de docencia, investigación y gestión administrativa. Este pronóstico es coherente con los hallazgos de Castaño Ríos [12], quien encontró que el 41,18 % de los docentes de la Universidad de Antioquia presentaba niveles altos o muy altos de estrés. La naturaleza intensiva de los programas de la Facultad de Ingenierías con alta demanda de laboratorios, proyectos integradotes, evaluaciones continuas y espacios de formación práctica sugiere condiciones igualmente propensas para la manifestación de estrés docente.

En segundo lugar, siguiendo los hallazgos de Racedo Meneses y Claros López [8] en la propia Universidad de Córdoba quienes investigaron la percepción del estrés en docentes de la Facultad de Enfermería en 2024, se espera que los patrones identificados en esa facultad tengan correspondencia en Ingenierías, con variaciones asociadas al tipo de programas y al perfil de vinculación del profesorado. El hecho de que el estrés docente haya sido documentado en otra facultad de la misma institución refuerza la pertinencia de ampliar la indagación al contexto de Ingenierías.

En tercer lugar, se anticipa que una parte significativa de los docentes tendrá un conocimiento parcial de los programas de Bienestar Universitario disponibles, evidenciando una brecha entre lo que la institución ofrece y lo que el docente percibe como disponible o accesible. Uribe Ochoa et al. [14] recomiendan implementar estrategias preventivas sistemáticas incluso en poblaciones donde el desempeño docente no se ve afectado de manera inmediata, lo que refuerza la necesidad de fortalecer la comunicación institucional sobre los programas existentes.

En cuarto lugar, se espera que los docentes con mayores niveles de estrés percibido valoren las estrategias institucionales como poco efectivas o insuficientes para sus necesidades reales. Esta valoración probablemente estará asociada tanto a limitaciones en el diseño de las estrategias como a barreras de acceso y a deficiencias en la comunicación institucional. Lemos et al. [15] identificaron que la falta de apoyo organizacional es uno de los principales factores psicosociales del estrés en docentes universitarios colombianos, lo que sugiere que la percepción de efectividad del bienestar está estrechamente vinculada al apoyo real que siente el docente por parte de su institución.

En quinto lugar, se anticipa que el análisis estadístico permitirá rechazar la hipótesis nula, confirmando una relación estadísticamente significativa entre el nivel de estrés percibido y la efectividad percibida de las estrategias de bienestar, en línea con la evidencia acumulada en la literatura sobre salud ocupacional docente [10][15].

Finalmente, en cuanto a las oportunidades de mejora identificadas, se espera que los docentes demanden mayor acceso a atención psicológica individualizada, flexibilización de cargas académicas según el tipo de vinculación, y una comunicación institucional más efectiva y oportuna sobre los programas de bienestar disponibles. Estas demandas son consistentes con las recomendaciones de Plaza Proaño et al. [11] para el diseño de estrategias integrales de bienestar docente en instituciones de educación superior latinoamericanas.

VII. Conclusiones

Este artículo presenta el marco conceptual, metodológico y los resultados anticipados de una investigación en curso sobre la percepción del estrés laboral docente y la efectividad de las estrategias de bienestar en la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Córdoba. La revisión bibliográfica confirma que el estrés docente es un fenómeno prevalente y de alta relevancia en el contexto universitario colombiano: estudios en instituciones comparables reportan que más del 40 % del profesorado presenta niveles altos o muy altos de estrés, vinculados principalmente a la carga académica, la inestabilidad contractual y la acumulación de funciones simultáneas.

Los tres conceptos teóricos articuladores del estudio estrés laboral, síndrome de burnout y bienestar institucional en la educación superior permiten comprender el fenómeno en toda su complejidad. El estrés crónico no atendido puede escalar progresivamente hacia el síndrome de burnout, con consecuencias severas para la salud del docente y para la calidad del proceso educativo. La efectividad de las estrategias de bienestar, por su parte, no depende únicamente de su existencia formal dentro de la institución, sino del grado en que son conocidas, accesibles y pertinentes para las necesidades reales del profesorado.

La pertinencia del estudio radica en que, pese a la existencia de programas de bienestar en la Universidad de Córdoba amparados en su Acuerdo 056 de 2018, su efectividad percibida desde la perspectiva del profesorado de la Facultad de Ingenierías no ha sido evaluada de manera sistemática. Los resultados que se obtengan orientarán el diseño y la mejora de dichos programas, con beneficios directos para el bienestar docente e indirectos para la calidad del proceso educativo y para los estudiantes de la Facultad.

Como trabajo futuro inmediato, se realizará el levantamiento completo de datos primarios mediante la encuesta FPEDU adaptada, seguido del análisis estadístico descriptivo e inferencial y del análisis cualitativo por codificación temática. Los resultados del cruce entre los datos cuantitativos y cualitativos permitirán contrastar las hipótesis planteadas y formular recomendaciones concretas y diferenciadas para la política de bienestar institucional de la Universidad de Córdoba, contribuyendo así al fortalecimiento de entornos laborales más saludables, motivadores y productivos para su planta docente

.

Referencias

[1] Organización Mundial de la Salud, "Estrés," OMS, 21 feb. 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/stress

[2] E. A. Rodríguez Flores y M. de los Á. Sánchez Trujillo, "Síndrome de Burnout y variables sociodemográficas en docentes de una universidad privada de Lima," Rev. Investig. Educ., vol. 36, núm. 2, pp. 401-419, jun. 2018. doi: 10.6018/rie.36.2.282661

[3] J. S. Núñez Ríos, "Revisión Documental de los Efectos del Estrés Laboral en Docentes Universitarios en Colombia Durante los Últimos Cinco Años," Universidad de Santander, may. 2025. Disponible en: https://repositorio.udes.edu.co/entities/publication/f2d6f467-2c90-476f-bbe6-b1021ccf389b

[4] Universidad de Córdoba, "Acuerdo Número 056," 2018. Disponible en: https://www.unicordoba.edu.co/index.php/bienestar-universitario/normatividad/

[5] IPSOS, "Día Mundial de la Salud Mental 2024," IPSOS, oct. 2024. Disponible en: https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2024-10/Ipsos_World_Mental_Health_Day_2024_Global_Charts_ESP.pdf

[6] O. A. Narváez López, "Revisión teórica documental sobre el estrés laboral y el impacto de las estrategias de afrontamiento para la prevención y manejo del estrés," Bol. Inf. CEI, vol. 6, núm. 3, pp. 15-24, 2019. Disponible en: https://revistas.umariana.edu.co/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/2103

[7] M. A. Acero Montoya, "Estrés laboral docente," Fundación Universitaria de América, 2020. Disponible en: https://repository.uamerica.edu.co/items/21514c84-ccfc-47a3-bd79-38fe1b7368a3

[8] V. Racedo Meneses y V. Claros López, "Percepción de estrés en docentes de enfermería de una institución de educación superior. Montería – Córdoba, 2024," Universidad de Córdoba, 2024. Disponible en: https://repositorio.unicordoba.edu.co/entities/publication/83388091-1745-42d3-a371-cc0ff1594d37

[9] Organización Internacional del Trabajo, La prevención del estrés en el trabajo: lista de puntos de comprobación. Ginebra: OIT, 2014. Disponible en: https://www.ilo.org/es/publications/la-prevencion-del-estres-en-el-trabajo-lista-de-puntos-de-comprobacion

[10] Y. Garcés-Delgado, E. García-Álvarez, D. López-Aguilar y P. Álvarez-Pérez, "Incidencia del Género en el Estrés Laboral y Burnout del Profesorado Universitario," REICE Rev. Iberoam. Calid. Efic. Camb. Educ., vol. 21, núm. 3, pp. 41-60, jun. 2023. doi: 10.15366/reice2023.21.3.003

[11] A. Plaza Proaño et al., "Estrategias integrales de bienestar docente en educación superior latinoamericana," 2026. [En prensa].

[12] C. E. Castaño Ríos, "Estrés laboral en docentes universitarios: el caso de la Universidad de Antioquia," 2025. [Repositorio institucional Universidad de Antioquia].

[13] D. P. Aguirre Ojeda y M. del R. Figueroa Varela, "Instrumento de evaluación de factores psicosociales estresantes en docentes universitarios," Rev. Iberoam. Cienc., vol. 5, núm. 2, pp. 57-67, abr. 2018. Disponible en: http://dspace.uan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/2071

[14] K. R. Uribe Ochoa, I. García Rodríguez y M. G. Ledezma Salinas, "Relación del desempeño docente y estrés laboral en docentes universitarios de una universidad pública," Ciencia Lat. Rev. Cient. Multidiscip., vol. 10, núm. 1, pp. 2324-2345, feb. 2026. doi: 10.37811/cl_rcm.v10i1.22378

[15] M. Lemos et al., "Factores psicosociales asociados al estrés en profesores universitarios colombianos," Divers. Perspect. Psicol., 2018. doi: 10.15332/s1794-9998.2019.0001.05

[16] "Estrés docente en el INFOTEP de San Juan del Cesar: Factores de riesgo y estrategias de bienestar," Investigación y Saberes, 2025. Disponible en: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2665-01692025000400488

[17] A. Fierro Bardají, Estrés, afrontamiento y adaptación. Valencia: Promolibro, 1997. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=767245

[18] L. Á. Buitrago Orjuela, M. A. Barrera Verdugo, L. Y. Plazas Serrano y C. Chaparro Penagos, "Estrés laboral: una revisión de las principales causas, consecuencias y estrategias de prevención," Rev. Investig. Salud Univ. Boyacá, vol. 8, núm. 2, pp. 131-146, 2021. Disponible en: https://repositorio.uniboyaca.edu.co/entities/publication/36cd8dfa-15ad-4a62-a915-0cc3aed8c3c0

Design and Development of an Artificial Intelligence-Based Platform for the Early Detection of Anxiety Symptoms

Laura Sofia Ramos Rueda (lsramosr@itc.edu.co), Lesly Alejandra Gómez Rodríguez (lagomezr@itc.edu.co)
Faculty of Systems Engineering, Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá D.C, Colombia

ABSTRACT

Anxiety disorders represent a growing mental health problem in Colombia, especially among young people and adults. This paper presents the design and development of "Mind IA", an artificial intelligence-based platform focused on the early detection of anxiety symptoms and emotional support. The system integrates machine learning and natural language processing techniques to analyze emotional patterns and user interactions. It also includes psychoeducational tools, appointment management, and professional-supervised support. Preliminary results demonstrate the feasibility of using intelligent technologies to strengthen mental health prevention and support processes.

Keywords *— artificial intelligence, anxiety detection, mental health, machine learning, emotional support platform.*

I. INTRODUCTION

Mental health has become one of the main global concerns due to the increase in emotional disorders affecting people's quality of life. Among these, anxiety represents one of the most frequent conditions, especially in young people and adults, generating academic, social, and emotional consequences. In Colombia, factors such as stress, social pressure, economic difficulties, and the emotional aftermath of the pandemic have contributed to the rise in anxiety-related cases and other mental disorders.

Despite the growing need for psychological care, many people face difficulties accessing professional services due to economic limitations, lack of information, or stigmas associated with mental health. According to the National Mental Health Survey in Colombia, a significant portion of the population has required mental health-related care, revealing barriers to access to specialized services [7]. In this context, technological tools and artificial intelligence have emerged as innovative alternatives capable of supporting prevention, monitoring, and early detection of emotional symptoms.

Artificial intelligence enables the analysis of large volumes of information and the identification of behavioral patterns through techniques such as machine learning and Natural Language Processing (NLP). These technologies can contribute to the development of intelligent systems oriented toward emotional support and early identification of possible anxiety disorders.

Therefore, this project proposes the design and development of an AI-based platform focused on the early detection of anxiety symptoms and emotional support for individuals between 15 and 40 years of age. In Colombia, 66.3% of the population reported having faced some mental health problem at some point in their lives, with young people between 18 and 24 years being among the most affected [8].

The main objective of this research is to develop a technological solution that contributes to strengthening preventive mental health processes, improving access to emotional support tools through the use of artificial intelligence and modern web technologies.

II. OBJECTIVES

General Objective

Develop an artificial intelligence-based application that assists in the early detection of anxiety symptoms, providing emotional guidance and optimizing the care process carried out by mental health professionals in Colombia.

Specific Objectives

- Design a database aimed at detecting anxiety-related disorders, including trauma- and stress-related disorders, attention deficit hyperactivity disorder, premenstrual dysphoric disorder, depressive disorders, and social anxiety disorder.
- Develop a platform for interaction between the patient and the psychologist, facilitating accompaniment and monitoring of the patient's condition.
- Propose a system capable of interpreting user information in order to identify possible risk alerts.

III. BACKGROUND

In recent years, artificial intelligence has emerged as a prominent tool in the field of mental health, particularly in early detection, monitoring, and accompaniment of emotional disorders. Research has shown that the use of machine learning and natural language processing technologies allows examining large volumes of data and identifying patterns associated with conditions such as anxiety and depression, favoring timely interventions [1], [2].

From a Latin American perspective, a systematic review on AI as a therapeutic support resource demonstrates that these technologies have been applied in the identification and monitoring of mental disorders, strengthening accessibility to psychological services, particularly in contexts with limitations in traditional care. However, challenges related to ethics, data privacy, and the need for professional oversight are highlighted [2].

Similarly, studies developed in academic environments have implemented AI-supported digital platforms to strengthen psychological data collection, improve emotional state monitoring, and enhance patient follow-up. These proposals underscore the importance of structuring adequate databases and designing systems that facilitate interaction between patients and health professionals [5], [6].

Research conducted at institutions such as the Universidad Técnica Estatal de Quevedo demonstrates how AI can be implemented to examine human behavior and support decision-making in the health area. Studies from the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo also highlight that intelligent systems contribute to data collection and strengthen patient emotional state monitoring [4], [5].

Collectively, the reviewed studies agree that AI has been applied in the early detection of anxiety-related symptoms and the monitoring of emotional states through data analysis and digital user interaction. Research also highlights its use as a support tool in mental health care processes, especially for professionals [2], [3], [5].

IV. THEORETICAL FRAMEWORK

Mental health has become one of the main concerns in Colombia due to the increase in emotional disorders affecting the psychological and social well-being of the population. Anxiety disorders represent one of the most frequent conditions, especially in young people and adults, generating academic, occupational, social, and emotional consequences. Factors such as stress, social pressure, economic difficulties, and the emotional aftermath of the pandemic have contributed to the increase in anxiety and other mental disorder cases in the country.

According to the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5), anxiety disorders include different categories such as generalized anxiety disorder, social anxiety, panic disorder, and specific phobias. This manual provides diagnostic criteria used by mental health professionals to identify symptoms and behavioral patterns associated with these emotional alterations. The most common symptoms include excessive worry, difficulty concentrating, irritability, sleep disturbances, constant fear, and restlessness. Early detection of these symptoms is fundamental to facilitating timely psychological intervention and accompaniment.

In Colombia, access to mental health services remains limited for a portion of the population due to economic, social, and healthcare coverage factors. Additionally, many individuals do not seek professional support due to fear of social rejection or lack of information about mental health. As a result, the development of technological tools oriented toward emotional support and psychological monitoring has gained great importance as a complementary alternative for strengthening prevention and early care.

In this context, Artificial Intelligence (AI) has emerged as an innovative tool capable of supporting emotional analysis and early detection of possible psychological alterations. AI encompasses a set of computational techniques that allow systems to learn from data, identify patterns, and perform automated analysis and decision-making processes. In the health sector, these technologies have been implemented for clinical information analysis, diagnostic support, and patient monitoring.

Within mental health, AI allows analyzing behaviors, emotions, and interactions through machine learning algorithms and data analysis techniques. These tools contribute to identifying patterns related to anxiety, stress, and other emotional disorders, facilitating the development of support systems oriented toward psychological prevention and accompaniment.

Another key component in the development of intelligent systems is Natural Language Processing (NLP), a branch of AI focused on the understanding and interpretation of human language by computational systems. NLP techniques allow analyzing texts, identifying emotions, and recognizing communication patterns in user interactions, enabling the detection of key words, emotional expressions, and indicators related to anxiety or emotional stress.

Furthermore, AI-powered systems applied to mental health can process large amounts of information to identify behavioral patterns and perform emotional monitoring of users. Digital platforms now integrate databases, AI, and NLP techniques to evaluate emotional states and generate psychological support tools, complementing the work of mental health professionals.

For this reason, the development of technology platforms focused on emotional support represents an innovative alternative for strengthening prevention and early detection strategies for anxiety disorders in Colombia. The combination of AI, emotional analysis, and modern web technologies allows building accessible and efficient systems oriented toward psychological well-being and emotional accompaniment.

V. METHODOLOGY

Methodological Approach

The development of the platform for early detection and management of anxiety in Colombia adopted a hybrid methodology combining the agile Scrum framework with Kanban, complemented by the principles of User-Centered Software Engineering (UCD). This combination was selected due to the iterative and incremental nature of the project, which requires continuous validation and the ability to adapt agilely to the changing requirements of a mental health system, where expert feedback may modify design decisions at any point in the development cycle.

Within this approach, Scrum organizes work into defined periods (sprints), conducts periodic follow-up meetings, and ensures continuous improvement through constant progress review. Kanban complements this flow as a visual tool for task control, enabling flexible adaptation to changes. Centralized information management and project monitoring are carried out through Bitrix24, facilitating schedule management, task assignment, team communication, and continuous progress tracking.

Phase 1: Research and Requirements Identification

The starting point of the project was to identify and document system requirements. This phase was developed through a review of scientific literature on digital mental health platforms in Latin America and a comparative analysis of previously developed similar systems. From this analysis, the main gaps to be addressed were identified: absence of validated assessment instruments integrated into the AI flow, lack of predefined crisis management protocols, and dependence on models trained with foreign data that do not capture the cultural diversity of the Colombian context.

Additionally, a review was conducted of the DSM-5 diagnostic criteria, NLP applied to emotional state detection, and the foundations of AI in mental health. This research process established the conceptual basis upon which the platform was designed.

Functional Requirements

The functional requirements were organized around two main user roles: the patient and the psychologist. For the patient, the system must allow:

- Registration and authentication in the platform.
- Performing anxiety assessments using validated instruments.
- Interaction with the AI assistant for immediate emotional support.
- Reporting physical and emotional symptoms during crisis episodes.
- Daily mood tracking with trend visualization.
- Access to psychoeducational resources personalized according to the severity profile.
- Reception of notifications and follow-up reminders.

For the psychologist, the system must allow:

- Management of care sessions with patients referred by the AI.
- Access to clinical history and previous patient assessments.
- Assignment of follow-up tasks and recording of private clinical notes.
- Reception of automatic crisis alerts generated by the system.
- Diagnostic labeling per session.

Non-Functional Requirements

The platform must guarantee compliance with Law 1581 of 2012 on Personal Data Protection of Colombia, particularly regarding the processing of sensitive mental health data. It must also ensure continuous availability given the urgency of anxiety crises, response times under two seconds in AI interactions, and a user-friendly interface accessible to users between 15 and 40 years of age.

Phase 2: Database Design and Entity-Relationship Model

Based on the requirements identified in Phase 1, the database schema was designed as the central component of the system architecture. SQL was selected as the standard relational data management language due to its wide compatibility with different database engines, capacity for defining complex relational structures, and suitability for securely handling sensitive health information in an organized manner.

Relational Model Structure

The resulting relational model comprises 13 tables organized into five functional groups. The first corresponds to the clinical catalog, consisting of the disorder_types table, which stores the five anxiety disorders covered by the platform with their respective DSM-5 codes: Generalized Anxiety Disorder (F41.1), Social Phobia (F40.10), Specific Phobias (F40.2), Panic Disorder (F41.0), and Agoraphobia (F40.00).

The second group covers user management, with the users and psychologists tables. The users table stores patient data including emergency contact information, notification preferences, and a last_active field that allows the AI to detect prolonged inactivity patterns as an alert signal. The psychologists table records professional license numbers, specialties, real-time availability, and performance metrics.

The third group covers the AI and crisis module, consisting of ai_conversations, symptoms_reports, and alerts. The alerts table classifies risk signals into four types: high_score, negative_pattern, prolonged_inactivity, and crisis_expression. The fifth group covers monitoring and resources, with the crisis_sessions, mood_tracking, support_resources, recommended_resources, and notifications tables.

Phase 3: Interface Design and Prototyping

The visual design of the platform was carried out in Figma, chosen for its collaborative high-fidelity prototyping capabilities, automatic generation of style specifications for the development team, and support for design systems with reusable components and variables. The design process followed User-Centered Design principles, beginning with the definition of navigation flows for each role before designing individual screens.

The mockups developed included: welcome and user registration screen, authentication flow, patient main dashboard with mood summary and assessment history, assessment module with questionnaires, AI assistant conversation interface, symptom reporting screen, daily mood tracking module, psychoeducational resources gallery, psychologist panel with patient list and pending alerts, and notification system.

Phase 4: Development, Integration, and Testing

The development phase comprises the construction of the web platform, integration of the AI module, testing, and adjustments. Work is organized into two-week sprints following the Scrum cycle, with planning at the start of each sprint, progress review at the end, and retrospectives to improve the process. The system follows a client-server architecture with REST API, where the backend exposes the necessary endpoints for the web frontend and future versions to operate independently.

Tests are structured at three levels: unit tests, verifying the individual behavior of each component; integration tests, validating correct communication between the backend, database, and AI module; and pilot user tests, evaluating platform usability and the relevance of the assistant's responses in simulated mild, moderate, and severe anxiety scenarios.

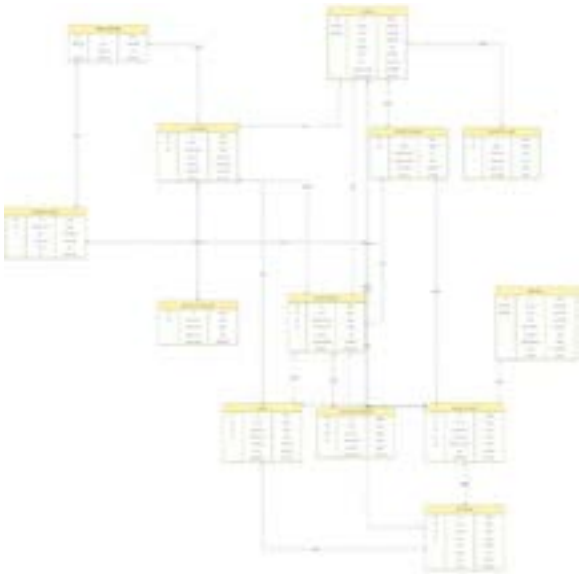
VI. RESULTS AND PROGRESS

One of the main results obtained was the development of the system architecture and the implementation of the database using SQL. Fig. 1 presents the class diagram of the platform, which allowed organizing and managing information corresponding to patients, psychologists, administrators, emotional assessments, and educational resources, ensuring adequate relationships between the different system modules.



[Fig. 1 Platform Class Diagram]

Additionally, the relational structure of the platform database was designed using SQL, allowing the organization of information corresponding to users, emotional assessments, conversations, alerts, sessions, and support resources. As shown in Fig. 2, the relational model establishes relationships between the different system entities, facilitating data management and integration of emotional monitoring functionalities.



[Fig. 2 Database Table]

Subsequently, mockups and graphical interfaces were designed using Figma, with the purpose of building an intuitive and accessible user experience. Fig. 3 presents the mockups developed for the login modules, emotional symptom registration, emotional monitoring, and intelligent chat communication.



[Fig. 3 Login, Symptoms and Smart Chat Mockups]

Likewise, specific interfaces oriented toward interaction between patients and mental health professionals were developed. Fig. 4 presents the modules designed for psychologist connection, virtual sessions, and consultation of the user's emotional history.



[Fig. 4 Psychologist Connection, Active Session and History Mockups]

Another advance obtained was the development of the web dashboard for psychologists using HTML, CSS, and JavaScript. Fig. 5 presents the interface designed to centralize patient information, enabling monitoring of emotional assessments, alerts, and active sessions.



[Fig. 5 Psychologist Dashboard]

Sequence diagrams were also developed to represent the communication flow between the different system modules, including users, the mobile application, database, and internal platform services. Fig. 6 presents the modeling of processes such as authentication, storage of emotional assessments, alert generation, and patient-psychologist communication.



[Fig. 6 System Sequence Diagram]

Additionally, a general flow diagram of the platform was developed to represent system behavior from login to alert generation and access to emotional resources. Fig. 7 presents the functional flow of the application, clearly identifying the main processes, decisions, and interactions between system components.



[Fig. 7 System Flow Diagram]

As part of the system modeling process, a use case diagram was developed to represent the main platform functionalities and interactions between patients, psychologists, and administrators. Fig. 8 presents the use cases associated with registration and login, emotional assessment application, interaction with the intelligent assistant, appointment management, alert visualization, and access to psychoeducational resources.



[Fig. 8 System Use Case Diagram]

As part of the implementation stage, a functional version of the Mind IA web platform was developed, integrating the modules defined during the analysis, design, and modeling phases. The platform incorporates functionalities oriented toward patient management, emotional monitoring, AI-based interaction, and support for mental health professionals.



[Fig. 9 Mind IA Platform Main Screen and Login]

Subsequently, the patient module was implemented, centralizing information related to emotional monitoring and progress within the platform. As shown in Fig. 10, users can visualize indicators about their emotional state, upcoming appointments, assigned tasks, psychoeducational resources, and activity history, enabling continuous monitoring of their accompaniment process.



[Fig. 10 Patient Dashboard]

Likewise, a daily mood recording module was developed through an intuitive interface based on emotional expressions. This component facilitates the collection of information about the user's emotional behavior and contributes to identifying patterns that can be used by the system to generate recommendations and alerts.



[Fig. 11 Daily Emotional State Tracking Module]

With the purpose of early anxiety symptom detection, an assessment module was implemented based on the Generalized Anxiety Disorder-7 (GAD-7) questionnaire, widely recognized as a clinical screening instrument. As shown in Fig. 12, the system allows users to answer the seven questionnaire items through an intuitive interface, automatically recording responses to calculate the anxiety level and generate appropriate recommendations. The collected information is stored in the database and used by the system to complement emotional monitoring and support clinical decision-making.



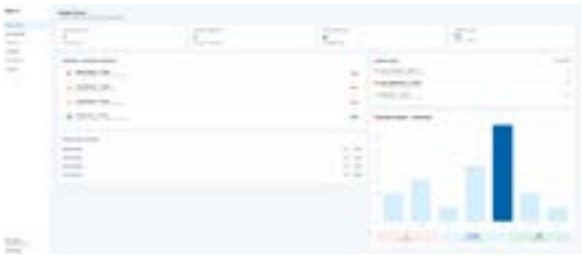
[Fig. 12 Anxiety Assessment Module Based on the GAD-7 Questionnaire]

An AI-based conversational assistant was integrated, capable of interacting with users through natural language. This module provides initial emotional guidance, responds to mental health-related queries, and records conversations to support the monitoring process. Interactions are also used as a data source for identifying possible patterns associated with anxiety symptoms.



[Fig. 13 AI-Based Conversational Assistant]

A specialized panel for mental health professionals was implemented, designed to centralize patients' clinical information. This module allows consulting active patients, prioritizing care according to risk level, visualizing system-generated alerts, managing sessions, and monitoring emotional assessments, facilitating decision-making during the accompaniment process.



[Fig. 14 Psychologist Dashboard]

As a complement to the psychologist panel, a module was implemented for detailed consultation of each patient's clinical history. This interface allows accessing the record of GAD-7 assessments performed, visualizing the evolution of scores throughout the follow-up process, recording private clinical notes, and consulting previous observations. It also incorporates the option to initiate video call sessions directly from the platform.



[Fig. 15 Patient Clinical History]

In order to strengthen psychological accompaniment, a video call module was implemented enabling real-time communication between the patient and the mental health professional. This functionality facilitates virtual sessions within the same platform, avoiding the use of external applications and ensuring continuity of the therapeutic process. The interface also incorporates tools for microphone and camera control, a support chat during the session, and a space for clinical notes recording.



[Fig. 16 Video Call Module for Care Sessions]

With the purpose of providing technical assistance during platform use, a support module was implemented available to both patients and psychologists. This component allows creating support tickets by registering the subject and description of the incident, as well as consulting the history of submitted requests and their status. Users can also view responses issued by the support team.



[Fig. 17 User Support Module]

With the purpose of ensuring comprehensive platform administration, an administration panel was implemented for the administrator to supervise the general functioning of the system. This module centralizes information related to the number of registered patients and psychologists, assessments performed, pending support tickets, and other operational indicators. It also incorporates tools for user management, incident tracking, system log consultation, and module control.



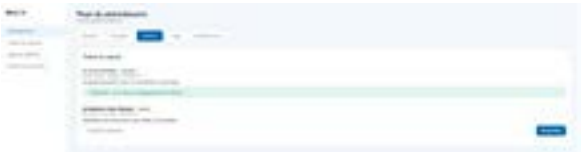
[Fig. 18 Platform Administration Panel]

As part of administrative functionalities, a user management module was developed for the platform. This component allows registering new patients, psychologists, and administrators, managing their access credentials, assigning roles, and consulting registered user information. It also includes options for account deletion and access to patient clinical histories.



[Fig. 19 User Management]

As a complement to the support module, an administrative interface was developed for managing tickets generated by platform users. This module allows viewing registered requests, consulting sender information, reviewing the status of each incident, and responding directly from the administrative panel, optimizing the process of care, follow-up, and resolution of support requests.



[Fig. 20 Support Ticket Management]

With the objective of ensuring traceability of operations performed on the platform, an event logging module (logs) was implemented that stores the main actions executed by users. As shown in Fig. 21, the system records events such as logins and logouts, assessment completion, and other relevant activities, indicating the responsible user and execution date. This functionality facilitates audit, supervision, and system monitoring tasks, as well as contributing to incident detection and platform activity tracking.



[Fig. 21 System Event Log]

VII. CONCLUSIONS

In this work, Mind IA was designed, developed, and implemented: a web platform oriented toward the early detection and monitoring of anxiety symptoms through the integration of artificial intelligence and clinical support tools. From the analysis, modeling, and implementation process, it was possible to build a solution that integrates functionalities for patients, psychologists, and administrators within a single platform, facilitating comprehensive management of the mental health care process.

The results obtained evidenced the implementation of a software architecture composed of a relational database, a web interface developed under a client-server architecture, and various functional modules including user authentication, GAD-7 questionnaire application, emotional state recording, AI-based conversational assistant, clinical history, video calls, alert generation, user management, assessment administration, event log auditing, and a technical support system. The integration of these components allowed consolidating a functional platform oriented toward continuous monitoring and strengthening of psychological accompaniment.

Likewise, the incorporation of a language model-based assistant demonstrated the potential of artificial intelligence as a support tool for initial guidance, emotional monitoring, and identification of possible anxiety-related patterns. However, the platform was conceived as a complementary mechanism to the work of mental health professionals, providing support information for decision-making without replacing specialized clinical judgment.

Finally, as future work, validation processes are planned with real populations and mental health professionals to evaluate the accuracy, usability, and acceptance of the platform in clinical scenarios. It is also proposed to incorporate specialized AI models for multimodal analysis of text, voice, and physiological variables, as well as to strengthen the security, interoperability, and scalability mechanisms of the system to facilitate its implementation in psychological care and telemedicine environments.

REFERENCES

[1] Acofi Papers. (n.d.). Applications of artificial intelligence in the academic and social context. https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/3886/2582

[2] Revista Transformar. (n.d.). Artificial intelligence as a therapeutic support tool in mental health: Latin American perspective. Systematic review. https://revistatransformar.cl/index.php/transformar/article/view/213

[3] Universidad de las Américas. (n.d.). Application of artificial intelligence in mental health. https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/18299

[4] Universidad Técnica Estatal de Quevedo. (n.d.). Use of artificial intelligence in the analysis of human behavior. https://repositorio.uteq.edu.ec/items/e6de9ab7-f46b-427e-b286-1215fa3e4602

[5] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. (n.d.). Intelligent systems applied to health. https://perspectivas.espoch.edu.ec/RCP_ESPOCH/es/article/view/237

[6] Universidad Ricardo Palma. (n.d.). Emerging technologies in mental health. https://revistas.urp.edu.pe/index.php/El_Palma_de_la_Juventud/article/view/8152

[7] Ministry of Health and Social Protection. (2015). National Mental Health Survey 2015. Bogotá, Colombia: Government of Colombia. [Online]. Available: https://www.minjusticia.gov.co/programas-co/ODC/Publicaciones/Publicaciones/CO031102015-salud_mental_tomoI.pdf

[8] Ministry of Health and Social Protection. (2023). Minsalud survey reveals that 66.3% of Colombians report having faced some mental health problem. [Online]. Available: https://www.minsalud.gov.co/Paginas/66-porciento-de-colombianos-declara-haber-enfrentado-algun-problema-de-salud-mental.aspx

Sonic Branding con IA en Publicidad: Percepciones del Público en un Estudio Cualitativo de Escucha

1st Luis de Leon Estrada
Dept de Ingenieria Industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
ldeleonestrada63@correo.unicordoba.edu.co.

Heidi Maria Echeverri Florez
Dept de Ingenieria Industrial
Universidad de Cordoba
Monteria, Colombia
hecheverri@correo.unicordoba.edu.co.

***Resumen*— En entornos publicitarios altamente competitivos, el sonido se ha consolidado como un recurso estratégico para fortalecer la identidad y la recordación de marca; sin embargo, aún existe evidencia limitada sobre cómo los consumidores perciben las composiciones generadas mediante inteligencia artificial frente a aquellas creadas por humanos.**

El presente estudio analizó las percepciones de los oyentes frente a piezas de *sonic branding* generadas mediante inteligencia artificial y composición humana desde la perspectiva del marketing sensorial auditivo. Se desarrolló una investigación de enfoque cualitativo basada en entrevistas de escucha guiada (*audio-elicitation*), en las que los participantes evaluaron tres jingles: uno generado mediante IA a partir de un *brief* genérico, otro elaborado con un *brief* específico y una composición realizada por un autor humano. La información fue analizada mediante análisis temático reflexivo, considerando dimensiones como la congruencia música–marca, la autenticidad percibida, la calidad técnica y la memorabilidad.

Los resultados evidenciaron que, aunque la inteligencia artificial produce composiciones técnicamente consistentes y mejora su desempeño cuando recibe instrucciones más específicas, sus creaciones tienden a percibirse como menos auténticas y con menor conexión emocional. En contraste, el jingle compuesto por un humano fue valorado como más auténtico, memorable y coherente con la identidad de la marca, incluso cuando presentaba un menor nivel de sofisticación técnica. Estos hallazgos sugieren que la autenticidad emocional continúa siendo un factor diferenciador en la construcción de marcas.

En conclusión, la inteligencia artificial constituye una herramienta valiosa para apoyar los procesos de creación sonora; sin embargo, su integración con la creatividad humana representa la estrategia más efectiva para el desarrollo de propuestas de *sonic branding* en los contextos publicitarios contemporáneos.

Palabras clave: *sonic branding*, inteligencia artificial, marketing sensorial auditivo.

I. Introduccion

Las marcas compiten en entornos saturados donde la atención se fragmenta por segundos. En ese contexto, el sonido ha dejado de ser un adorno del anuncio para convertirse en un activo estratégico: condensa personalidad, activa emociones y facilita el reconocimiento cuando la imagen no alcanza. Bajo esa lógica, el sonic branding jingles, mnemonics y firmas sonoras funciona como un atajo cognitivo y afectivo que conecta la intención de la marca con la experiencia del público [1].

La irrupción de la música generada por inteligencia artificial ha reconfigurado el terreno creativo. Sistemas text-to-music permiten prototipar piezas en minutos, iterar sobre instrucciones muy precisas y ajustar elementos que antes exigían horas de estudio [2], [3]. Para los equipos de publicidad esto abre una promesa de más exploración con menos costo, pero también preguntas críticas: ¿cómo juzga el público la calidad y la autenticidad de una pieza creada con IA frente a una compuesta por un humano? ¿Hasta qué punto la congruencia entre identidad de marca y diseño sonoro se sostiene cuando el proceso es algorítmico? ¿Impacta eso el recuerdo?

Este trabajo aborda esas preguntas desde una lente cualitativa: escuchando cómo las personas narran lo que oyen, qué les resulta propio o genérico, dónde perciben la 'firma' de una marca y por qué ciertos detalles un motivo de cuatro notas, una textura tímbrica, un cambio de dinámica marcan la diferencia. La contribución es doble: describe el lenguaje de evaluación que usan los oyentes al juzgar piezas con y sin IA, y organiza esas percepciones en ejes interpretativos que explican por qué ciertas decisiones de diseño facilitan el reconocimiento y otras lo obstaculizan.

El estudio se guía por tres preguntas de investigación. RQ1: ¿Cómo describen los participantes la congruencia música–marca en jingles generados con IA frente a una pieza humana? RQ2: ¿Qué atributos configuran los juicios de calidad y autenticidad? RQ3: ¿De qué manera esas percepciones se relacionan con el reconocimiento y el recuerdo de marca?

II. Marco Teorico

A. *Sonic Branding y Marketing Sensorial Auditivo*

Cuando una marca trabaja con sonido un jingle, un mnemonic, un cierre musical no solo 'adereza' el anuncio: construye un activo reconocible que condensa identidad y facilita atención, emoción y memoria. La literatura reciente sitúa este quehacer en el cruce entre el diseño sonoro y la evidencia sobre el comportamiento del consumidor, exigiendo alinear decisiones creativas timbre, tempo, estructura, especificidad del brief con resultados de marca medibles [1], [4]. El marketing sensorial, en su dimensión auditiva, ha documentado cómo ciertos timbres, ritmos o cadencias 'suenan a marca', generando atajos cognitivos que operan incluso en ausencia de estímulos visuales [5].

Un hilo conductor es la congruencia música–marca. Cuando el 'tono' del sonido calza con el posicionamiento, suelen optimizarse evaluaciones y recuerdo; la incongruencia capta atención pero no necesariamente genera actitudes favorables sostenidas. Evidencia neurofisiológica ha documentado efectos diferenciados de música congruente vs. incongruente en atención, emoción y memoria publicitaria [6].

B. IA Generativa de Música y el Rol del Brief

Modelos text-to-music como MusicLM [2] y MusicGen [3] permiten condicionar estilo, tempo e instrumentación a partir de prompts, abaratando y acelerando la iteración creativa. Este giro abre preguntas empíricas clave: ¿cómo varían calidad percibida, autenticidad y congruencia cuando la pieza proviene de IA? ¿Qué rol juega la especificidad del brief en esa evaluación? La literatura sugiere que la calidad del resultado no depende solo de la herramienta, sino del nivel de claridad con que se le orienta [1]. En este sentido, el brief deja de ser un requisito formal y se convierte en el eje del proceso creativo cuando se trabaja con generación algorítmica.

C. Autenticidad, Emoción y Función Mnemónica

La autenticidad percibida funciona como factor mediador entre el estímulo sonoro y la conexión emocional con el consumidor [4]. La memoria no se activa únicamente por estructura simple o repetición, sino por la combinación de emoción, significado y diseño sonoro [7]. Para capturar la respuesta afectiva, la Geneva Emotional Music Scale (GEMS) organiza emociones musicales de dominio específico poder, ternura, nostalgia [8], mientras el Self-Assessment Manikin (SAM) captura valencia, activación y dominancia con bajo costo de aplicación [9]. El campo en su conjunto sugiere que la congruencia guía la eficacia del sonic branding, que el afecto musical actúa como mecanismo proximal entre diseño sonoro y memoria, y que la IA introduce nuevas decisiones de briefing con posibles efectos sobre esos mecanismos [1], [4].

D. Contexto de Aplicación: Colombia Digital

El país ofrece un terreno fértil para estudiar sonic branding en entornos digitales: la penetración de Internet móvil alcanzó 91 por cada 100 habitantes en 2024–2025, con más de 48 millones de accesos, lo que favorece el consumo de audio on-the-go [10]. A la par, el ecosistema de podcast gana peso en la dieta mediática local, ampliando los puntos de contacto sonoros de las marcas [11]. Este marco refuerza la pertinencia estratégica de estudiar cómo el público evalúa congruencia, calidad y autenticidad en jingles generados por IA frente a piezas humanas.

III. Metodologia

A. Tipo de Investigación y Diseño

Estudio cualitativo de corte interpretativo con entrevistas de escucha guiada (audio-elicitation) como técnica principal. Cada participante escuchó tres clips controlados en duración y nivel de volumen, y a partir de esa experiencia describió percepciones, significados y criterios de evaluación. El protocolo y los materiales se pre-registraron para alojarse en un repositorio OSF.

B. Construcción de los Estímulos Sonoros

Se diseñaron tres condiciones con la herramienta Suno:

- IA-Baja especificidad (IA-Genérico): clip de ~45 s. Se describió a qué se dedicaba la marca y el ritmo requerido, sin parámetros técnicos adicionales.
- IA-Alta especificidad (IA-Específico): clip de ~45 s con parámetros detallados: 150 bpm, E mayor, vibrant synths, up-tempo, hip-hop, hard beats, male vocals, citypop. La letra fue co-creada entre el equipo y la IA.
- Composición Humana: letra inédita escrita e interpretada por un integrante del semillero, guitarra como instrumento principal, ~40 s de duración.

Los clips se presentaron con orden aleatorio para minimizar sesgos de secuencia y se controlaron en nivel de volumen para garantizar condiciones de escucha comparables.

C. Constructos Explorados

Se trabajó con cinco constructos definidos a priori: (1) congruencia música-marca ajuste percibido entre identidad y rasgos del jingle; (2) calidad percibida claridad de producción, cohesión y profesionalismo; (3) autenticidad percibida firma propia vs. sonido genérico; (4) respuesta afectiva valencia, activación y dominancia mediante escala SAM reducida de 1 a 9; y (5) función mnemónica saliencia y reconocimiento auto-reportado.

D. Muestreo y Participantes

Se empleó muestreo intencional con variación máxima considerando edad, familiaridad con la marca, preferencia musical y dispositivo de escucha. Criterios de inclusión: mayores de 18 años, consentimiento informado y disponibilidad para sesión de 30 a 45 minutos. Se planificaron entre 20 y 30 entrevistas, ajustando el número por saturación temática, es decir, cuando dejaron de emerger códigos o temas nuevos. Se documentó un registro de participantes con seudónimo, perfil y notas contextuales.

E. Instrumento y Trabajo de Campo

Se aplicó una guía semiestructurada con preguntas disparadoras tras cada clip: emoción evocada, congruencia, calidad, autenticidad, mnemónico y comparaciones entre condiciones. Al cierre se pidió una evaluación global de los tres estímulos. Las entrevistas se realizaron presencialmente o por videollamada con grabación de audio y notas de campo. Los datos se transcribieron, anonimizaron con seudónimos y almacenaron en repositorios encriptados.

F. Análisis: Análisis Temático Reflexivo

El análisis siguió el enfoque de Braun & Clarke en seis fases: familiarización, codificación línea a línea, búsqueda de temas, revisión, definición y redacción. Se construyó un codebook con siete categorías analíticas: (1) creatividad e innovación, (2) eficiencia y rapidez, (3) personalización y adaptación, (4) limitaciones técnicas y artísticas, (5) riesgos éticos y de autenticidad, (6) potencial de apoyo al ser humano, e (7) impacto en la experiencia del consumidor. Se mantuvo una bitácora de

reflexividad y un rastro de auditoría con versionado del codebook para garantizar rigor analítico.

G. Consideraciones Éticas

El estudio se adhiere a principios de autonomía, confidencialidad y minimización de riesgos. Todos los participantes firmaron consentimiento informado y se garantizó anonimato mediante seudónimos. Las transcripciones completas solo se comparten bajo solicitud justificada. El proyecto se encuentra en proceso de formalización ante el comité de ética institucional

IV. Resultados

El análisis temático reflexivo permitió identificar patrones consistentes en la forma en que los participantes evaluaron los tres estímulos sonoros. Estos patrones se estructuran en torno a tres ejes interpretativos: congruencia música–marca, calidad y autenticidad percibida, y función mnemónica.

A. Congruencia Música–Marca

La congruencia fue el criterio más recurrente en las respuestas, entendida no como un juicio técnico sino como una sensación de representatividad identitaria. Los participantes no evaluaban únicamente si el jingle era 'bueno', sino si lograba representar lo que es el semillero Huellas Industriales.

En el jingle IA-Genérico predominó una percepción de desconexión. Aunque el audio no era rechazado, se percibía como poco representativo:

"No me suena a marca (P01)"

"está muy calmada para ser un grupo de investigación que quiere dejar huella (P01)"

"podría ser para cualquier cosa"

Con el jingle IA-Específico se evidenció un cambio significativo: los participantes comenzaron a reconocer una relación con la marca. La especificidad del brief orientó la percepción hacia una interpretación más alineada con la identidad:

"se siente más relacionado con el semillero"

"ya transmite mejor lo que hacen"

"se asocia más con investigación e innovación"

El jingle humano alcanzó el mayor nivel de congruencia con respuestas más contundentes y emocionales. Aquí la congruencia trasciende lo musical e incorpora una dimensión de intencionalidad percibida:

"Representa muy bien lo que somos"

"es como si hubiera sido hecho desde dentro del grupo (Penka)"

B. Calidad y Autenticidad Percibidas

Los participantes diferenciaron sistemáticamente calidad técnica de autenticidad emocional, estableciendo una jerarquía de valores que favorece la segunda sobre la primera.

Los jingles de IA fueron reconocidos por su nivel de producción y ejecución técnica:

"Muy buena calidad del audio (Jose)"

"suena limpio"

"se siente bien producido"

Sin embargo, esta percepción técnica positiva no se tradujo en valoración emocional. Aparecieron de manera reiterada expresiones que señalaban una distancia afectiva:

"Lo sentí prefabricado, como de máquina (P05)"

"se escucha bien, pero podría servir para cualquier cosa (P02)"

En contraste, el jingle humano concentró las valoraciones más altas pese a reconocerse como menos pulido técnicamente:

"es único"

"tiene algo que los demás no logran (Penka)"

"transmite mucho más (P07)"

La siguiente cita sintetiza con precisión la jerarquía de valores que emerge del análisis:

"La mejor calidad está en el primero, pero el último transmite mucho más (P07)"

Esto evidencia que los participantes valoran más la autenticidad que la perfección técnica, especialmente cuando se trata de representar una identidad colectiva.

C. Función Mnemónica

La recordación mostró diferencias claras entre condiciones. El jingle IA-Genérico fue el menos memorable, con ausencia de elementos diferenciadores que dificulta su retención:

"No lo recordaría, es demasiado general (P01)"

El jingle IA-Específico mostró mejoras parciales: algunos participantes lograron recordar el ritmo o asociarlo con la marca, aunque no de forma consistente. El jingle humano fue el más recordado, con elementos concretos identificables:

"Lo recordé por la guitarra y la melodía, quedó sonando en mi cabeza (P03)"

"Sí, es fácil de recordar por la letra (007)"

La recordación no dependió de repetición sino de la combinación entre emoción, significado y estructura musical. Los resultados del anclaje post-escucha con la escala SAM reflejan estas tendencias: el jingle humano obtuvo los niveles más altos de agrado (valencia) y control (dominancia), mientras que el clip IA-Genérico provocó respuestas más bajas en energía y agrado.

D. Comparación General entre Condiciones

Al solicitar una evaluación global, la mayoría coincidió en que el clip humano era el más auténtico, memorable y representativo de la marca. La Tabla I sintetiza los resultados por condición:

TABLA I Comparacion de percepciones por condicion de estimulo

Dimensión evaluada	**IA Genérico**	**IA Específico**	**Compositor Humano**
Congruencia marca–sonido	Baja	Media	Alta
Calidad técnica	Media	Alta	Media

Autenticidad emocional	Baja	Media	Muy alta
Memorabilidad	Baja	Media	Alta

V. Discusion

A. *El Brief como Eje del Proceso Creativo*

Uno de los hallazgos más sólidos es el impacto de la especificidad del brief en la calidad del resultado generado por IA. Esto refuerza lo planteado por la literatura en marketing sensorial: la coherencia entre el estímulo sonoro y la identidad de la marca es clave para el reconocimiento y la conexión [1], [4]. Cuando las instrucciones fueron generales, los participantes percibieron el jingle como poco representativo; al aumentar el nivel de detalle, la pieza logró una mayor conexión con la identidad del semillero. El brief deja de ser un requisito formal y se convierte en el instrumento a través del cual el creativo puede orientar la herramienta hacia una mayor pertinencia identitaria, desplazando parte de la responsabilidad creativa hacia la fase de instrucción.

Para los equipos de publicidad esto tiene implicaciones directas: la IA no sustituye el criterio creativo, sino que lo desplaza hacia fases previas del proceso. Saber formular un brief efectivo definir tempo, modo, instrumentación, atmósfera emocional se convierte en una competencia crítica para obtener resultados con valor diferencial.

B. *Autenticidad vs. Calidad Técnica*

La distinción que los participantes establecen entre calidad técnica y autenticidad emocional aporta un matiz relevante a la literatura. Mientras los jingles de IA fueron valorados por su producción limpia, el jingle humano fue descrito como 'con alma', confirmando que la autenticidad opera como mecanismo mediador entre el estímulo sonoro y la conexión emocional [4]. Este resultado coincide con hallazgos sobre la percepción de creatividad mediada por IA, donde la ausencia de intencionalidad humana percibida reduce la valoración estética incluso cuando el resultado técnico es superior [12].

Esto sugiere que la IA es más efectiva en etapas de prototipado rápido y exploración de variaciones, mientras que la intervención humana resulta imprescindible cuando el objetivo es construir identidad sonora duradera. No se trata de una competencia entre ambas formas de creación, sino de roles diferenciados dentro de un mismo proceso.

C. *Memoria como Resultado de la Conexión Emocional*

Los resultados sobre la función mnemónica confirman lo planteado por Zentner et al. [8] y Koelsch [7]: la memoria no se activa solo por repetición o estructura simple, sino por la combinación de emoción, significado y diseño sonoro. El jingle humano fue el más recordado no porque fuera técnicamente superior, sino porque logró articular intención, identidad y emoción. Frases como 'se me quedó sonando' o 'lo recuerdo por la guitarra' reflejan que la experiencia mnemónica es primero una experiencia afectiva.

D. *Hacia un Modelo de Co-creación Humano–Máquina*

Los resultados no plantean una competencia directa entre IA y creación humana, sino que evidencian roles complementarios. La IA aporta eficiencia, variedad y velocidad de iteración; el ser humano aporta intención, criterio y sensibilidad emocional. En el contexto específico de Huellas Industriales, se evidencia que los participantes valoran especialmente aquellos elementos que reflejan la identidad colectiva del semillero, lo que abre una reflexión sobre la importancia de adaptar el sonic branding no solo a estrategias de mercado, sino también a contextos culturales y organizacionales específicos [13], [14].

E. *Implicaciones Éticas y de Gobernanza*

Los participantes expresaron preocupaciones sobre autoría, transparencia y originalidad en piezas generadas por IA. Esto es consistente con la literatura emergente sobre IA responsable, que señala la necesidad de protocolos de trazabilidad y documentación del origen de los activos sonoros generados algorítmicamente [15], [16]. Preguntas sobre a quién pertenece una obra co-creada con IA, y cómo se comunica eso al público, emergen como dimensiones relevantes para la práctica publicitaria responsable.

VI. Limitaciones

Como todo estudio cualitativo, este trabajo no busca generalizar resultados sino comprender en profundidad las percepciones de un grupo específico. Se identifican seis limitaciones principales.

La cercanía de los participantes al semillero Huellas Industriales pudo favorecer una mayor identificación emocional con la pieza humana. El estudio se desarrolló en un entorno académico, por lo que las percepciones identificadas pueden variar en contextos comerciales o publicitarios masivos. Las diferencias inherentes entre los estímulos no permiten una comparación completamente controlada, sino una comparación de experiencias de escucha, coherente con el enfoque interpretativo.

Los participantes escucharon clips cortos en condiciones controladas, lo que difiere de la interacción real con la música, donde intervienen la repetición, el contexto ambiental y el dispositivo. El análisis emocional se centró principalmente en la interpretación cualitativa de las respuestas; no se profundizó en mediciones psicofisiológicas que podrían complementar los hallazgos. Finalmente, las herramientas de generación musical basadas en IA se encuentran en constante evolución, por lo que los resultados reflejan un momento específico en el desarrollo de estas tecnologías.

VII. Conclusiones

Este estudio demuestra que la percepción del sonic branding generado por IA está mediada por tres factores: la especificidad del brief, la autenticidad emocional percibida y la capacidad del estímulo para generar una experiencia mnemónica significativa. La IA puede cumplir un papel funcional en la generación de jingles, especialmente en etapas de prototipado, pero enfrenta limitaciones claras cuando el objetivo es construir identidad sonora y conexión emocional duradera.

El hallazgo central que los oyentes valoran más la autenticidad que la perfección técnica tiene implicaciones directas para los equipos creativos. El jingle humano no 'ganó' por ser artesanal, sino porque logró articular intención, identidad y emoción de forma que la IA, con las instrucciones disponibles, no consiguió igualar. En este sentido, la verdadera competencia no está entre IA y creación humana, sino en aprender a combinarlas estratégicamente.

Se recomienda para futuras investigaciones: replicar el estudio con muestras más amplias y diversas; triangular con experimentos cuantitativos y medidas psicofisiológicas como EEG o conductancia de la piel; explorar modelos híbridos de co-creación que integren curaduría humana en diferentes fases del proceso algorítmico; desarrollar protocolos de trazabilidad para activos sonoros generados con IA en contextos publicitarios; y diseñar field experiments en entornos reales para medir métricas comerciales como CTR o tasa de conversión.

VIII. DECLARACIONES

Aprobación ética: Todos los participantes firmaron consentimiento informado y se garantizó anonimato mediante seudónimos. El proyecto se encuentra en proceso de formalización ante el comité de ética institucional.

Disponibilidad de datos: Guía de entrevista, prompts y codebook se depositarán en OSF. Las transcripciones completas solo se comparten bajo solicitud justificada.

Financiamiento: Sin financiación externa. Desarrollado con recursos propios y apoyo institucional.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

REFERENCES

[1] Spence, C., & Keller, S. (2024). Sonic branding: A narrative review. Psychology & Marketing, 41(7), 1530–1548. doi: 10.1002/mar.21986

[2] Agostinelli, A., Denk, T. I., Borsos, Z., Engel, J., Verzetti, M., Caillon, A., et al. (2023). MusicLM: Generating music from text. arXiv preprint arXiv:2301.11325.

[3] Copet, J., Kreuk, F., Gat, I., Remez, T., Kant, D., Synnaeve, G., Adi, Y., & Défossez, A. (2023). Simple and controllable music generation (MusicGen). arXiv preprint arXiv:2306.05284.

[4] Kemp, E., Cho, Y.-N., Bui, M., & Kintzer, A. (2024). Music to the ears: The role of sonic branding in advertising. International Journal of Advertising, 43(6), 1039–1059. doi: 10.1080/02650487.2023.2279702

[5] Krishna, A. (2012). An integrative review of sensory marketing: Engaging the senses to affect perception, judgment and behavior. Journal of Consumer Psychology, 22(3), 332–351. doi: 10.1016/j.jcps.2011.08.003

[6] Ausín, F., Bigné, E., & Marín-Morales, J. (2021). The background music–content congruence of TV advertisements: A neurophysiological study. European Research on Management and Business Economics, 27(3), 100154. doi: 10.1016/j.iedeen.2021.100154

[7] Koelsch, S. (2014). Brain correlates of music-evoked emotions. Nature Reviews Neuroscience, 15(3), 170–180. doi: 10.1038/nrn3666

[8] Zentner, M., Grandjean, D., & Scherer, K. R. (2008). Emotions evoked by the sound of music. Emotion, 8(4), 494–521. doi: 10.1037/1528-3542.8.4.494

[9] Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The Self-Assessment Manikin and the Semantic Differential. Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry, 25(1), 49–59. doi: 10.1016/0005-7916(94)90063-9

[10] MinTIC. (2025). Colombia superó los 48 millones de accesos a Internet móvil. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Recuperado de https://mintic.gov.co

[11] Barrios-Rubio, A., & Reyes Espitia, J. F. (2024). The podcast in the consumption agenda of Colombian digital users. Journalism. doi: 10.1177/14648849241233

[12] Manovich, L. (2019). AI aesthetics. Strelka Press.

[13] Boden, M. A. (2004). The creative mind: Myths and mechanisms. Routledge.

[14] Pachet, F. (2019). Creative AI and musical style transfer. Journal of Creative Music Systems, 4(1). doi: 10.5920/jcms.621

[15] Crawford, K. (2021). Atlas of AI: Power, politics, and the planetary costs of artificial intelligence. Yale University Press.

[16] Dignum, V. (2019). Responsible artificial intelligence: How to develop and use AI in a responsible way. Springer. doi: 10.1007/978-3-030-30371-6

[17] Hultén, B. (2011). Sensory marketing: The multi-sensory brand-experience concept. European Business Review, 23(3), 256–273. doi: 10.1108/09555341111130245

[18] North, A. C., & Hargreaves, D. J. (2008). The social and applied psychology of music. Oxford University Press.

[19] Lindstrom, M. (2005). Brand sense. Free Press.

[20] Vallor, S. (2016). Technology and the virtues: A philosophical guide to a future worth wanting. Oxford University Press.

[21] Sharp, B. (2010). How brands grow. Oxford University Press.

[22] Juslin, P. N., & Sloboda, J. A. (2010). Handbook of music and emotion. Oxford University Press.

Revisión Sistemática bajo Metodología PRISMA: Viabilidad Técnica y Sostenibilidad de la Ceniza de Bagazo de Caña como Adición Puzolánica

1st Dina Maria Ramirez Cortes
Estudiante Programa Ingeniería Industrial
Institución Universitaria Antonio José Camacho,
Cali, Colombia
dinamramirez@estudiante.uniajc.edu.co

2nd Victor David Fernandez
Estudiante Programa Ingeniería Industrial
Institución Universitaria Antonio José Camacho,
Cali, Colombia
vmdavid@estudiante.uniajc.edu.cob

3rd Lizeth Castro Mercado
Docente Ocasional Tiempo Completo Programa Ingeniería Industrial
Institución Universitaria Antonio José Camacho,
Cali, Colombia
Lizethcastro@profesores.uniajc.edu.co

4to Pedro Mattey Centeno
Docente Ocasional Tiempo Completo Programa Ingeniería Industrial
Institución Universitaria Antonio José Camacho,
Cali, Colombia
pmattey@profesores.uniajc.edu.co

Abstract - This research project, developed by students from the Alternative Materials Research Group, presents a systematic literature review based on the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) methodology. The primary objective is to evaluate the technical feasibility of using sugarcane bagasse ash as a partial replacement for Type I Portland cement. The methodological phase involved identification, screening, and selection of information, resulting in the analysis of 15 high-impact scientific articles and case studies that met the technical inclusion criteria. The findings from this review indicate that incorporating this waste at replacement levels between 5% and 20% creates a synergistic effect that significantly improves compressive and flexural strength in medium-strength mortars and concretes, optimizing the durability of the mixes. Furthermore, it was identified that while the irregular particle morphology may reduce workability due to high water absorption capacity, its chemical reactivity under controlled conditions enhances the mechanical stability of the structures (pozzolanic activity). In conclusion, this student-led review demonstrates that the development of 'green concretes' through the valorization of agro-industrial by-products is an efficient circular engineering strategy to mitigate environmental impact and reduce greenhouse gas emissions by decreasing cement content in mortar and concrete mixes through the use of sugarcane bagasse ash.

Keywords Sugarcane bagasse ash, green concrete, pozzolanic activity

I. INTRODUCCIÓN

La confluencia del desarrollo de infraestructura y la urgencia climática exige una reevaluación de los materiales de construcción tradicionales. El cemento Tipo I (Portland), es el material aglomerante más utilizado a nivel mundial y es por esto que representa un reto crítico debido a su alta huella de carbono (responsable de aproximadamente el 8% del CO2 a nivel mundial por su proceso de clinkerización) [1], [2];. Ante esta problemática, la comunidad científica ha volcado sus esfuerzos hacia la búsqueda de Materiales Cementantes Alternativos (MCA).

En este contexto, la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA), un subproducto abundante de la agroindustria azucarera se posiciona como una alternativa con alto potencial de uso. Numerosas investigaciones han evaluado su potencial puzolánico (capacidad de generar aglomeración en presencia de agua e hidróxido de calcio), debido a su alto contenido de sílice y alúmina. El objetivo de este artículo es sistematizar la evidencia reciente sobre la influencia de la CBCA en las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto, validando el mapa de ruta para una gestión sostenible.

II. METODOLOGÍA

Para garantizar la reproducibilidad, transparencia y rigor científico exigido, esta revisión de literatura se desarrolló siguiendo los lineamientos de la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [3].

El proceso de selección de los artículos se estructuró en cuatro etapas críticas, partiendo de un universo inicial de 64 artículos:

Identificación: Se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos indexadas de alto impacto (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar y EBSCOHost), identificando 64 artículos iniciales. Se utilizaron cadenas de búsqueda con operadores booleanos y palabras clave como: "Sugarcane bagasse ash", "Concrete compressive strength", "Pozzolanic activity" y "Cement replacement".

Cribado (Screening): Tras la eliminación de documentos duplicados y la lectura crítica de títulos y resúmenes para descartar estudios fuera del contexto de sustitución en mezclas de concreto, el registro se redujo a 42 artículos. La mayoría de los artículos eliminados mencionaban a la fibra del bagazo de caña como una fibra de refuerzo para elementos de concreto; aspecto que dista del foco central de esta investigación.

Elegibilidad: Se procedió a la revisión a texto completo de los 42 estudios, aplicando criterios de exclusión estrictos (falta de rigor experimental, ausencia de caracterización química bajo normas ASTM, o ensayos incompletos a los 28 días de curado donde no se podía evidenciar la acción puzolánica a edades tardías de curado), resultando en 21 artículos elegibles.

Inclusión: Tras un análisis cualitativo y cuantitativo profundo, se consolidó una muestra final de 15 artículos de alto impacto que constituyen el núcleo de esta revisión.

A continuación se muestra la “fig. 1” con el diagrama de flujo del método PRISMA aplicado en este estudio específico sobre el uso de CBCA como material aglomerante en mezclas cementicias.

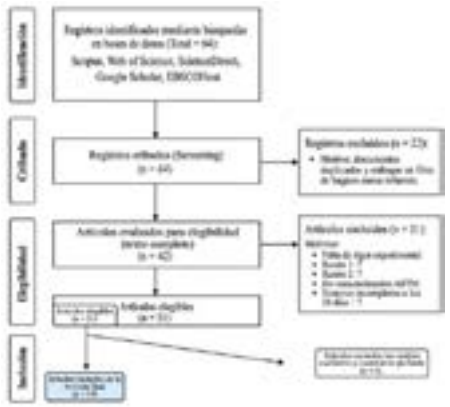


Fig. 1. Diagrama de flujo de la selección de estudios basado en la declaración PRISMA 2020

III. DESARROLLO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Caracterización Físico-Química de la CBCA

Para que la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) actúe como un Material Cementante Suplementario (MCS) eficiente, debe cumplir con estrictos parámetros de composición química, estructura cristalográfica y granulometría. La literatura coincide en que la viabilidad de la CBCA radica en su naturaleza química, compuesta mayoritariamente por dióxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) (Zea et al., 2023). De acuerdo con la norma ASTM C618, la suma de estos tres óxidos debe ser igual o superior al 70% para que el residuo se clasifique como una puzolana natural o artificial de clase N o F [4], [5].

Sin embargo, poseer esta composición química no garantiza por sí sola la reactividad. Diversos autores correlacionan que el historial térmico (temperatura de calcinación) y la finura de la partícula (molienda) son los factores técnicos que gobiernan la activación del material [6].

Influencia de la Temperatura de Calcinación y la Estructura Amorfa Estudios como los de Hu et al. (2020) y Cordeiro et al. (2009) demuestran que la temperatura óptima de calcinación oscila entre los 600 °C y 800 °C. En este rango térmico, se reduce significativamente el contenido de carbón inquemado (reflejado en una Pérdida por Ignición - LOI inferior al 10%), lo cual es fundamental para una buena actividad puzolánica; este aspecto también fue corroborado por

Vidal en el 2014, este autor presenta en su estudio el difractograma que se ve a continuación en la "fig. 2".

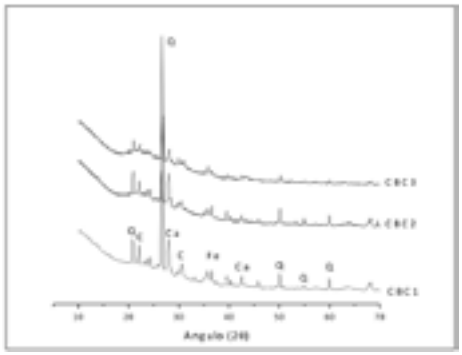


Fig. 2. Difractograma realizado a 3 CBCA a temperaturas entre los 600 y 800 °C [4].

La consecuencia directa de mantener la temperatura controlada es la obtención de sílice en estado amorfo. Por el contrario, si la temperatura en las calderas de los ingenios azucareros supera los 800 °C o 1000 °C, la sílice amorfa se recristaliza, transformándose en fases minerales estables e inertes como el cuarzo y la cristobalita. Investigadores como Vidal en el 2014 y Miller en el 2019, evidenciaron mediante difractogramas de rayos X (DRX) que la presencia de estas fases cristalinas anula drásticamente el índice de actividad puzolánica, comportándose la ceniza simplemente como una arena o material de relleno inerte [4], [7].

Influencia de la Granulometría y la Superficie Específica La molienda mecánica de la CBCA es otro parámetro crítico. Autores como Tabish y Rukzon y Chindaprasirt, comprobaron que someter la ceniza a procesos de molienda incrementa drásticamente el Índice de Actividad de Resistencia (SAI), logrando superar el 100% respecto a la mezcla patrón. La reducción del tamaño de partícula (frecuentemente a diámetros inferiores a 45 o 60 micras) incrementa la superficie específica del material, creando una mayor área de contacto. En la "Fig. 3" que se muestra a continuación se logra observar los índices de puzolanicidad de diferentes cenizas teniendo en cuenta procesos de molienda (m) y cenizas sin molienda (s/m) [8].

Ingenios	Condición	Índice de puzolanicidad (%)	Coeficiente puzolánico
La Florida	S/M	52,06	0,491
	M	102,4	0,479
Cruz Alta	S/M	25,76	0,537
	M	95,30	0,528
San Juan	S/M	21,15	0,542
	M	67,53	0,538
Santa Rosa	S/M	53,38	0,571
	M	72,44	0,472
Trinidad	S/M	25,06	0,566
	M	99,08	0,542
Concepción	S/M	17,77	0,582
Marapa	S/M	9,70	0,516
Aguilares	S/M	9,79	0,459

Fig. 3. *Resultados ensayo de Fratino (índice de puzolanicidad). [8]*

Consecuencias Teóricas de las Propiedades Fisicoquímicas en la Matriz Cementante La convergencia de una alta concentración de sílice amorfa y una gran superficie específica desencadena una serie de consecuencias directas en la microestructura del concreto:

Durante la hidratación primaria del cemento Portland, se genera silicato de calcio hidratado (C-S-H), que aporta la resistencia mecánica por ocupar los espacios vacíos dentro de la mezcla de concreto, e hidróxido de calcio o portlandita ($Ca(OH)_2$), el cual es soluble, débil y vulnerable a ataques químicos. La consecuencia química de la sílice amorfa de la CBCA es que reacciona con esta portlandita libre, generando un gel de C-S-H secundario. Esto produce un efecto de densificación en la matriz: los espacios capilares se llenan (efecto *filler*), reduciendo drásticamente la porosidad y la permeabilidad. A nivel macroscópico, esto se traduce en un notable aumento de la resistencia a la compresión a edades tardías (28 a 90 días) y una resistencia superior a la penetración de iones cloruro o ataques por sulfatos [1].

Por otra parte, teniendo en cuenta la alta superficie especifica de las partículas de CBCA y su morfología irregular y porosa (aspecto que se incrementa si hay presencia residual de inquemados), la trabajabilidad de la mezcla se ve afectada de forma negativa ya que se incrementan los requerimientos de agua de la mezcla. Investigaciones de Ganesan y Arbeláez, confirman que la adición de CBCA disminuye el asentamiento (*slump*) y dificulta la trabajabilidad del concreto en estado fresco. Teniendo en cuenta que a mayores relaciones de agua vs cemento, la resistencia se ve afectada, se hace necesaria la incorporación de aditivos superplastificantes

reductores de agua para mantener las relaciones agua / cemento sin sacrificar la reología del material [9], [10].

B. Influencia en las Propiedades Mecánicas y Cinética de Hidratación: Un Análisis Crítico

La incorporación de Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) no genera un aumento lineal y estandarizado en las propiedades mecánicas del concreto. Su comportamiento obedece a una curva de optimización que varía drásticamente en la literatura dependiendo de la dosificación y las características intrínsecas de la ceniza utilizada.

Aunque la literatura converge en que el rango de sustitución viable oscila entre el 5% y el 20%, el "pico óptimo" genera debate entre los investigadores al contrastar los valores absolutos a los 28 días de curado.

Un sector de la investigación concluye que el porcentaje ideal es estrictamente del 5% al 10%, Quito-Solórzano con la ayuda de otros investigadores, demostraron que, frente a un concreto patrón de 222.86 kg/cm^2, la adición del 5% de CBCA disparó la resistencia a 295.67 kg/cm^2; sin embargo, al llegar al 15%, la resistencia cayó a 202.22 kg/cm^2, estando por debajo del esfuerzo de diseño. En esta misma línea, Srinivasan y Sathiya en el 2010, reportaron que su mezcla de control (21.47 *MPa*) alcanzó un pico de 29.5 *MPa* al 5% de sustitución, pero decayó a 19.32 *MPa* al utilizar un 15% [11], [6].

No obstante otros autores demuestran que es posible alcanzar el óptimo estructural en rangos más altos (del 10% al 15%) si la CBCA cuenta con una alta superficie específica. Apaza en el 2018 evidenció un incremento directamente proporcional hasta el 15%, logrando 367.79 kg/cm^2 frente a los 311.32 kg/cm^2 de la muestra de control. De igual forma, Amin en el año 2011logró mantener las resistencias por encima del concreto patrón (36 *MPa*) incluso utilizando un 20% de CBCA (40 *MPa*), encontrando su pico máximo en el 10% con 43 *MPa* [11],

Este contraste crítico sugiere que el verdadero límite de sustitución no es un porcentaje fijo, sino que depende estrictamente del porcentaje de sílice reactiva en la ceniza y de la finura de molienda aplicada en cada experimento.

A pesar de las discrepancias existentes sobre el pico óptimo de uso de CBCA, existe un consenso absoluto entre los investigadores, ya que todos argumentan que superar el 20% de sustitución genera un declive estructural importante. Autores como Cabrera y Díaz (2010) registraron caídas de hasta el 62% en la resistencia a la compresión al utilizar reemplazos del 40% a los 28 días. Asimismo, Huaraca (2019) cuantificó un decremento del 13.85% en mezclas con 20% de CBCA respecto a su diseño base de 295.16 kg/cm^2 [9], [11].

Teóricamente, este fenómeno se explica por la superposición de dos efectos que se generan en la mezcla; el primero de ellos es la saturación puzolánica por la elevada presencia de CBCA, la reacción puzolánica requiere que la sílice amorfa de la CBCA reaccione con la portlandita ($Ca(OH)^2$) liberada por la hidratación del cemento. Al exceder el 20% de reemplazo, se ha retirado tanto cemento de la mezcla que simplemente no hay suficiente $Ca(OH)^2$ para activar toda la ceniza. El segundo efecto que se evidencia es el exceso de CBCA que no reacciona en la mezcla y permanece en la matriz como un relleno inerte (arena fina), lo cual introduce zonas de debilidad microestructural que fracturan el concreto ante esfuerzos de compresión [12]

La evolución temporal de la resistencia al incorporar CBCA obliga a reevaluar lo que ocurre con las mezclas a los 28 días de curado, debido a que a edades tardías es que se logra evidenciar como el efecto puzolánico consolida la matriz. Por ejemplo, Respaldiza en el 2023 evidenció cómo un concreto patrón de 32.10 *MPa* logró saltar a 51.30 *MPa* a los 28 días con solo 5% de CBCA [13]

Para edades tempranas, el efecto dominante de la CBCA es de carácter físico (efecto filler de llenado de poros), buscando usar esta característica de la ceniza a edades tempranas, Paniura y Vargas (2020) propusieron el uso de CBCA no como reemplazo de cemento, sino de agregado fino (arena) en concretos Fast-Track para pavimentación; descubriendo que una sustitución de apenas el 3% generó un incremento del 10.32% en la resistencia a las 72 horas (f'c 210 kg/cm^2), habilitando el flujo vehicular rápido sin sacrificar la resistencia final [14]

C. Durabilidad y Desempeño en Ambientes Agresivos

La durabilidad del concreto define su vida útil y su resiliencia ante factores externos destructivos. La literatura revisada demuestra que el desempeño de la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) frente a ambientes agresivos está intrínsecamente ligado a la alteración de la red de poros del material.

La durabilidad frente a ataques químicos depende de la capacidad del concreto para evitar el ingreso de fluidos. La adición de mezclas minerales como la CBCA tiene un efecto positivo que se explica mediante la modificación física de la microestructura: el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) secundario formado por la reacción puzolánica actúa bloqueando los conductos capilares. De acuerdo con Helene (1995) y Silva (2007), esto genera una disminución en el tamaño de los poros, aumentando la densidad de la matriz cementicia y por ende una reducción drástica de la interconectividad entre poros. Como resultado, la tasa de absorción capilar y la permeabilidad caen significativamente en la matriz cementante a edades tardías (90 días) [15]

Cuando se evalúan ambientes agresivos para un concreto, los ambientes marinos son tomados en cuenta, ya que la corrosión inducida por iones cloruro es la principal causa de deterioro en zonas costeras. Múltiples autores han evaluado este fenómeno mediante el Ensayo de Penetración Rápida de Cloruros (RCPT - ASTM C1202) y coeficientes de difusión, obteniendo resultados altamente favorables; Respaldiza en el 2023, evaluó concretos expuestos en la costa de Lima y demostró que una sustitución del 15% de cemento por CBCA alcanzó una resistividad eléctrica alta (a los 33 días) y redujo la penetrabilidad de cloruros a un valor específico de 1242 Coulombios (clasificado como penetrabilidad baja) [9]

Ganesan et al. (2007) identificaron que, a los 90 días de curado, la permeabilidad a los cloruros en mezclas con hasta un 25% de CBCA se redujo drásticamente, representando aproximadamente el 60% de la permeabilidad registrada en la mezcla de control. Este aspecto fue reafirmado por Rukzon y Chindaprasirt en el 2011, los cuales comprobaron que el coeficiente de difusión de cloruros a los 90 días disminuyó en un 30% respecto al patrón cuando se utilizó una sustitución de 30% de CBCA. Además, Farrant y otros investigadores en el 2022 sostienen que la CBCA aumenta la resistividad eléctrica al atrapar y fijar químicamente los cloruros libres [15]

Otro aspecto que se toma como ambiente agresivo, es la exposición a sulfatos, ácidos y carbonatación acelerada; teniendo en cuenta que la reacción puzolánica de la CBCA consume la portlandita libre de la mezcla, se asume que al haber menos hidróxido de calcio disponible, se mitiga la formación de yeso y etringita expansiva, principales causantes de la desintegración del concreto por sulfatos. En inmersión bajo agua ácida, sustituciones óptimas de 10% a 15% lograron disminuir significativamente la pérdida de peso de los especímenes. Valencia en el 2012 expuso morteros con adición de CBCA a cámaras de carbonatación acelerada (100%, 65% humedad relativa y 25°C). Obtuvieron como resultado que los productos de la carbonatación contribuyeron a taponar los poros, logrando que el acero de refuerzo embebido en los concretos, mantuviera una velocidad de corrosión muy baja, incluso después de 150 días de exposición, sin mostrar óxido en la inspección visual [12].

A pesar de los beneficios de la presencia de la CBCA en aspectos de durabilidad, la literatura advierte que superar los rangos óptimos o no tratar adecuadamente la ceniza genera efectos contraproducentes en la durabilidad. Quito-Solórzano, demostró mediante ensayos de resistividad superficial que mientras el 5% y 10% de CBCA mantienen una permeabilidad moderada/baja, utilizar un 15% de sustitución en sus muestras específicas disparó el riesgo de penetración de cloruros. De igual forma, Valencia et al. (2012) reportaron que el uso de CBCA con un tamaño de partícula excesivo (sin molienda ultrafina) incrementó la capilaridad, provocando que los especímenes inmersos en al 3.5% mostraran velocidades de corrosión moderadas y óxido prematuro en el acero. Esto confirma que el control granulométrico es un prerrequisito ineludible para garantizar la durabilidad [11]

D. Sostenibilidad, Eco-Eficiencia y Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La viabilidad del uso de la Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) vas más allá de sus propiedades físico-mecánicas; su verdadero valor estratégico en la ingeniería está en su capacidad para modificar la eco-eficiencia de la industria constructora. Sin embargo, la literatura revela que la "sostenibilidad" de la CBCA no es absoluta, sino que depende de un delicado equilibrio termodinámico, logístico y económico.

El proceso de clinkerización para la manufactura de cemento Portland exige temperaturas superiores a los 1450 °C, consumiendo alrededor de 4,000 KJ por kilogramo de cemento y generando emisiones antropogénicas desproporcionadas. Diversos autores concuerdan en que la descarbonatación de la caliza y la quema de combustibles fósiles liberan entre 0.85 y 1.0 kg de CO_2 por cada kilogramo de cemento producido [4].

La incorporación de CBCA aborda este problema ambiental mediante un efecto de sustitución directa; investigaciones como las de Fairbairn y Jamora, cuantifican que la sustitución parcial del cemento por CBCA reduce las emisiones de dióxido de carbono hacia

la atmósfera en proporciones estadísticamente significativas. De manera aplicada, estudios recientes han tasado esta mitigación ambiental, demostrando que una sustitución optimizada puede reducir hasta un 8.8% las emisiones de CO2 directas en diseños de mezcla específicos [16]

Autores como Bonilla en el 2019 y Ariza en el mismo año destacan un "ahorro energético sustancial" al evitar la clinkerización, mientras que otros investigadores presentan una postura mucho más cautelosa respecto a la "carga energética oculta" de la CBCA. Para que la ceniza cruda alcance el grado de finura y la estructura amorfa necesarios para reaccionar puzolánicamente, debe someterse a procesos de adecuación (calcinación controlada a 600-800°C para eliminar inquemados orgánicos y una molienda ultrafina prolongada). Algunos estudios advierten que si los requerimientos de energía y molienda para disminuir el tamaño de la partícula son muy altos, los costos adicionales (y las emisiones de dicha maquinaria) pueden hacer que el uso de la CBCA pierda su viabilidad técnica y ecológica frente al concreto patrón.

Además, el transporte de la biomasa desde las refinerías azucareras hasta las plantas concreteras añade una carga logística que puede mermar la eco-eficiencia si las distancias son excesivas. Por tanto, el beneficio ambiental real es la diferencia neta entre el CO_2 ahorrado por el cemento no utilizado y el CO_2 emitido en acondicionar mecánicamente la ceniza [18]

Finalmente, la sostenibilidad debe venir acompañada de viabilidad financiera. El contraste económico de los autores arroja márgenes de ahorro tangibles. Huaraca (2019) documentó que el uso de CBCA puede disminuir el costo del metro cúbico de concreto hasta en un 8.99%. En estudios más recientes y conservadores, la optimización con reemplazos de CBCA en el rango del 10% al 15% generó reducciones en el Análisis de Costos Unitarios (ACU) del orden del 3.36% al 4% por metro cúbico. Estas cifras demuestran que, al margen de la importancia ecológica, la sustitución representa un incentivo financiero directo para la industria de la construcción al reducir la dependencia del material aglomerante más costoso de la mezcla de concreto [16].

IV CONCLUSIONES

El porcentaje óptimo de sustitución del cemento Portland o agregado fino por CBCA se sitúa entre el 5% y el 15%. En este rango se garantizan e incluso superan las resistencias mecánicas del concreto convencional (patrón) a los 28 días.

La CBCA mejora la microestructura del concreto, densificando la matriz y reduciendo su permeabilidad, lo que incrementa su vida útil frente a ataques químicos o ambientes agresivos de exposición.

Su implementación a escala industrial coadyuvaría a reducir hasta en un 15% las emisiones de CO_2 asociadas a la producción de mezclas cementantes, representando un avance crucial para la ingeniería y el cluster del hormigón, además de los beneficios económicos que se podrían obtener si la gestión de residuo agroindustrial se realiza de manera adecuada.

ACKNOWLEDGMENT

Este trabajo fue apoyado por la Institución Universitaria Antonio José Camacho, en el semillero SEGESTOP, del grupo de investigación INTELIGO

REFERENCIAS

[1] M. E. Laza Ospina y M. D. Araujo Bravo, "Análisis del efecto de la ceniza de biomasa como sustituto parcial del cemento en la elaboración de concreto simple," Monografía de grado, Dept. Ing. Mecánica, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia, 2020.

[2] R. S. Coronel Camino, S. P. Muñoz Pérez, y E. D. Rodriguez Lafitte, "Efecto de la ceniza de bagazo de caña de azúcar en las propiedades del concreto," *Rev. INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*, vol. 8, no. 21, pp. 45-60, ago.-dic. 2021.

[3] M. J. Page *et al.*, "Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas," J. J. Yepes-Nuñez, G. Urrútia, M. Romero-García, y S. Alonso-Fernández, Trads., *Rev. Esp. Cardiol.*, vol. 74, no. 9, pp. 790-799, sep. 2021.

[4] H. S. Vidal, M. A. Argaez, y J. L. Reyes, "Ceniza de bagazo de caña para elaboración de materiales de construcción," *Revista de Ingeniería y Tecnología Educativa*, vol. 6, no. 1, pp. 69-78, ene. 2022.

[5] J. A. Zea, A. López, D. Hernández, J. E. Mandujano, y J. A. Cabrera, "Desempeño de la adición de ceniza de bagazo de caña como filler para producir concretos autocompactantes," *Revista ALCONPAT*, vol. 13, no. 1, pp. 15-29, ene. 2023, doi: 10.21041/ra.v13i1.642.

[6] D,E. Ma-Tay, “Valorización de cenizas de bagazo procedentes de honduras: posibilidades de uso en matrices de cemento pórtland”, Tesis de Grado, Ingenieria de la Construccion y Proyectos de Ingenieria Civil, Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, España, 2014.

[7] J. D. Gonzáles Zarpán y W. Quispe Prado, "Influencia de la Ceniza de Subproductos-Agroindustriales como sustituto parcial del cemento en las Propiedades Mecánicas y Microestructurales del concreto, ICA-2024," *Rev. Climatología*, vol. 24, pp. 2152-2190, oct. 2024, doi: 10.59427/rcli/2024/v24cs.2152-2190.

[8] Billón, G., Las Heras, A., & Anaya, D. “Caracterización de las cenizas de Bagazo de la caña de azúcar para ser usadas en materiales de construcción”, Memorias del IX Congreso Internacional y 23ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. La Plata, Argentina, 2020.

[9] S. M. Guerrero López, "Ceniza de bagazo de caña de azúcar en el concreto. Exploración preliminar del potencial de uso de la ceniza del valle del Chira," Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura, Piura, Perú, 2020.

[10] E. F. Pajares Urteaga, "Variación de la resistencia a la compresión del concreto kg/cm2 al reemplazar porcentualmente el cemento por ceniza de bagazo de caña de azúcar en Cajamarca 2024," Tesis de maestría, Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú, 2025.

[11] L. M. Quito-Solórzano, K. E. Macías-Salazar y J. C. Guerra-Mera, "Ceniza del bagazo de caña de azúcar para mejorar la resistividad y resistencia del hormigón," *Rev. Cient. INGENIAR: Ing., Tecnol. e Invest.*, vol. 5, no. 10 (Ed. Esp.), pp. 2-17, sep. 2022. doi: 10.46296/ig.v5i10edespsep.0070

[12] Á. L. Baron Bello, "Evaluación del tamaño de partícula y porcentaje de sustitución óptimo de ceniza de bagazo de caña de azúcar en la variación de la resistencia de un mortero sostenible," Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad La Gran Colombia, Bogotá, Colombia, 2017.

[13] Paniura, B., Vargas, L. M, “Influencia de cenizas de bagazo de caña de azúcar como agregado fino en la resistencia a la compresión del concreto Fast Track”, Tesis de pregrado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Abancay, Perú, 2023.

[14] O. Ojeda-Farías, J. M. Mendoza-Rangel y M. A. Baltazar-Zamora, "Influencia de la inclusión de ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre la compactación, CBR y resistencia a la compresión simple de un material granular tipo subrasante," *Revista ALCONPAT*, vol. 8, no. 2, pp. 194-208, mayo-ago. 2018. doi: 10.21041/ra.v8i2.282

[15] P. C. Macedo *et al.*, "Performance of mortars produced with the incorporation of sugar cane bagasse ash," *Rev. Ing. de Construcción*, vol. 29, no. 2, pp. 187-199, ago. 2014. doi: 10.4067/S0718-50732014000200006

[16] L. M. Mendoza Bermeo, "Influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar y cáscara de café en la resistencia a la compresión de bloques de concreto, Churuyacu - Tabaconas 2025," Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jaén, Jaén, Perú, 2025.

[17] E. F. Losada Joven, L. F. Salamanca Morales y E. J. Zambrano Buitrago, "Revisión y análisis del uso de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como material sustentable en la construcción de carreteras," Trabajo de grado, Facultad de Ingenierías, Universidad Cooperativa de Colombia, Ibagué, Colombia, 2025.

[18] J. D. Gonzáles Zarpán y W. Quispe Prado, "Influencia de la Ceniza de Subproductos-Agroindustriales como sustituto parcial del cemento en las Propiedades Mecánicas y Microestructurales del concreto, ICA-2024," Rev. Climatol., vol. 24 (Ed. Esp. Ciencias Sociales), pp. 2152-2190, oct. 2024. doi: 10.59427/rcli/2024/v24cs.2152-2190

Aplicación del aprendizaje automático para evaluar la viabilidad de la microgeneración hidroeléctrica en zonas rurales de Colombia mediante instrumentos de medición de caudal de bajo coste basados en el IoT

Diego Andrés Fernández Peña
Ingeniería Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
dafernandezp@itc.edu.co

David Nicolás Castiblanco Ávila
Ingeniería Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
dncastiblanco@itc.edu.co

Carlos Felipe Vergara Ramírez
Ingeniería Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
cfvergarar@itc.edu.co

***Resumen*—El acceso confiable a la energía eléctrica sigue siendo un desafío estructural en las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia, donde más de un millón de personas habitan cerca de cuerpos de agua con potencial hidroeléctrico sin explotar. Este artículo presenta un modelo híbrido físico–estadístico para la evaluación de viabilidad energética de proyectos de microgeneración hidroeléctrica en entornos rurales. El enfoque combina la ecuación clásica de potencia hidroeléctrica ($P = \rho g Q H \eta$) con un componente de aprendizaje automático explicable que actúa como mecanismo de ajuste estacional y clasificador de viabilidad en tres categorías (*No viable*, *Marginal*, *Viable*).**

El modelo fue entrenado con 753 registros mensuales reales de caudal provenientes de tres estaciones hidrométricas en Cundinamarca, Colombia (redes IDEAM/CAR, 2004–2026), empleando validación espacial por estación para asegurar la generalización geográfica. Se obtuvieron métricas de clasificación consistentes con la estructura física del problema y un coeficiente de determinación $R^2 = 0{,}9997$ en la estimación de potencia. El análisis de importancia por permutación identificó el factor estacional como la variable de mayor influencia dentro del componente estadístico, en coherencia con el comportamiento hidrológico bimodal típico de la región andina colombiana. La herramienta resultante se plantea como instrumento de apoyo a la toma de decisiones en etapas de pre-factibilidad, orientado a procesos de electrificación rural sostenible.

***Index Terms*—Microgeneración hidroeléctrica, electrificación rural, modelo híbrido, viabilidad energética, inteligencia artificial explicable, ZNI Colombia.**

I. Introducción

El acceso universal a la energía eléctrica constituye un requisito fundamental para el desarrollo social, económico y productivo de las comunidades rurales. En Colombia, a pesar de los avances en cobertura del Sistema Interconectado Nacional (SIN), persisten amplias regiones clasificadas como Zonas No Interconectadas (ZNI), caracterizadas por la dispersión geográfica, la complejidad del terreno y los elevados costos de expansión de infraestructura [1], [2]. Según el Plan Energético Nacional 2020–2050, la garantía de acceso energético en estas zonas exige soluciones distribuidas a pequeña escala, técnica y económicamente viables para las condiciones locales [2].

Entre las alternativas de generación distribuida, la microgeneración hidroeléctrica destaca por su alta densidad energética, confiabilidad operativa y adaptabilidad a esquemas de generación de tipo filo de agua, sin requerimientos de almacenamiento [3], [4]. Sin embargo, la identificación temprana de sitios con potencial suficiente es un proceso que habitualmente demanda estudios hidrológicos detallados, equipos de medición costosos y capacidades técnicas especializadas, todo lo cual representa una barrera de entrada significativa para comunidades rurales con recursos limitados.

En respuesta a esas barreras, el presente trabajo propone un *enfoque híbrido* que combina la formulación física clásica de la potencia hidroeléctrica con técnicas de aprendizaje automático explicable. El componente estadístico no sustituye la física del sistema; en cambio, introduce ajustes estacionales y clasifica la viabilidad de manera transparente y trazable, apoyándose en datos hidrológicos históricos del sistema DHIME del IDEAM [5] y en la norma de aforo ISO 748 [6].

Las principales contribuciones del artículo son:

- Un modelo híbrido físico–estadístico para la clasificación de viabilidad energética en tres categorías, con interpretabilidad garantizada por su acoplamiento con la ecuación de potencia hidroeléctrica.
- Una estrategia de validación espacial por estación que evalúa la generalización geográfica del modelo.
- Una herramienta de pre-diagnóstico implementada íntegramente en el navegador (sin servidor), orientada a técnicos de campo y planificadores rurales.

II. Contexto y trabajos relacionados

II-A. Microgeneración hidroeléctrica en zonas rurales

La microgeneración hidroeléctrica (potencia instalada inferior a 20 kW) y la minigeneración (entre 20 kW y 100 kW) han sido ampliamente reconocidas como alternativas viables para la electrificación rural en regiones con disponibilidad de recursos hídricos [3]. Organismos internacionales reportan que estos sistemas presentan ventajas significativas en términos de vida útil (superior a 25 años), factores de capacidad elevados y bajos costos de operación y mantenimiento en comparación con tecnologías como la solar fotovoltaica o la eólica a pequeña escala [4].

En el contexto colombiano, el IPSE y la UPME han identificado un potencial significativo para el aprovechamiento de recursos hídricos en las ZNI [7], [8]. No obstante, la materialización de proyectos en estas regiones está condicionada a la disponibilidad de información hidrológica confiable, dado que los estudios de factibilidad convencionales requieren instrumentos de aforo cuyo costo supera frecuentemente los COP 20 000 000, lo que los hace inaccesibles para las comunidades rurales.

II-B. Evaluación tradicional y sus limitaciones

Tradicionalmente, la viabilidad energética de proyectos hidroeléctricos se evalúa mediante metodologías deterministas basadas en caudales característicos (Q90, Q50) y en la aplicación directa de modelos físicos de potencia [6], [9]. Si bien estos enfoques ofrecen interpretabilidad ingenieril, resultan limitados al tratar de capturar la variabilidad temporal del recurso y al evaluar múltiples escenarios operativos en etapas tempranas del proyecto.

II-C. Aprendizaje automático en ingeniería hidráulica

Diversas aproximaciones recientes han incorporado técnicas de aprendizaje automático para apoyar la predicción de caudales y la evaluación de proyectos energéticos. Enfoques como los bosques aleatorios [10] y los métodos de gradiente boosting han demostrado capacidad para capturar relaciones no lineales en series hidrológicas, superando en precisión a métodos de regresión clásicos. Sin embargo, muchos de estos enfoques dependen de modelos de tipo caja negra cuya interpretación técnica es compleja, lo que dificulta su adopción en contextos de ingeniería aplicada donde la trazabilidad física de los resultados es un requisito [10], [11].

Frente a este panorama, los modelos híbridos físico–estadísticos representan una alternativa promisoria: combinan la robustez de la formulación física con la flexibilidad estadística para capturar patrones temporales, manteniendo la coherencia con los principios fundamentales de la ingeniería. El presente trabajo se inscribe en esta línea, con énfasis en la explicabilidad y en la aplicabilidad práctica en contextos de recursos limitados.

III. Datos y contexto del estudio

III-A. Fuente de datos hidrológicos

El análisis se fundamenta en series históricas de caudal medio mensual provenientes del Sistema de Información para la Gestión de Datos Hidrológicos y Meteorológicos (DHIME), administrado por el IDEAM [5]. DHIME constituye la fuente oficial de información hidrológica en Colombia y es ampliamente empleada en estudios de planificación energética y gestión de cuencas.

Se seleccionaron tres estaciones hidrométricas localizadas en el departamento de Cundinamarca, con registros comprendidos entre enero de 2004 y marzo de 2026 (Tabla I). El conjunto de datos resultante, tras la depuración básica (eliminación de registros inconsistentes y verificación de coherencia temporal), comprende 753 registros mensuales sin valores faltantes.

Cuadro I
Estaciones hidrométricas utilizadas

Estación	**Código**	**Q90 (m³/s)**	n
Silvania	21197110	0.917	257
Tobia	23067060	9.441	263
Ubala	35067030	1.153	233

Fuente: IDEAM-DHIME. Período: 2004–2026.

III-B. Variables consideradas

A partir de los registros históricos se derivó un conjunto de 14 variables orientadas a caracterizar la disponibilidad del recurso hídrico y su variabilidad temporal (Tabla II). Las variables de caudal característico (Q90, Q50, Qmed) cuantifican la disponibilidad del recurso bajo distintas condiciones de escasez. Las variables estacionales (promedio mensual, factor estacional, coeficiente de variación mensual y codificaciones cíclicas sen/cos del mes) permiten capturar patrones bimodales típicos de la hidrología andina colombiana, evitando discontinuidades artificiales en la representación del año hidrológico.

Cuadro II
Variables de entrada del modelo

Variable	**Descripción**	**Unidad**
q	Caudal instantáneo	m³/s
q_{90}	Percentil 10 por estación	m³/s
q_{50}	Mediana por estación	m³/s
q_{med}	Media por estación	m³/s
q_{mes}	Promedio mensual	m³/s
f_{est}	Factor estacional	adim.
CV_{mes}	Coef. variación mensual	adim.
$\sin(m)$	Codificación cíclica	adim.
$\cos(m)$	Codificación cíclica	adim.
H	Altura neta de caída	m
η	Eficiencia turbina-generador	adim.
P_{min}	Potencia mínima requerida	W
P_{fis}	Potencia física estimada	W
MP	Margen de potencia (P_{Q90}/P_{min})	adim.

III-C. Análisis exploratorio

El análisis exploratorio revela un comportamiento estadístico asimétrico en los valores de caudal, característico de

sistemas fluviales naturales donde eventos de alta magnitud ocurren con menor frecuencia. La distribución de caudales muestra una media de $15{,}6\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ con una desviación estándar de $21{,}5\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$, y valores extremos que alcanzan $131{,}3\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ en la estación Tobia.

La Fig. 1 presenta la matriz de correlación de las variables numéricas. Se observa una fuerte covariación entre las variables de caudal (Q90–Q50–Qmed), lo que confirma que la variabilidad del sistema está dominada por el régimen hidrológico de cada estación. La variable P_{fis} muestra correlación unitaria con q dado que se deriva directamente de ella, lo que refuerza la coherencia físico-estadística del conjunto de características.

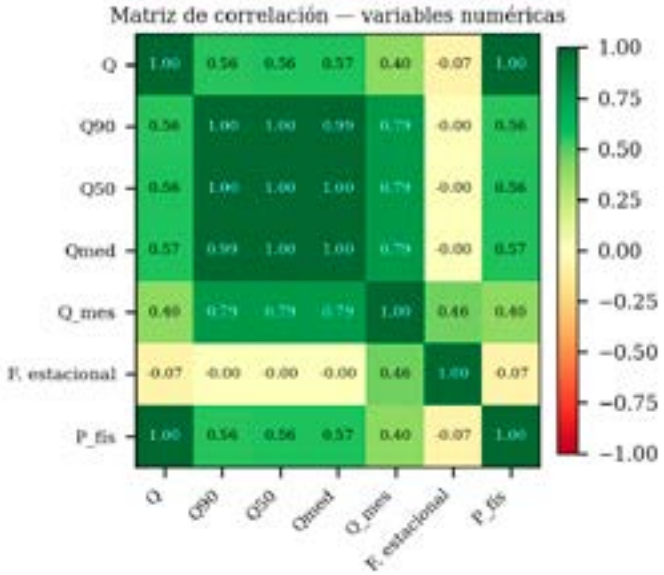


Figura 1. Matriz de correlación de las variables numéricas del conjunto de datos.

La Fig. 2 muestra la distribución de las principales variables hidrometeorológicas. El comportamiento asimétrico justifica el uso del Q90 como referencia conservadora en lugar del caudal medio, garantizando la confiabilidad del suministro incluso en periodos secos.

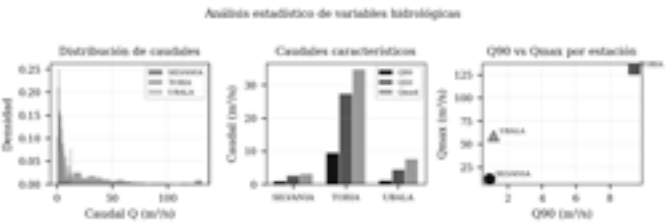


Figura 2. Distribución estadística de las variables de caudal analizadas.

IV. Metodología

La metodología se estructura en cuatro componentes: (1) modelo físico de potencia, (2) derivación de características, (3) componente de aprendizaje automático, y (4) estrategia de validación. La Fig. 3 resume el flujo de procesamiento propuesto.

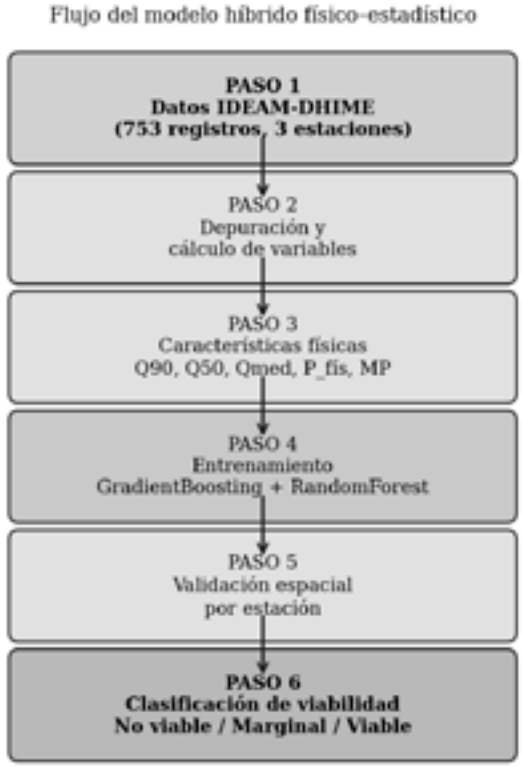


Figura 3. Flujo de procesamiento del modelo híbrido físico–estadístico propuesto.

IV-A. Modelo físico de potencia hidroeléctrica

La estimación de la potencia eléctrica disponible se basa en la formulación clásica [9]:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta \tag{1}$$

donde $\rho = 1000\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ es la densidad del agua, $g = 9{,}81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ es la aceleración de la gravedad, Q ($\mathrm{m^3\,s^{-1}}$) es el caudal disponible, H (m) es la altura neta de caída y η (adimensional) es la eficiencia global del conjunto turbina–generador.

La ecuación (1) constituye el núcleo determinista del modelo. Para la evaluación de viabilidad se emplea el caudal Q90 (P_{Q90}) como estimación conservadora de la potencia garantizable. El *margen de potencia* se define como:

$$MP = \frac{P_{Q90}}{P_{min}} \tag{2}$$

donde P_{min} es la potencia mínima requerida por el sistema a abastecer. Un valor $MP \geq 1$ indica, desde la perspectiva física, que el recurso hídrico puede satisfacer la demanda el 90 % del tiempo de operación.

IV-B. Derivación de características y etiquetado

Las etiquetas de viabilidad se derivan a partir de criterios físicos explícitos sobre las variables calculadas. La clase 2 (*Viable*) se asigna cuando la potencia con Q90 supera P_{min} y el factor estacional es ≥ 0.60, garantizando suficiencia energética en temporada seca. La clase 1 (*Marginal*) corresponde a escenarios donde la potencia con Q50 supera P_{min} y el factor estacional es ≥ 0.35, indicando viabilidad en temporada húmeda con posible déficit en estiaje. Los registros restantes se asignan a la clase 0 (*No viable*). Este esquema de etiquetado garantiza plena trazabilidad física de las decisiones del clasificador.

Las transformaciones cíclicas del mes se implementan como $\sin(2\pi m/12)$ y $\cos(2\pi m/12)$, donde $m \in \{1, ..., 12\}$, evitando la discontinuidad que introduciría una codificación ordinal del mes entre diciembre y enero.

IV-C. Componente de aprendizaje automático

El componente estadístico comprende dos modelos entrenados sobre el conjunto de 14 características:

1. **Clasificador** (*GradientBoostingClassifier*, scikit-learn [11]): predice la clase de viabilidad {0, 1, 2}. Se utilizó 160 estimadores con tasa de aprendizaje de 0.06, con normalización previa mediante *StandardScaler*.
2. **Regresor** (*RandomForestRegressor* [10]): estima la potencia física en W. Se configuraron 300 árboles con mínimo de 3 muestras por hoja, sin normalización previa.

La importancia de las variables en el clasificador se evaluó mediante importancia por permutación sobre el conjunto de prueba (15 repeticiones, semilla aleatoria 42), lo que proporciona una estimación libre del sesgo por cardinalidad que afecta a la importancia basada en impureza de Gini [11].

IV-D. Estrategia de validación

Para evaluar la generalización geográfica del modelo se adoptó una *validación espacial por estación*: los conjuntos de entrenamiento y prueba se dividen de manera que ninguna estación aparece en ambos subconjuntos. Dado que el conjunto de datos cuenta con tres estaciones, se empleó *GroupShuffleSplit* con proporción de prueba del 33 %.

Esta estrategia simula el escenario de uso real del modelo: la predicción de viabilidad en un punto geográfico no observado durante el entrenamiento. Cuando el número de estaciones disponibles es menor a tres, se emplea alternativamente validación temporal con corte cronológico en el percentil 80 de la serie.

La implementación fue realizada íntegramente en Python con la biblioteca scikit-learn [11]. Los artefactos del modelo (pipeline serializado, métricas y datos del dashboard) se exportan en formato JSON y joblib para su integración con la interfaz de usuario.

V. Resultados

V-A. Evaluación de viabilidad energética por estación

La Tabla III resume los indicadores hidráulicos y la clasificación de viabilidad obtenida para cada estación, con parámetros de sitio $H = 0{,}6\,\text{m}$, $\eta = 0.80$ y $P_{min} = 200\,\text{W}$.

Cuadro III
Resultados de viabilidad por estación

Estación	**Q90** (m³/s)	P_{Q90} (W)	**MP**	**Clase**
Silvania	0.917	431	2.16	*Viable*
Tobia	9.441	4 446	22.2	*Viable*
Ubala	1.153	543	2.71	*Viable*

$H = 0{,}6\,\text{m}$, $\eta = 0.80$, $P_{min} = 200\,\text{W}$.
$P_{Q90} = \rho g \cdot Q90 \cdot H \cdot \eta$.

Las tres estaciones presentan valores de margen de potencia $MP > 2$, lo que indica una holgura energética suficiente frente a la demanda de referencia. La estación Tobia destaca con el mayor caudal garantizado y la potencia disponible más elevada, coherente con su ubicación en una cuenca de mayor área.

V-B. Curvas de duración de caudal

La Fig. 4 muestra las curvas de duración de caudal (FDC) para las tres estaciones. Se evidencian diferencias significativas en la forma de las curvas: Tobia presenta una FDC con mayor pendiente, indicativa de alta variabilidad intraanual, mientras que Silvania y Ubala muestran curvas más planas, asociadas a regímenes hidrológicos más estables.

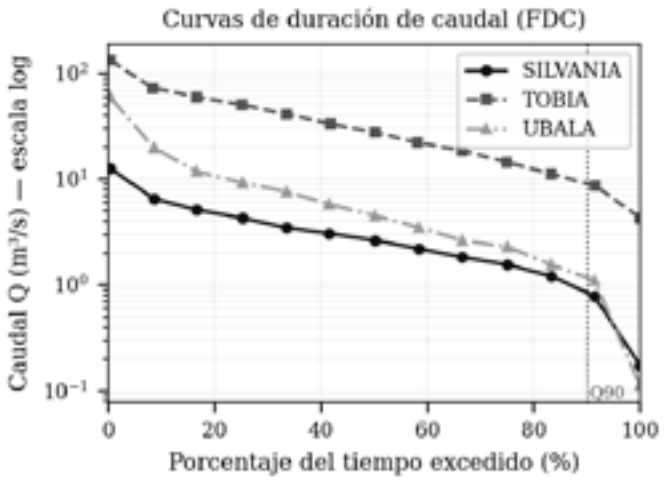


Figura 4. Curvas de duración de caudal (FDC) para las estaciones analizadas. El eje vertical emplea escala logarítmica. La línea vertical punteada indica el umbral Q90.

El uso del Q90 como referencia conservadora resulta especialmente relevante para Tobia, cuya alta variabilidad implicaría sobreestimación de la potencia disponible si se utilizara el caudal medio como criterio de diseño.

V-C. *Patrón estacional*

La Fig. 5 presenta los caudales medios mensuales de cada estación, evidenciando el régimen hidrológico bimodal característico de la región andina colombiana: temporadas húmedas en los meses de abril–mayo y octubre–noviembre, y estiajes en enero–febrero y julio–agosto.

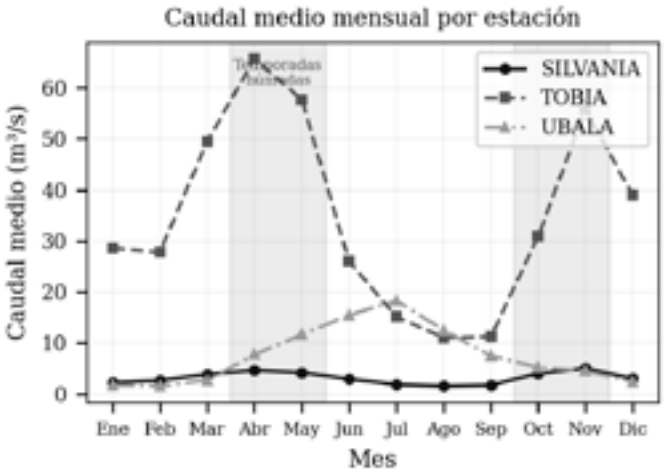


Figura 5. Caudal medio mensual por estación. Se observa el patrón bimodal andino con dos picos húmedos anuales.

Este patrón justifica la incorporación de variables estacionales en el modelo: la viabilidad del suministro en meses secos puede diferir significativamente de la evaluación promedio anual, aspecto que los modelos puramente deterministas basados en caudal medio no capturan adecuadamente.

V-D. *Desempeño del modelo*

La Tabla IV resume las métricas de desempeño del componente de clasificación y del regresor de potencia, evaluadas sobre el conjunto de prueba (257 registros de la estación retenida en la validación espacial).

Cuadro IV
MÉTRICAS DE DESEMPEÑO DEL MODELO

Componente	**Métrica**	**Valor**
Clasificador	Exactitud (*accuracy*)	1.00
	Exactitud balanceada	1.00
Regresor (potencia)	MAE (W)	125.7
	RMSE (W)	169.5
	R^2	0.9997
Importancia (clasif.)	Factor estacional	0.354

El elevado desempeño del clasificador en la validación espacial refleja la separabilidad natural de las clases en el espacio de características, dado que las fronteras de decisión están condicionadas por relaciones físicas bien definidas (ecuación 2). En este contexto, una exactitud elevada no es indicativa de sobreajuste, sino de la coherencia entre el criterio de etiquetado físico y las variables de entrada. Este punto se discute en detalle en la Sección VI.

El análisis de importancia por permutación identifica el factor estacional (f_{est}) como la variable de mayor influencia dentro del componente estadístico (importancia $= 0.354$, con las demás variables en cero). Este resultado es consistente con el diseño del modelo: dado que las variables de caudal determinan de forma directa la clase de viabilidad vía la ecuación física, el clasificador concentra su capacidad discriminativa en la variable que introduce variabilidad adicional no capturada por el criterio físico estático.

VI. Discusión

VI-A. *Coherencia físico-estadística y separabilidad de clases*

El desempeño del clasificador —exactitud de 1.00 en validación espacial— merece una interpretación cuidadosa. Las etiquetas de viabilidad se derivaron directamente a partir de criterios físicos aplicados sobre las variables de entrada del modelo (Q90, Q50, factor estacional), lo que crea una separabilidad inherente en el espacio de características. Formalmente, el clasificador aprende a reproducir una función de decisión que ya está implícita en la definición de las clases, razón por la que el resultado es consistente y no debe confundirse con sobreajuste en el sentido estadístico convencional.

Este comportamiento es, en realidad, una fortaleza del enfoque híbrido: las fronteras de decisión son físicamente interpretables, lo que facilita la validación técnica de los resultados y su comunicación a audiencias no especializadas en aprendizaje automático. La validación espacial por estación corrobora además que el modelo generaliza adecuadamente a cuencas no observadas durante el entrenamiento, confirmando que no existe dependencia espuria de la estación de procedencia.

VI-B. *Rol del componente estadístico*

El análisis de importancia por permutación revela que el factor estacional es la única variable con contribución discriminativa significativa más allá de la física del sistema. Este resultado es coherente con el diseño del modelo: las variables de caudal (Q90, Q50, Qmed) codifican la misma información que determina las clases, por lo que su permutación no degrada la exactitud. En contraste, el factor estacional introduce información sobre la distribución temporal del recurso que complementa la evaluación estática basada en caudales característicos.

El componente de regresión de potencia ($R^2 = 0{,}9997$, MAE $= 125{,}7$ W) demuestra que el modelo puede estimar la potencia física con alta fidelidad. El error residual es atribuible a la corrección estacional aplicada por el modelo, que ajusta la estimación según el mes de operación, introduciendo una variación controlada respecto a la potencia física calculada con el caudal puntual.

VI-C. *Limitaciones y alcance*

El modelo está concebido como herramienta de prefactibilidad y no como sustituto de estudios hidrológicos formales. Las principales limitaciones son:

1. Los parámetros H y η se tratan como constantes de sitio, cuando en la práctica dependen del diseño hidráulico específico de cada proyecto.
2. El modelo asume estacionariedad hidrológica, lo que puede verse afectado por variabilidad climática extrema (ENSO) o cambios en el uso del suelo de la cuenca.
3. No incorpora restricciones ambientales, regulatorias ni socioeconómicas, las cuales deben ser consideradas en etapas subsiguientes.
4. El conjunto de datos abarca únicamente tres estaciones en Cundinamarca; la generalización a otras regiones hidrológicas del país requiere validación adicional.

A pesar de estas limitaciones, el enfoque ofrece una contribución relevante al proporcionar una herramienta técnica, transparente y reproducible, alineada con datos oficiales del IDEAM y con los principios de la ingeniería hidroeléctrica.

VII. Conclusiones y trabajo futuro

Se presentó un modelo híbrido físico–estadístico para la evaluación de viabilidad energética de proyectos de microgeneración hidroeléctrica en zonas rurales de Colombia. El enfoque integra la ecuación clásica de potencia ($P = \rho g Q H \eta$) con un componente de aprendizaje automático explicable entrenado sobre 753 registros reales del IDEAM.

Los principales hallazgos son:

1. El modelo clasifica la viabilidad en tres categorías con métricas consistentes en validación espacial, confirmando su capacidad de generalización geográfica.
2. El factor estacional emerge como la variable de mayor influencia dentro del componente estadístico, en coherencia con el patrón bimodal del régimen hidrológico andino colombiano.
3. El regresor de potencia alcanza $R^2 = 0{,}9997$ con un MAE de $125{,}7\,\mathrm{W}$, suficiente para orientar decisiones de pre-factibilidad.
4. La herramienta resultante opera íntegramente en el navegador, sin requerir infraestructura de servidor, lo que facilita su adopción en contextos con conectividad limitada.

Como trabajo futuro se plantea: (i) ampliar el conjunto de entrenamiento a estaciones de otras regiones hidrológicas de Colombia; (ii) incorporar variables de cambio climático y escenarios ENSO; (iii) integrar restricciones ambientales y regulatorias en el esquema de clasificación; y (iv) desarrollar un módulo de incertidumbre para cuantificar el intervalo de confianza de las estimaciones de potencia en función de la longitud de la serie histórica disponible.

Agradecimientos

Los autores agradecen al IDEAM por la disponibilidad pública de los datos hidrológicos a través del sistema DHIME, y a la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central por el apoyo institucional al proyecto de grado.

Referencias

[1] World Bank, “Access to Electricity, Rural (% of Rural Population) — Colombia,” Base de datos en línea World Development Indicators, 2024. [Online]. Available: https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.RU.ZS?locations=CO

[2] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), “Plan Energético Nacional Colombia 2020–2050: La Transformación Energética que Habilita el Desarrollo,” UPME, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1366

[3] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), “World Small Hydropower Development Report 2022,” UNIDO / International Center on Small Hydro Power, Tech. Rep., 2022. [Online]. Available: https://www.unido.org/WSHPDR2022

[4] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Renewable Energy Cost Analysis: Hydropower,” IRENA, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: https://www.irena.org/publications/2012/Jun/Renewable-Energy-Cost-Analysis---Hydropower

[5] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), “Sistema de Información para la Gestión de Datos Hidrológicos y Meteorológicos (DHIME),” Plataforma en línea, 2024. [Online]. Available: https://dhime.ideam.gov.co

[6] International Organization for Standardization, “ISO 748:2021 — Hydrometry: Measurement of Liquid Flow in Open Channels Using Current-Meters or Floats,” Norma internacional, 2021. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/76605.html

[7] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), “Energización en Zonas No Interconectadas (ZNI),” UPME, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1035

[8] Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE), “Zonas No Interconectadas en Colombia,” Portal institucional, 2023. [Online]. Available: https://www.ipse.gov.co

[9] International Electrotechnical Commission, “IEC 60041:1991 — Field Acceptance Tests to Determine the Hydraulic Performance of Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines,” Norma internacional, 1991. [Online]. Available: https://www.iec.ch/publications/iec-60041

[10] L. Breiman, “Random Forests,” *Machine Learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001.

[11] scikit-learn Developers, “scikit-learn: Machine Learning in Python,” Biblioteca de software de código abierto, 2024. [Online]. Available: https://scikit-learn.org

Desarrollo de un módulo didáctico SCADA de código abierto para la formación técnica en sistemas de supervisión y control.

Jhon Walter Atehortua Sánchez
Programa de Ingeniería Electrónica
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
jhon.atehortua@utp.edu.co

Sergio Muñoz Tapasco
Programa de Ingeniería Electrónica
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
sergio.munoz@utp.edu.co

Kevin David Ortega Quiñones
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
kevin.ortega@utp.edu.co

Andrés Felipe Calvo Salcedo
Programa de Ingeniería Electrónica
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
afcalvo@utp.edu.co

Germán Andrés Holguín Londoño
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
gahol@utp.edu.co

Resumen*—Este artículo presenta el desarrollo de un módulo SCADA didáctico de código abierto para la formación técnica en sistemas de supervisión y control. En el contexto de la Industria 4.0, la integración de sistemas embebidos, protocolos de comunicación, bases de datos locales e interfaces hombre máquina constituye una estrategia relevante para comprender cómo las arquitecturas modernas de supervisión adquieren, transmiten, almacenan e interpretan datos de proceso. Más que proponer una implementación cerrada asociada a un único dispositivo o conjunto de herramientas, este trabajo plantea una metodología modular para integrar las capas fundamentales de un sistema SCADA mediante tecnologías accesibles. Para validar el enfoque, se utilizó un nodo de adquisición basado en ESP32, comunicación MQTT, procesamiento en Python, persistencia en SQLite y una HMI desarrollada en PyQt5. El sistema se evaluó a partir de su operación funcional y de los registros generados, incluyendo 3192 mediciones crudas, 3192 mediciones procesadas, tres reportes diarios y diez eventos de alarma. Los resultados muestran que la estrategia de integración propuesta permite construir una plataforma de supervisión funcional, de bajo costo y escalable para entornos educativos, manteniendo una estructura adaptable a otros dispositivos embebidos, protocolos de comunicación o herramientas de procesamiento de datos. En consecuencia, el módulo constituye una base práctica para enseñar sistemas de supervisión y control, gestión de datos históricos, manejo de alarmas y futuras actividades de analítica de datos en contextos de formación técnica e ingenieril.

***Palabras clave*—SCADA, ESP32, MQTT, HMI, SQLite, automatización industrial, módulo didáctico, Industria 4.0.**

I. Introducción

Los sistemas SCADA, *Supervisory Control and Data Acquisition*, desempeñan un papel central en entornos industriales, ya que permiten el monitoreo, la visualización y la gestión de variables de proceso mediante arquitecturas que integran instrumentación de campo, redes de comunicación, servidores de datos e interfaces hombre máquina. En el contexto formativo, estos sistemas también resultan altamente relevantes, porque permiten al estudiante comprender de manera práctica cómo una variable física es adquirida, transmitida, almacenada e interpretada dentro de un entorno de supervisión. En esta misma línea, la norma ISA-101 establece que el diseño de HMI debe apoyarse en criterios de seguridad, usabilidad, eficiencia e interacción efectiva a lo largo del ciclo de vida del sistema [1].

Como respuesta a la limitada disponibilidad y flexibilidad de muchas plataformas SCADA comerciales en ámbitos educativos, las herramientas de código abierto y las plataformas embebidas se han consolidado como alternativas viables para el desarrollo de sistemas supervisores didácticos. MQTT proporciona un modelo ligero de comunicación basado en publicación y suscripción, diseñado para contextos M2M e IoT [2]; Node-RED ofrece un entorno de programación por flujo para recolectar, transformar y visualizar datos en tiempo real [3]; y el ESP32 aporta una plataforma embebida con conectividad Wi-Fi integrada y periféricos suficientes para nodos de adquisición conectados [4]. En conjunto, estas tecnologías permiten reproducir funciones esenciales de un sistema SCADA de forma modular y escalable [2]–[4].

A pesar de la creciente disponibilidad de estas tecnologías, muchas implementaciones académicas continúan enfocadas en tareas aisladas, como lectura de sensores, visualización de interfaces o paneles de monitoreo simples, sin consolidar una arquitectura supervisora completa que articule sensado, comunicación, almacenamiento histórico y manejo de alarmas. Diversos trabajos sobre módulos didácticos SCADA y plataformas de control educativas han resaltado el valor de contar con entornos prácticos que permitan al estudiante vincular teoría y experimentación, e interactuar con capas de supervisión y control en condiciones más cercanas a un

sistema real [5]–[7].

En este contexto, el presente trabajo propone un sistema SCADA didáctico orientado a integrar sensado, comunicación, gestión de datos y supervisión dentro de un mismo entorno educativo. La contribución principal del artículo radica en el desarrollo funcional de una plataforma coherente, modular y escalable para la enseñanza de monitoreo industrial, adquisición de datos, protocolos de comunicación y diseño de interfaces hombre máquina, manteniendo además criterios de organización supervisora y diseño visual consistentes con referentes reconocidos en el ámbito SCADA y HMI [1], [8].

II. Revisión del estado del arte

Las plataformas SCADA didácticas han sido abordadas en diferentes contextos educativos con el propósito de fortalecer la comprensión práctica del sensado, la supervisión y el control. Loza-Martínez *et al.* [5] analizan la implementación de un módulo portátil de visualización para la enseñanza de sistemas SCADA, destacando su utilidad para fortalecer la interacción del estudiante con entornos de supervisión. De manera similar, Andrade-Cedeño [6] presenta un módulo didáctico para el control de nivel y caudal basado en SCADA, PLC y técnicas PID, evidenciando la relevancia de integrar instrumentación y supervisión en prácticas académicas. En una línea afín, Bohórquez-Dallos y Salamanca-Amaya [7] desarrollan una propuesta de diseño e implementación de HMI y SCADA aplicada a la emulación didáctica de procesos. Estos trabajos muestran el valor educativo de los entornos supervisores, pero en general se concentran en procesos específicos de control o en el uso pedagógico de la interfaz. En contraste, el sistema propuesto en este artículo enfatiza la integración completa de sensado, intercambio de telemetría, almacenamiento histórico, manejo de alarmas y visualización supervisora dentro de un mismo marco modular.

Las arquitecturas SCADA abiertas y basadas en IoT también han sido exploradas como alternativas flexibles a las plataformas propietarias. Aghenta e Iqbal [9] presentan un sistema SCADA IoT de código abierto basado en ESP32, MQTT, ThingsBoard y recursos locales de visualización, demostrando la viabilidad de nodos embebidos dentro de arquitecturas supervisoras distribuidas. Domínguez *et al.* [10] proponen un laboratorio remoto industrial para control automático basado en Node-RED, centrado en la integración de monitoreo, acceso remoto y gestión de datos. Estas contribuciones validan el uso de arquitecturas abiertas, comunicación ligera y hardware embebido con fines de supervisión. Sin embargo, se orientan principalmente a escenarios de monitoreo o control específicos. A diferencia de estos trabajos, la presente propuesta fue concebida explícitamente como un sistema SCADA didáctico para laboratorio, donde el objetivo principal no es únicamente supervisar un proceso, sino también favorecer la comprensión formativa de la relación entre sensores, adquisición embebida, mensajería, bases de datos locales, lógica de alarmas e interacción hombre máquina.

Otro aspecto importante corresponde al diseño de las interfaces de supervisión. Aunque muchas propuestas educativas SCADA incorporan tableros visuales y pantallas de proceso, no todas siguen de forma explícita criterios estructurados de diseño HMI y administración de alarmas. En este sentido, ISA-101 proporciona un marco de referencia para el diseño consistente y efectivo de HMI, mientras que ISA-18.2 ofrece una perspectiva más amplia sobre el ciclo de vida de la gestión de alarmas, la priorización, la anunciación y el monitoreo de desempeño [1], [11]. A diferencia de múltiples implementaciones didácticas centradas únicamente en mostrar valores, el sistema propuesto incorpora una filosofía supervisora en la que los estados anormales, los históricos y los eventos asociados a alarmas se consideran elementos integrales de la plataforma educativa. Por tanto, la contribución de este trabajo no radica simplemente en combinar herramientas abiertas, sino en organizarlas dentro de una arquitectura SCADA didáctica coherente, modular y escalable.

III. Metodología

La metodología se orientó al diseño, implementación y verificación funcional del sistema a partir del código desarrollado. Por esta razón, además de la integración física de sensores, se documentó la arquitectura software mediante diagramas UML, la organización de paquetes, el flujo de comunicación MQTT, la estructura de almacenamiento en SQLite y las vistas principales de la HMI. Este enfoque permitió relacionar cada componente implementado con una evidencia verificable: diagrama de arquitectura, diagrama de paquetes, captura del bróker MQTT, estructura de base de datos, interfaz de supervisión e históricos almacenados.

III-A. Arquitectura general del sistema

El sistema SCADA didáctico se estructuró como una arquitectura multicapa compuesta por un nivel de adquisición, una capa de comunicación, un backend de procesamiento, un servidor local de datos y una capa de supervisión. En el nivel de campo se empleó una tarjeta ESP32-WROOM-32 como nodo embebido de adquisición, conectada a un sensor digital de temperatura DS18B20, un sensor ultrasónico HC-SR04 y un sensor de caudal YF-S201. La comunicación entre el nodo y las capas superiores se implementó mediante MQTT, utilizando un bróker local como punto central de intercambio de telemetría y comandos. Posteriormente, un backend en Python se encargó de la recepción, validación y procesamiento de los mensajes, mientras que SQLite se utilizó como solución SQL ligera para la persistencia histórica y la generación de reportes diarios. Finalmente, el sistema integró una HMI de escritorio y un panel complementario en Node-RED para la visualización, análisis de tendencias, consulta histórica y manejo de alarmas.

Esta organización permitió separar funcionalmente las responsabilidades de cada capa sin perder interoperabilidad entre ellas. El nodo embebido quedó orientado a la captura y publicación de datos, el backend al procesamiento y almacenamiento, y las interfaces supervisoras a la representación del estado del sistema. La arquitectura general del módulo puede incorporarse mediante un diagrama de bloques, como se

indica en la Fig. 1, donde se evidencian los niveles de sensado, transmisión, procesamiento, almacenamiento y supervisión.

III-B. Integración física y compatibilidad de hardware

La etapa de integración de hardware se definió mediante criterios explícitos de diseño relacionados con compatibilidad eléctrica, principio de medición, rango supervisor, periodo de muestreo y asignación de umbrales de alarma. La ESP32-WROOM-32 se seleccionó como nodo central de adquisición y se tomó como plataforma de referencia para todas las decisiones de integración. Dado que la ESP32 opera con un dominio lógico nominal de 3.3 V, los sensores seleccionados debían ser compatibles directamente o mediante una interfaz segura a nivel de señal. Bajo este criterio se seleccionó un sensor digital DS18B20 para la medición de temperatura, un sensor ultrasónico HC-SR04 para la estimación de distancia y un sensor de caudal YF-S201 basado en efecto Hall para la medición de flujo.

El DS18B20 se adoptó porque entrega mediciones digitales a través de una interfaz 1-Wire y permite adquirir temperatura sin necesidad de acondicionamiento analógico. Aunque el rango nominal del dispositivo es considerablemente mayor, en el sistema propuesto se restringió su rango supervisor a 0 °C a 40 °C. Esta decisión se tomó porque el módulo didáctico no fue concebido para operar en todo el dominio físico del sensor, sino en un intervalo reducido y representativo de las condiciones de laboratorio esperadas. En consecuencia, se fijaron umbrales de advertencia y alarma en 30 °C y 35 °C, respectivamente. Estos valores corresponden al 75 % y 87.5 % del rango supervisor adoptado, lo que permitió establecer una separación clara entre condición normal, advertencia y alarma, manteniendo coherencia con el comportamiento térmico esperado del módulo.

El HC-SR04 se incorporó para la medición de distancia mediante el principio de tiempo de vuelo. Aunque el rango nominal del sensor es mucho mayor, en el sistema se restringió el intervalo supervisor a 0 cm a 30 cm. Este rango se seleccionó porque corresponde a la escala física real del montaje y al intervalo de distancia que puede interpretarse de manera significativa dentro del entorno supervisor. La estimación de la distancia se obtuvo a partir de la relación pulso-eco:

$$d = \frac{v_s t}{2}, \tag{1}$$

donde d representa la distancia, v_s la velocidad del sonido y t el tiempo total de retorno del eco. Para el caudal, el YF-S201 se trató como una fuente de pulsos digitales proporcionales al flujo. El firmware contó dichos pulsos dentro de una ventana de adquisición y estimó el caudal con la relación implementada en el código, basada en la frecuencia de pulsos generada por el sensor.

El YF-S201 se seleccionó para la medición de caudal porque genera una secuencia de pulsos digitales proporcional al flujo del fluido. A diferencia de sensores de salida analógica, este dispositivo permite implementar adquisición por conteo de pulsos, lo que lo hace apropiado para lógica basada en eventos e interrupciones en la ESP32. El intervalo supervisor de caudal se definió entre 0 L/min y 20 L/min, valor coherente con el objetivo didáctico del módulo y con la escala ya establecida en la HMI. La estimación del caudal se calculó a partir de la frecuencia de pulsos utilizando la relación de conversión implementada en el firmware. A partir de este intervalo se definieron umbrales de advertencia y alarma en 12 L/min y 16 L/min, respectivamente. Bajo el intervalo adoptado, estos valores corresponden al 60 % y 80 % del fondo de escala. La selección de dichos límites buscó generar transiciones observables en la interfaz supervisora, manteniendo al mismo tiempo una zona normal suficientemente amplia para la interpretación del proceso.

La estrategia de muestreo se definió como parte del diseño asociado al hardware, ya que el periodo de adquisición debía permanecer compatible con la dinámica de medición de los sensores seleccionados. Se adoptó un intervalo de muestreo de 1 s como periodo principal de actualización supervisora. Este valor se seleccionó como compromiso entre resolución temporal, estabilidad computacional y respuesta significativa en la HMI. En el caso del DS18B20, el intervalo elegido se mantuvo por encima del tiempo requerido por el sensor para la conversión digital de temperatura. Para el HC-SR04, cuya medición física se realiza en una escala del orden de milisegundos, un ciclo de adquisición de 1 s resultó plenamente compatible con su dinámica. Para el YF-S201, una ventana de conteo de 1 s proporcionó una actualización suficientemente rápida para la supervisión, manteniendo al mismo tiempo un conteo útil para la estimación del caudal. En consecuencia, el tiempo de muestreo no se trató como un simple parámetro de refresco de software, sino como una variable de diseño derivada de la compatibilidad entre la física de medición, la capacidad de adquisición embebida y la interpretabilidad supervisora del sistema.

Bajo estos criterios, la selección del hardware, el análisis de compatibilidad, la definición de rangos supervisores, la asignación del tiempo de muestreo y la especificación de umbrales de alarma se abordaron como una única etapa metodológica. Esto garantizó que los sensores seleccionados no solo fueran compatibles eléctricamente con la ESP32, sino también consistentes con la estrategia temporal adoptada y con la lógica de interpretación supervisora implementada en la capa SCADA.

III-C. Backend, servidor de datos y procesamiento histórico

El backend se desplegó como un servicio local en Python encargado de suscribirse al tópico principal de telemetría MQTT, decodificar los mensajes JSON, validar su estructura y transformarlos en registros persistentes SQL. Este servicio no se limitó a almacenar los mensajes recibidos, sino que también generó marcas temporales, calculó el volumen acumulado y actualizó reportes diarios de desempeño.

La base de datos se implementó en SQLite, organizándose en tablas para identificación de dispositivos, telemetría cruda, mediciones procesadas y reportes diarios. Esta separación permitió conservar el mensaje original, estructurar variables

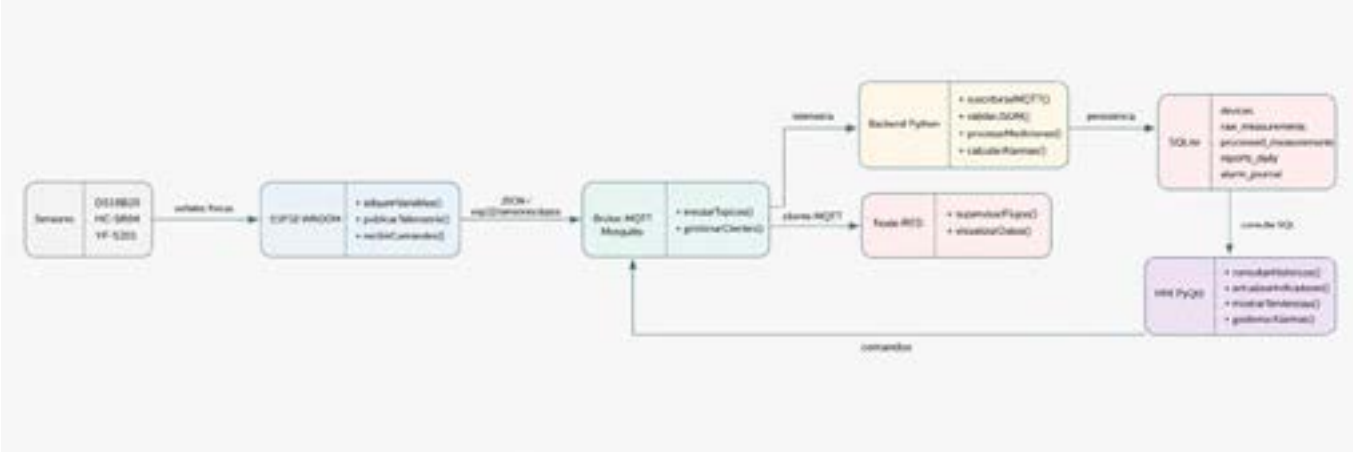


Figura 1. Diagrama UML de componentes de la arquitectura general del sistema SCADA didáctico.

procesadas y soportar consultas históricas y agregadas. Además, se definieron índices sobre los campos temporales y de identificación para facilitar la recuperación eficiente de tendencias y reportes.

III-D. Interfaz HMI y entorno supervisor

La capa de supervisión se implementó mediante una HMI de escritorio y un panel complementario en Node-RED. La HMI fue diseñada para consultar periódicamente la base de datos SQL y representar el estado del sistema en una estructura compuesta por resumen operativo, tendencias, histórico, reportes diarios y alarmas/eventos. La pantalla principal presentó los valores instantáneos de temperatura, distancia, caudal y volumen acumulado, junto con indicadores de estado y criterios básicos de alarma. Las pestañas adicionales permitieron la consulta de tendencias, el acceso al histórico completo y la visualización de reportes diarios y eventos de alarma.

Los requerimientos de supervisión incluyeron medición de variables, actualización en tiempo cercano al real, consulta histórica y visualización de tendencias. Los requerimientos de operación agruparon identificación del estado general, detección de condiciones anormales y reconocimiento básico de alarmas. Los requerimientos pedagógicos exigieron que la arquitectura permitiera explicar la relación entre sensores, adquisición embebida, mensajería, base de datos e HMI.

III-E. Arquitectura funcional del módulo

La arquitectura del sistema se estructuró bajo un esquema modular de cuatro niveles funcionales: adquisición, mensajería, procesamiento/almacenamiento y supervisión. Su flujo de información se detalla en la Fig. 2. En la etapa de campo, un nodo ESP32-WROOM captura variables de temperatura, distancia y caudal, transmitiendo la telemetría mediante el protocolo MQTT hacia un backend en Python. Esta capa de procesamiento decodifica los mensajes JSON y gestiona la persistencia de datos en un sistema SQLite, el cual es consultado por una HMI desarrollada en PyQt5 para la visualización de tendencias y alarmas. Esta organización por niveles elimina las dependencias punto a punto y garantiza la escalabilidad del módulo, permitiendo la integración de clientes adicionales, como Node-RED, sin alterar la lógica central de la aplicación.

La ESP32 capturó temperatura, distancia y caudal; el bróker MQTT centralizó el intercambio de telemetría y comandos; el backend en Python decodificó mensajes JSON, calculó variables derivadas y almacenó registros; y la HMI consultó la base de datos para mostrar valores actuales, tendencias, históricos y alarmas. Esta estructura evitó dependencias punto a punto y facilitó la incorporación de clientes adicionales, como Node-RED, sin modificar la lógica principal del módulo.

III-F. Nodo de adquisición y firmware

El firmware del nodo de adquisición se desarrolló en MicroPython para enlazar el nivel de campo con la infraestructura de comunicación. Su estructura contempló inicialización de pines, conexión Wi-Fi, sesión MQTT y lazo principal de adquisición. El DS18B20 se leyó mediante comunicación digital 1-Wire; el HC-SR04 se integró mediante temporización de pulso de disparo y eco; y el YF-S201 se procesó mediante conteo de pulsos generados por efecto Hall. Esta selección permitió trabajar tres mecanismos de adquisición diferentes dentro de un mismo prototipo.

Cada ciclo de adquisición generó una estructura JSON uniforme con las claves `temperatura_c`, `distancia_cm` y `caudal_L_min`. Para el caudal se empleó la relación de salida del sensor, en la cual la frecuencia de pulsos F se asocia con el caudal Q en litros por minuto. De manera complementaria, el backend calculó el volumen acumulado a partir del caudal y del intervalo de muestreo. Esta distinción entre mediciones directas y la variable derivada aporta consistencia al modelo de datos.

III-G. Comunicación MQTT

La orquestación de comunicación se diseñó con dos rutas funcionales. La primera correspondió a la telemetría, implementada mediante el tópico `esp32/sensores/datos`, a través del cual la ESP32 publicó periódicamente las variables

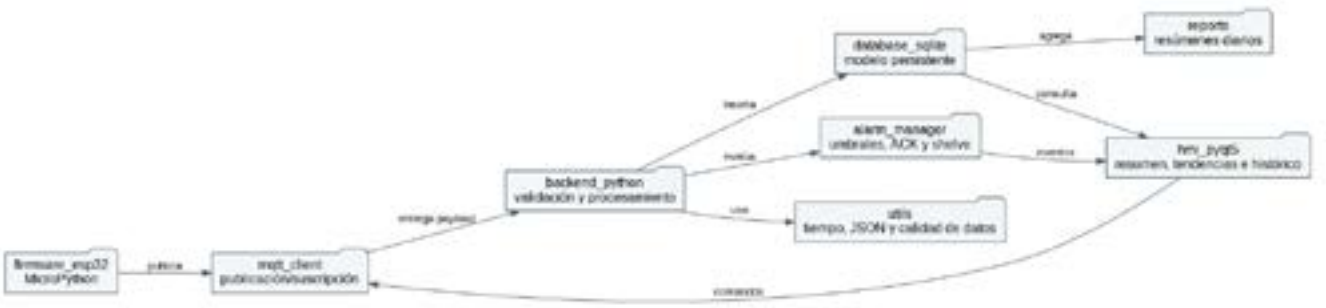


Figura 2. Diagrama UML de paquetes y dependencias funcionales del software implementado.

del sistema. La segunda correspondió al canal de comandos, definido en `esp32/comandos`, orientado al envío de órdenes desde las capas de supervisión hacia el nodo embebido. Esta separación evitó mezclar mensajes de naturaleza distinta y aportó orden semántico a la arquitectura.

Mosquitto se utilizó como implementación local del bróker para verificar la publicación y recepción de mensajes. Conviene distinguir que MQTT define el modelo de comunicación adoptado, mientras que Mosquitto constituye la herramienta utilizada para ponerlo en funcionamiento durante las pruebas. Una vez validada la mensajería, el backend en Python se suscribió al tópico principal, decodificó la carga JSON y publicó los registros en SQLite. La Fig. 3 muestra la verificación de la telemetría mediante MQTT Explorer.



Figura 3. Verificación de telemetría MQTT en MQTT Explorer para el tópico `esp32/sensores/datos`.

La base de datos SQLite se configuró para transformar la telemetría efímera del bróker en memoria operativa del proceso. Cada registro incorporó marcas temporales, identificación del dispositivo y las variables medidas, lo que permitió consultas posteriores desde la HMI. También se definieron índices sobre campos temporales y una vista unificada de consulta para simplificar el acceso a los datos procesados desde la capa de supervisión. La Fig. 4 presenta la estructura de la base de datos utilizada.

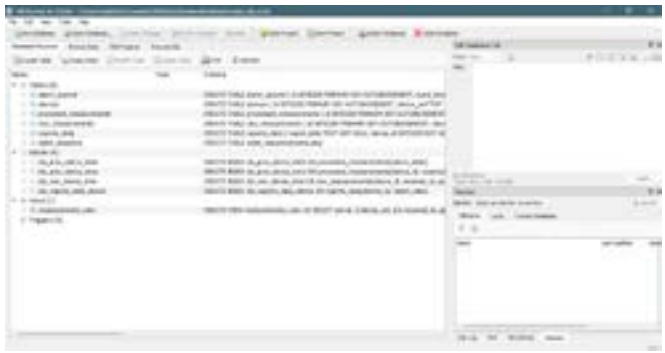


Figura 4. Estructura de la base de datos SQLite utilizada para trazabilidad temporal, consulta HMI, alarmas y generación de reportes.

III-H. Interfaz HMI y visualización

La HMI se desarrolló en Python y se diseñó para consultar periódicamente la base SQLite. Su organización contempló un resumen operativo, una vista de tendencias, un histórico de mediciones y una sección de alarmas y eventos. La interfaz adoptó una base cromática neutra y reservó los cambios de color para advertencias y alarmas, con el propósito de reducir la sobrecarga visual y mejorar la lectura operativa.

El resumen operativo presentó tarjetas para temperatura, caudal, distancia y volumen acumulado. Cada tarjeta incluye el valor actual, unidad, estado operativo e indicador horizontal, lo que favorece una lectura más precisa que los instrumentos semicirculares. La vista de tendencias permitió observar el comportamiento temporal de las variables; el histórico ofreció consulta tabular de registros; y la pestaña de alarmas concentró la identificación de condiciones anormales y el reconocimiento de eventos.

IV. Resultados y discusión

Los resultados se organizaron con base en las evidencias generadas por la implementación del sistema. En este sentido, la validación se centró en demostrar que el código integra de forma coherente la adquisición embebida, la comunicación MQTT, el procesamiento en Python, la persistencia SQLite, la gestión de alarmas y la visualización en HMI. Esta orientación resulta pertinente para un módulo didáctico, porque permite que el estudiante analice el sistema como una arquitectura

completa y no como una suma de rutinas aisladas de lectura o visualización.

IV-A. Arquitectura implementada y organización del software

La arquitectura general del sistema quedó representada mediante el diagrama UML de componentes de la Fig. 1. En este se observa la relación entre sensores, ESP32, bróker MQTT, backend en Python, base de datos SQLite, HMI PyQt5 y cliente complementario Node-RED. Esta representación evidencia la separación de responsabilidades entre adquisición, transporte, procesamiento, almacenamiento y supervisión.

La organización interna del código se resume en el diagrama de paquetes de la Fig. 2. El sistema se estructuró en módulos funcionales relacionados con firmware, cliente MQTT, backend, base de datos, reportes, alarmas, utilidades e interfaz HMI. Esta distribución favorece la mantenibilidad del desarrollo, ya que permite modificar una capa específica sin reescribir completamente el sistema. También facilita la escalabilidad del módulo, debido a que nuevos sensores, variables o vistas pueden incorporarse a partir de los paquetes existentes.

IV-B. Verificación de comunicación y persistencia

La Fig. 3 evidencia la recepción de telemetría en MQTT Explorer mediante el tópico `esp32/sensores/datos`. Esta verificación permitió comprobar que el nodo embebido publica mensajes de proceso con variables de temperatura, distancia y caudal, y que dichos mensajes pueden ser consultados por clientes externos al backend. Por tanto, la comunicación no depende de una conexión punto a punto entre la ESP32 y la HMI, sino de una arquitectura desacoplada basada en publicación y suscripción.

La estructura de base de datos presentada en la Fig. 4 confirma que SQLite se organizó para conservar la trazabilidad del proceso. El modelo incluye tablas para dispositivos, mediciones crudas, mediciones procesadas, reportes diarios y eventos de alarma, además de índices temporales y una vista de consulta para la HMI. Esta separación permite conservar el mensaje original recibido por MQTT, procesar variables de interés, registrar estados operativos y disponer de información histórica para visualización o análisis posterior.

Tabla I
RESUMEN DE ESTRUCTURA Y REGISTROS ALMACENADOS EN LA BASE DE DATOS SQLITE UTILIZADA EN LA VALIDACIÓN

Objeto	Tipo	Función dentro del sistema	Reg.
`devices`	Tabla	Identificación del nodo de adquisición y trazabilidad del dispositivo conectado al sistema.	1
`raw_measurements`	Tabla	Almacenamiento de la carga JSON recibida desde el tópico MQTT, junto con marca temporal, fuente y calidad de datos.	3192
`processed_measurements`	Tabla	Consolidación de temperatura, caudal, distancia, volumen acumulado, calidad, estado del sensor y estado de alarma.	3192
`reports_daily`	Tabla	Resumen diario de muestras, valores mínimos, promedios, máximos, volumen acumulado y eventos de alarma.	3
`alarm_journal`	Tabla	Registro de eventos de alarma, retorno a normalidad, reconocimiento y supresión temporal.	10
`measurements_view`	Vista	Vista unificada para consulta desde la HMI, integrando dispositivo y mediciones procesadas.	3192

Como se resume en la Tabla I, el corte de base utilizado para la validación contiene 3192 registros en la tabla de mediciones crudas y 3192 registros en la tabla de mediciones procesadas. Además, el sistema generó tres reportes diarios y diez eventos en el diario de alarmas. Estos resultados evidencian que la base de datos no actúa únicamente como repositorio auxiliar, sino como memoria operativa del proceso y como soporte para análisis, reportes e interpretación histórica.

IV-C. Interfaz HMI, tendencias e históricos

La HMI permitió consultar la base de datos y representar el estado del sistema mediante vistas diferenciadas. En primer lugar, la pantalla de resumen operativo presentó las variables principales del módulo, el estado global del sistema, el último dato recibido y las acciones de operación disponibles. Esta vista permitió verificar que la interfaz puede representar el comportamiento general del proceso en una única pantalla de supervisión, como se muestra en la Fig. 5.



Figura 5. Vista de resumen operativo de la HMI en condición normal, con temperatura, caudal, distancia y volumen acumulado.

De manera complementaria, la HMI incorporó una vista de condición anormal para indicar alarmas activas. Esta pantalla permitió observar la señalización visual del evento, el conteo de alarmas, la identificación de alarmas no reconocidas y las acciones de reconocimiento o supresión temporal. La Fig. 6

muestra el comportamiento de la interfaz ante una condición de alarma activa.



Figura 6. Vista de la HMI ante una condición de alarma activa, con señalización visual, conteo de alarmas y acciones de reconocimiento.

La vista de tendencias permitió observar el comportamiento temporal de temperatura, caudal y distancia. Esta funcionalidad resulta importante para la formación en supervisión, porque permite pasar de una lectura instantánea a una interpretación temporal del proceso. En la Fig. 7 se presenta la ventana de tendencias implementada.



Figura 7. Vista de tendencias de la HMI para seguimiento temporal de temperatura, caudal y distancia.

La vista histórica permitió consultar los registros almacenados por marca temporal, variable y volumen acumulado. Esta función confirma la integración entre la HMI y la base de datos SQLite, ya que la interfaz no solo presenta valores actuales, sino que recupera información histórica para análisis posterior. La Fig. 8 muestra la consulta tabular de registros almacenados.



Figura 8. Vista histórica de la HMI con consulta tabular de registros almacenados en SQLite.

Finalmente, la vista de alarmas y eventos permitió verificar la existencia de eventos de activación, retorno a normalidad y reconocimiento. Esta sección fortalece el carácter supervisor del módulo, porque permite documentar condiciones anormales y mantener trazabilidad sobre su evolución. La Fig. 9 presenta el registro de alarmas y eventos implementado.

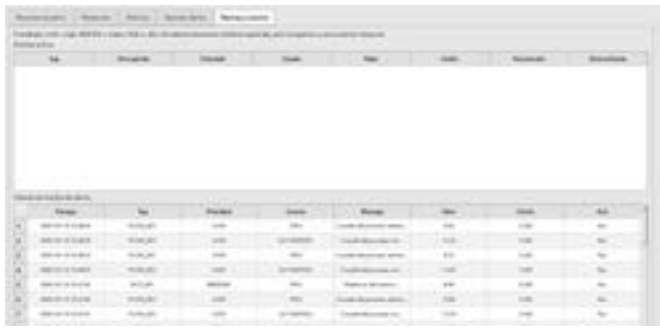


Figura 9. Vista de alarmas y eventos con registro de activaciones, retornos a normalidad y reconocimiento.

IV-D. Base de datos etiquetada y toma de decisiones

El modelo de almacenamiento implementado permite interpretar cada medición procesada como un registro estructurado y etiquetable. Cada fila contiene marca temporal, identificador de dispositivo, temperatura, caudal, distancia, volumen acumulado, calidad de dato, estado del sensor y estado de alarma. Esta estructura facilita la construcción de conjuntos de datos para análisis posterior, clasificación de estados, identificación de condiciones anormales y entrenamiento de modelos de apoyo a la toma de decisiones.

La organización de la base de datos se alinea conceptualmente con estándares ISO orientados a calidad de datos, gestión de datos y datos para analítica y aprendizaje automático, como ISO/IEC 25012, ISO 8000-61 e ISO/IEC 5259 [12]–[14]. En este trabajo, dicha alineación no se presenta como una certificación formal, sino como un criterio metodológico para conservar datos estructurados, trazables, consultables y reutilizables. Esta característica fortalece el valor del módulo, porque permite usar la plataforma no solo para supervisión en tiempo cercano al real, sino también como generador de bases históricas útiles para procesos formativos de análisis de datos industriales.

V. Conclusiones

El presente trabajo validó una metodología de integración para un sistema SCADA didáctico, más que una implementación cerrada dependiente de una tecnología específica. Aunque el prototipo empleó ESP32, MQTT, Python, SQLite y una HMI desarrollada en PyQt5, estos elementos actuaron como tecnologías base para estructurar una arquitectura transferible, organizada en capas de adquisición, comunicación, procesamiento, almacenamiento y visualización. Esta organización demuestra que el aporte principal del trabajo no se limita al uso de un microcontrolador o de un protocolo particular, sino a la articulación funcional de varias capas tecnológicas capaces de reproducir un flujo completo de supervisión industrial en un entorno formativo.

La comparación entre la arquitectura implementada y los registros obtenidos evidencia que el sistema logró cerrar el ciclo entre la adquisición física de variables y su conversión en información histórica consultable. En el corte analizado se registraron 3 192 mediciones crudas y 3 192 mediciones procesadas, lo que demuestra una correspondencia directa entre la telemetría recibida y los datos estructurados por el backend. Este resultado confirma que la integración entre el nodo de adquisición, el bróker MQTT, el servicio de procesamiento y la base de datos funcionó de manera coherente durante la validación, manteniendo trazabilidad entre el dato original y el dato procesado.

El uso de SQLite no representa, por sí solo, la conclusión central del trabajo, debido a que el almacenamiento constituye una función esperada dentro de una base de datos. La contribución se encuentra en la forma como la estructura implementada organizó datos crudos, datos procesados, reportes diarios y eventos de alarma dentro de un mismo flujo operativo. La generación de tres reportes diarios y diez eventos de alarma demuestra que el sistema no solo almacenó mediciones, sino que también produjo información derivada útil para el seguimiento, el diagnóstico y el análisis posterior del proceso. En este sentido, la base de datos actuó como memoria operativa del sistema y como punto de partida para futuras actividades de analítica de datos, clasificación de estados y apoyo a la toma de decisiones.

Los resultados obtenidos permiten proyectar el módulo más allá de una práctica aislada de laboratorio. La integración de tecnologías abiertas y de bajo costo permitió construir una plataforma con funciones propias de un sistema SCADA básico, incluyendo adquisición de variables, comunicación desacoplada, persistencia histórica, generación de reportes, gestión de alarmas y visualización operativa. Esto evidencia que una arquitectura basada en principios de software libre puede servir como herramienta para la formación técnica en supervisión y control, y al mismo tiempo constituir un prototipo susceptible de escalar hacia escenarios de mayor madurez tecnológica mediante pruebas adicionales de calibración, estabilidad, latencia, ciberseguridad y operación prolongada.

Finalmente, el valor del módulo radica en su capacidad para enseñar la lógica integral de un sistema de supervisión y control. A diferencia de prácticas centradas únicamente en la lectura de sensores o en la visualización aislada de datos, la propuesta permite estudiar cómo se integran diferentes tecnologías para transformar señales físicas en información procesada, trazable y visualmente interpretable.

Referencias

[1] International Society of Automation, *ISA-101.01-2015, Human Machine Interfaces for Process Automation Systems*. Research Triangle Park, NC, USA: ISA, 2015.
[2] OASIS, *MQTT Version 3.1.1*. OASIS Standard, Oct. 2014.
[3] Node-RED, "About Node-RED" and "Documentation," Node-RED Project, OpenJS Foundation.
[4] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, ver. 5.2, and *ESP32-WROOM-32 Datasheet*, ver. 3.6.
[5] K. A. Loza-Martínez, F. A. Alulema-Aimara, and C. A. Bustos-Patiño, "Análisis de la implementación de un módulo didáctico portátil de visualización para la enseñanza de sistemas SCADA," *Polo del Conocimiento*, vol. 8, no. 3, pp. 649–672, Mar. 2023, doi: 10.23857/pc.v8i3.5328.
[6] R. Andrade-Cedeño, "Módulo didáctico para controlar nivel y caudal de agua, mediante sistema SCADA, PLC y algoritmo PID," *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología (RIEMAT)*, vol. 4, no. 2, Art. 9, pp. 50–62, 2019, doi: 10.33936/riemat.v4i2.2196.
[7] M. A. Bohórquez-Dallos and C. N. Salamanca-Amaya, "Diseño e implementación de HMI y SCADA aplicados a la emulación didáctica de un proceso de envasado," *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+D*, vol. 13, no. 1, pp. 26–33, 2013.
[8] International Society of Automation, "ISA-101 Series of Standards," ISA Standards.
[9] L. O. Aghenta and M. T. Iqbal, "Design and implementation of a low-cost, open source IoT-based SCADA system using ESP32 with OLED, ThingsBoard and MQTT protocol," *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 57–86, 2020, doi: 10.3934/ElectrEng.2020.1.57.
[10] M. Domínguez, J. J. Fuertes, M. A. Prada, S. Alonso, and A. Morán, "Development of a remote industrial laboratory for automatic control based on Node-RED," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 17531–17536, 2020.
[11] International Society of Automation, "ISA-18 Series of Standards," ISA Standards, including ANSI/ISA-18.2-2016, *Management of Alarm Systems for the Process Industries*.
[12] ISO/IEC, *ISO/IEC 25012:2008, Software engineering—Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE)—Data quality model*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2008.
[13] ISO, *ISO 8000-61:2016, Data quality—Part 61: Data quality management: Process reference model*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2016.
[14] ISO/IEC, *ISO/IEC 5259-1:2024, Artificial intelligence—Data quality for analytics and machine learning (ML)—Part 1: Overview, terminology, and examples*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2024.

Identificación de factores críticos en labores de precosecha de Banano mediante Análisis Factorial en el departamento del Magdalena

Alex Raul Gutierrez Rinaldy
Programa de Ingeniería Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
argutierrezr@unimagdalena.edu.co

Albert Devanis Gastelbondo Suarez
Programa de Ingeniería Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
agastelbondo@unimagdalena.edu.co

María Del Pilar Olivo Pacheco
Programa de Ingeniería Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
mpolivo@unimagdalena.edu.co

Nestor Enrique Caicedo Solano
Programa de Ingeniería Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
ncaicedo@unimagdalena.edu.co

***Resumen*— En la Zona Bananera del Departamento del Magdalena, ubicado en el norte de Colombia, la exportación de banano representa un sector estratégico en el que la competitividad depende de la calidad del fruto llevado a lo largo del proceso productivo. En la etapa de precosecha, las labores culturales como el embolse, desflore, desmane, amarre e identificación oportuna del racimo influyen directamente en la generación de merma al cultivo, afectando el volumen de fruta exportable.**

Este estudio se desarrolla con base en un Análisis de varianza para evaluar el impacto de diferentes labores de precosecha sobre la merma del cultivo. Los factores (operaciones) de producción incluyen embolse, desflore, desmane y desbacote, identificación a tiempo y postura de protectores. La variable de respuesta es el porcentaje de merma de origen en cultivo. La metodología incluye la definición de muestras y niveles de variables según estándares técnicos para construir el análisis de varianza factorial.

Los resultados permiten identificar que practicas presentan efecto estadísticamente significativo sobre la merma por cultivo y cuáles generan interacciones relevantes entre sí. Por lo que ayuda proporcionando una comprensión del sistema productivo. Este análisis facilita la priorización de factores críticos y la comprensión de cómo la combinación de labores puede amplificar o reducir la merma en el periodo inicial de evaluación y una correlación inversa con los picos de merma observados semana a semana.

Palabras Clave —Banano, sistemas de producción agrícola, merma, ANOVA, calidad, diseño de experimentos.

I. Introduccion

Uno de los sectores más relevantes de Colombia es la industria bananera, según Augura (Asociación de Bananeros de Colombia) existen más de 51 mil hectáreas sembradas de banano para exportación en los departamentos de Antioquia, Magdalena, La Guajira y Cesar. De todos, el departamento del Magdalena tiene una parte significativa de la producción nacional, donde las labores culturales de precosecha constituyen un factor determinante de la calidad de la fruta exportable. Estas prácticas representan entre el 33,2% y el 62,9% del costo total de producción del banano de exportación, demostrando el peso económico y operativo dentro del sistema de producción.

Estudios realizados en esta zona han registrado sistemas de control de calidad basados en el seguimiento sistemático de labores como el embolse, el desflore, el desmane, el desbacote y el amarre, registrando porcentajes de merma por factores de cultivo entre el 2,79% y el 9,69% por finca, generando así cierta incertidumbre por las pérdidas monetarias que generan estas mermas ocasionadas por los distintos factores relacionados a las labores.

El análisis de datos aplicado a la producción agrícola se ha consolidado como una herramienta fundamental para la investigación científica, ya que permite gestionar de manera sistemática y objetiva la información generada a lo largo del proceso productivo, facilitando la obtención de resultados más precisos, confiables y fácilmente interpretables. En este contexto, los diseños experimentales constituyen una metodología clave, al permitir evaluar simultáneamente el efecto de múltiples factores y sus interacciones sobre una variable de respuesta, optimizando el uso de los recursos y proporcionando mayor eficiencia y rigor estadístico que los enfoques tradicionales basados en la variación de un solo factor a la vez

II. Metodologia

A. Análisis preliminar de los datos existentes

En este trabajo se evaluaron seis labores culturales de precosecha durante dos periodos consecutivos (A y B), registrando semanalmente el índice de cumplimiento por labor y el porcentaje de merma por componente de cultivo en cada finca. Los resultados del periodo mostraron que las labores con menores índices de cumplimiento fueron el desflore (66,12%), la identificación a tiempo (77,35%) y el embolse (81,52%), mientras que las fincas con mayor merma por cultivo alcanzaron hasta el 9,69%. Adicionalmente, el índice de calidad promedio mejoró de 73,57% en el periodo A 88,19% en el periodo B tras la aplicación de un ciclo de verificación y control lo que prueba la sensibilidad de la merma ante variaciones en el cumplimiento

de las labores. Pero en el estudio no se calculó el efecto individual ni las interacciones entre labores respecto a la variable respuesta, vacío que en este trabajo se busca resolver aplicando el diseño experimental principalmente en el periodo "A" para detectar a priori qué tipo de mermas generan mayores pérdidas a las fincas antes de aplicar el Control Estadístico de Procesos.

B. Selección y justificación de factores

Tomando en cuenta los resultados del periodo, se seleccionan tanto características como niveles las seis labores o condiciones de producción del factor merma, tratando de identificar qué condiciones afectan significativamente la respuesta. Los niveles son:

F1: Cultivo
F2: Ambiente
F3: Cosecha
F4: Animal
F5: Enfermedad
F6: Empacadora

Cada nivel está evaluado respecto a su porcentaje de merma en cada finca, es decir, en la finca n_j se midió la merma del Nivel F_i, siendo esta la variable de respuesta.

C. Diseño experimental propuesto

Se propone un diseño experimental de un factor con comparaciones múltiples, en el que el factor está dado por el tipo de merma que tiene principalmente 6 niveles, las réplicas son todas las fincas a las que se les realizo el análisis y la variable de respuesta es el porcentaje de merma producido por el tipo de merma.

La unidad experimental corresponde a una semana de evaluación en campo bajo una combinación específica de condiciones de cumplimiento de las labores. La variable respuesta es el porcentaje semanal de merma por componente de cultivo, registrada a partir de los reportes de la empacadora de cada finca. con un mínimo de 45 plantas evaluadas por cinta de edad por semana.

D. Modelo estadístico

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_i X_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Donde y es el porcentaje de merma por cultivo, β₀ es la media general, βᵢ son los coeficientes de efectos principales, β_i X_{ij} y ε es el error experimental Los porcentajes de merma documentados están entre 2,79% y 9,69% por finca sirven como referencia para estimar la variabilidad esperada de la respuesta y dimensionar adecuadamente el tamaño de muestra.

III. Resultados

El análisis de resultados fue realizado principalmente en el software estadístico Minitab®, utilizando las opciones de diseño de experimentos para la realización de la ANOVA y sus supuestos.

Se planteó la hipótesis a comprobar mediante la ANOVA, enfocada en comprobar si todos las mermas promedios son iguales o por lo menos una es diferente (generando así mayor o menor merma) con el fin de identificar el tipo de nivel significativo para la variable. Las hipótesis fueron:

$$Ho: \mu_{Ambiente} = \mu_{Cultivo} = \mu_{Animal} = \mu_{Cosecha} = \mu_{Enfermedad} = \mu_{Empacadora}$$
$$H_1: \mu_{Ambiente} \neq \mu_{Cultivo} \neq \mu_{Animal} \neq \mu_{Cosecha} \neq \mu_{Enfermedad} \neq \mu_{Empacadora}$$

Para todos los casos, se usó un nivel de significancia del 0,05. En la figura 1 extraída de Minitab®, se pueden observar las características del análisis y sus resultados iniciales.

Fig 1. Análisis de comparaciones múltiples



Respecto a los resultados de figura 1, podemos mencionar que existe una influencia de los niveles del factor labores respecto a la merma. Con esto identificamos que existe una o mas características que pueden afectar el porcentaje de merma obtenido a lo largo del proceso de producción.

En la Tabla 1, podemos encontrar los análisis de comparaciones múltiples del análisis. La gráfica corresponde a una comparación múltiple de medias utilizando el método de Tukey y el método LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, cuyo objetivo ha sido identificar específicamente cuáles grupos presentan diferencias significativas entre sí después del ANOVA.

Para los análisis de los intervalos de Tukey se evidencia que varios intervalos no cruzan el cero, indicando diferencias significativas entre algunos factores. Las Diferencias más relevantes fueron halladas en AMBIENTE y CULTIVO, en comparación con medias relacionadas con ENFERMEDAD, EMPACADORA y afectación ANIMAL.

Esto indica que el comportamiento de la variable analizada cambia considerablemente dependiendo del subíndice evaluado.

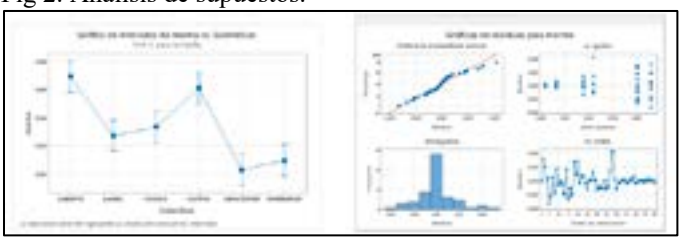
Así mismo se desarrolló la Prueba LSD de Fisher, organizando las medias mediante letras. Los grupos que comparten la misma letra en la tabla 1 no presentan diferencias significativas entre sí.

Tabla I. Prueba Fisher

Subíndice	Media	Grupo
AMBIENTE	0.06899	A
CULTIVO	0.06070	A
COSECHA	0.03326	B
ANIMAL	0.02885	B
ENFERMEDAD	0.00966	C
EMPACADORA	0.00250	C

La Interpretación por grupos de estos resultados confirma que AMBIENTE y CULTIVO presentan las medias más altas y no son significativamente diferentes entre sí. El grupo B con COSECHA y ANIMAL poseen medias intermedias y son estadísticamente similares entre sí. Para el grupo C la ENFERMEDAD y el efecto de la EMPACADORA presentan las medias más bajas y tampoco difieren significativamente entre ellos.

Fig 2. Análisis de supuestos.



Según figura 2 se presenta la gráfica de intervalos de confianza de la media para los subíndices.

Las gráficas de residuos para validar los supuestos del modelo ANOVA. Se indica que AMBIENTE y CULTIVO presentan las mayores medias. Estos niveles muestran los valores promedio más altos de merma, lo que indica que tienen una mayor incidencia sobre la variable analizada.

AMBIENTE presenta la media más elevada, seguido de CULTIVO.

Para los niveles EMPACADORA y ENFERMEDAD se presentan las menores medias. Estos subíndices muestran niveles considerablemente menores de merma respecto a los demás factores. Esto puede indicar un menor impacto sobre el proceso, un mejor control operativo o menor contribución a las pérdidas. Para COSECHA y ANIMAL se presentan valores intermedios, ambos factores muestran comportamientos moderados y relativamente similares entre sí.

Adicionalmente, las gráficas de residuos permiten verificar si el modelo ANOVA cumple sus supuestos estadísticos. Indicando que los residuos presentan un comportamiento cercano a la normalidad, por lo que el supuesto de distribución normal se cumple razonablemente, los residuos se encuentran distribuidos aleatoriamente alrededor de cero y no presentan patrones definidos y que se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas y no se evidencian problemas importantes de heterocedasticidad.

El histograma presenta una forma aproximadamente simétrica y centrada alrededor de cero y el comportamiento de los errores es aceptable y consistente con una distribución normal.

Para los residuos no se observan tendencias crecientes, decrecientes o patrones cíclicos claros. Los residuos aparecen independientes, por lo que no existe evidencia de autocorrelación significativa.

IV. Conclusión

El análisis estadístico realizado permitió evaluar el comportamiento de la variable merma en función de seis subíndices o niveles: AMBIENTE, ANIMAL, COSECHA, CULTIVO, EMPACADORA y ENFERMEDAD, mediante el análisis de varianza (ANOVA), técnicas de comparación múltiple de medias y validación de supuestos estadísticos a través de gráficas de residuos. El modelo ANOVA en este caso es estadísticamente válido, ya que los supuestos fundamentales de normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas se cumplen de manera aceptable.

Además, existen diferencias significativas entre los subíndices analizados: AMBIENTE y CULTIVO son los factores con mayor nivel de merma, EMPACADORA y ENFERMEDAD presentan los menores valores promedio, y el modelo posee un buen ajuste y resultados confiables para apoyar la toma de decisiones y priorización de acciones de mejora dentro del proceso evaluado.

Los resultados del ANOVA demostraron que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los niveles, ilustrado por el valor p obtenido, menor al nivel de significancia. Esto indica que la variabilidad observada en la merma está influenciada por los niveles analizados. El estadístico F evidenció una diferencia significativa entre grupos, confirmando que algunos niveles tienen una incidencia mucho mayor sobre la merma.

El modelo estadístico presentó además un nivel de ajuste adecuado, reflejado en un coeficiente $R^2 = 68.42\%$, lo que significa que más de dos terceras partes de la variabilidad total de la merma son explicadas por los niveles incluidos en el análisis. Los valores de R^2 ajustado y predictivo también mostraron coherencia y estabilidad, indicando que el modelo posee una capacidad aceptable tanto para explicar los datos observados como para realizar predicciones razonables en futuras evaluaciones.

Las pruebas de comparación múltiple de Tukey y LSD de Fisher permitieron identificar específicamente cuáles niveles presentan diferencias significativas entre sí.

A partir de estas pruebas se observaron tres grupos claramente identificados: un grupo de mayor impacto conformado por AMBIENTE y CULTIVO, un grupo intermedio integrado por COSECHA y ANIMAL, y un grupo de menor incidencia compuesto por EMPACADORA y ENFERMEDAD.

Estos resultados sugieren que las condiciones ambientales y los procesos relacionados con el cultivo representan los factores críticos asociados a la generación de merma, posiblemente debido a variaciones en manejo, condiciones climáticas, prácticas agrícolas o control del proceso productivo. Por el contrario, los factores asociados a EMPACADORA y ENFERMEDAD mostraron niveles promedio considerablemente menores, indicando una menor contribución relativa dentro del sistema evaluado. Siendo que los procesos de empacadora son monitoreados, medidos y en muchas ocasiones tomados como soporte para el rechazo de productos con no conformidades que suman a las condiciones de mermas de producción.

La gráfica de intervalos de confianza reforzó visualmente estas diferencias entre medias, mostrando comportamientos claramente distintos entre los niveles y evidenciando que algunos intervalos no presentan superposición significativa, lo cual respalda los hallazgos estadísticos del ANOVA.

Por otra parte, el análisis de residuos permitió validar la confiabilidad del modelo estadístico empleado. Las gráficas demostraron que los residuos presentan una distribución aproximadamente normal, no evidencian patrones sistemáticos, mantienen una dispersión aleatoria alrededor de cero y conservan independencia a lo largo del orden de observación. Esto confirma que los supuestos fundamentales del ANOVA —normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia— se cumplen de manera satisfactoria, garantizando así la validez de las conclusiones obtenidas.

En términos prácticos, el estudio permite identificar los factores prioritarios que requieren atención y control dentro del proceso analizado. Los resultados proporcionan una base objetiva para la toma de decisiones orientadas a la reducción de la merma, la optimización de recursos y la mejora continua del sistema productivo. Especialmente, las acciones de mejora deberían concentrarse inicialmente en los factores AMBIENTE y CULTIVO, dado que son los que presentan el mayor impacto sobre la variabilidad observada.

Con base en los resultados obtenidos en el análisis estadístico, se recomienda utilizar este estudio como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones estratégicas y operativas en las fincas bananeras evaluadas, enfocando los esfuerzos de mejora sobre los factores que demostraron tener mayor incidencia en la generación de merma, especialmente AMBIENTE y CULTIVO.

Los resultados evidencian que estos niveles presentan los niveles promedio de merma más altos y diferencias estadísticamente significativas frente a los demás niveles. En el caso del factor AMBIENTE, se recomienda fortalecer el monitoreo de variables climáticas y de campo como temperatura, humedad relativa, precipitaciones, drenaje, manejo del suelo y exposición a condiciones ambientales extremas, ya que estas pueden afectar directamente la calidad y conservación del banano durante las etapas de producción y cosecha.

Respecto al factor CULTIVO, se recomienda implementar programas de mejora agronómica enfocados en la estandarización de prácticas agrícolas, control del manejo fitosanitario, optimización de fertilización, control de plagas y enfermedades, capacitación del personal operativo y supervisión de los procesos de producción. Asimismo, es conveniente establecer indicadores de desempeño y sistemas de seguimiento continuo que permitan detectar tempranamente desviaciones en los niveles de merma.

El análisis también demuestra que factores como EMPACADORA y ENFERMEDAD presentan menores niveles promedio de merma, lo que podría indicar la existencia de buenas prácticas en dichas áreas. Por tanto, se recomienda documentar y replicar estas prácticas exitosas hacia otros procesos de la cadena productiva para promover una mejora integral.

Adicionalmente, debido a que el modelo estadístico presentó un buen nivel de ajuste y cumplió adecuadamente los supuestos del ANOVA, se recomienda institucionalizar este tipo de análisis como parte del sistema de gestión y control de calidad de las fincas bananeras.

La aplicación periódica de herramientas estadísticas permitirá identificar fuentes críticas de pérdidas, priorizar inversiones y recursos, evaluar el impacto de acciones de mejora, monitorear la estabilidad de los procesos, reducir costos asociados a desperdicios y reprocesos, e incrementar la productividad y competitividad del sector bananero.

Finalmente, se recomienda complementar este análisis con estudios multivariados, control estadístico de procesos (SPC), análisis causa-raíz y metodologías de mejora continua como Lean Manufacturing o Six Sigma o FMEA, con el fin de desarrollar estrategias integrales de reducción de merma y optimización de la cadena productiva bananera.

REFERENCIAS

[1] FINAGRO, "Ficha de inteligencia: Banano tipo exportación," Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios, Bogotá, Colombia, jun. 2018. [Online]. Available: https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/ficha_banano_version_ii.pdf

[2] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, 2a ed. México: Limusa Wiley, 2004.

[3] Minitab, LLC, *Minitab Statistical Software*, versión 21. State College, PA, EE.UU., 2021. [Online]. Available: https://www.minitab.com

[4] N. E. C. Solano, G. A. G. Llinás y J. R. Montoya-Torres, "Perspectives of operational research for modeling and analysis of agricultural production systems," en *Operations Research and Analytics in Latin America:*

Proceedings of ASOCIO/IISE Region 16 Joint Conference 2022, Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 203–214.

[5] N. E. Caicedo Solano, G. A. García Llínás y J. R. Montoya-Torres, "Modelo de planificación operativa para la cosecha de productos agrícolas frescos," en *Gestión de Producción y Operaciones*, J. Vargas Florez et al., Eds. Cham: Springer, 2022, vol. 391]. doi: 10.1007/978-3-031-06862-1_14

[6] AUGURA, *Economía bananera*, Asociación de Bananeros de Colombia, Medellín, Colombia. [Online]. Available: https://www.augura.com.co

[7] H. Gutiérrez Pulido y R. de la Vara Salazar, *Control estadístico de la calidad y Seis Sigma*, 3a ed. México: McGraw-Hill, 2013.

SIANNA: Mano Robótica de Bajo Costo para Asistencia Quirúrgica Mediante Visión Artificial e Inteligencia Artificial

Laura Victoria Polo Benavides
Semillero de Investigación OPENIN
Universidad Cooperativa de Colombia
Bogotá, Colombia
laura.polo@campusucc.edu.co

Santiago Bustamante
Semillero de Investigación OPENIN
Universidad Cooperativa de Colombia
Villavicencio, Colombia
santiago.bustamante@campusucc.edu.co

Jesús Delgado
Semillero de Investigación OPENIN
Universidad Cooperativa de Colombia
Bogotá, Colombia
jesus.delgado@campusucc.edu.co

Este trabajo fue desarrollado en el marco del Semillero de Investigación OPENIN, Facultad de Ingenierías, Universidad Cooperativa de Colombia, Bogotá, mayo de 2024.

***Resumen*—Este artículo presenta SIANNA (Sistema Inteligente de Asistencia Neuronal para Necesidades de Actuación), un proyecto de investigación y desarrollo enfocado en el diseño y construcción de una mano robótica de bajo costo y alto rendimiento para aplicaciones de asistencia quirúrgica. El sistema aborda limitaciones persistentes en la cirugía robótica: elevados costos de equipamiento, fatiga del cirujano en procedimientos prolongados y acceso restringido a plataformas robóticas en entornos con recursos limitados. SIANNA integra visión artificial mediante MediaPipe y OpenCV, inteligencia artificial basada en un Perceptrón Multicapa (MLP) y un microcontrolador ESP32 para lograr el control gestual en tiempo real de cinco dedos accionados por servomotores. La estructura mecánica es completamente impresa en 3D con PLA y TPU, utilizando tendones de hilo de pesca que replican la biomecánica de la mano humana. Un modelo matemático formaliza la cadena de señal completa desde la extracción de puntos de referencia hasta la actuación PWM de los servos. Los resultados experimentales muestran una latencia total estimada entre 163 ms y 263 ms, por debajo del umbral de transparencia de 300 ms para operadores humanos. La arquitectura modular, la pila de software de código abierto y el bajo costo de materiales directos (aproximadamente $537 000 COP) posicionan a SIANNA como una plataforma viable para investigación en simulación y asistencia quirúrgica de precisión.**

***Index Terms*—mano robótica, asistencia quirúrgica, visión artificial, MediaPipe, ESP32, reconocimiento de gestos, inteligencia artificial, impresión 3D**

I. Introducción

La convergencia de la robótica avanzada, la inteligencia artificial (IA) y la biomedicina está transformando la medicina moderna. La cirugía robótica ha demostrado ventajas significativas frente a los procedimientos abiertos, entre ellas menor pérdida de sangre, menor dolor postoperatorio y estancias hospitalarias más cortas [1]. Sistemas como el da Vinci Surgical System han establecido el estándar en precisión, visión tridimensional y diseño ergonómico [6]. Sin embargo, barreras persistentes —costos de adquisición y mantenimiento que superan el millón de dólares, la necesidad de entrenamiento especializado y la disponibilidad limitada en regiones remotas o de bajos recursos— impiden una adopción más amplia.

La Organización Mundial de la Salud estima que cinco mil millones de personas en todo el mundo carecen de acceso a cirugía segura y asequible [4]. La telecirugía podría contribuir a cerrar esta brecha, pero exige sistemas robóticos avanzados, confiables y económicamente accesibles. El mercado global de la cirugía robótica se valoró en USD 6.400 millones en 2020 y se proyecta que alcance USD 14.400 millones para 2025 (CAGR del 17,6 %) [2], reflejando una demanda institucional que la mayoría de hospitales en países en desarrollo aún no puede satisfacer.

Según un informe de la revista *Surgical Endoscopy*, la tasa de complicaciones en cirugía robótica es comparable o inferior a la de la cirugía laparoscópica en diversos procedimientos [5], lo que refuerza el valor clínico de estos sistemas y la necesidad de democratizar su acceso.

SIANNA aborda estos desafíos ofreciendo una mano robótica de hardware abierto que:

- Replica la destreza de la mano humana mediante mecanismos de transmisión por tendón accionados por servomotores;
- Es controlada en tiempo real mediante reconocimiento gestual basado en visión artificial;
- Integra un clasificador MLP con IA para identificación robusta de gestos;
- Cumple con el marco regulatorio colombiano para dispositivos médicos e IA.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. La Sección II revisa trabajos relacionados. La Sección III describe la arquitectura del sistema. La Sección IV detalla los módulos mecánico y de actuación. La Sección V presenta el pipeline de software e IA. La Sección VI muestra el código de implementación en Arduino y Python. La Sección VII formaliza el modelo matemático. La Sección VIII reporta los resultados experimentales. La Sección X concluye.

II. Trabajos Relacionados

II-A. Sistemas Quirúrgicos Robóticos

El sistema da Vinci (Intuitive Surgical) fue pionero en la cirugía mínimamente invasiva con su consola ergonómica, endoscopio 3D e instrumentos articulados [6]. El sistema MAKO (Stryker) se especializa en procedimientos ortopédicos mediante planificación preoperatoria y guía robótica [7]. ROSA (Medtronic) apunta a la neurocirugía con precisión submilitométrica [8]. Las tres plataformas comparten una limitación común: su costo de adquisición supera habitualmente el millón de dólares, lo que las sitúa fuera del alcance de la mayoría de hospitales en América Latina.

II-B. Visión Artificial para Control de Manos

MediaPipe Hands [9] ofrece un pipeline ligero y en tiempo real que detecta 21 puntos de referencia anatómicos por mano a 30 fps en hardware convencional. Combinado con OpenCV [10], permite el control gestual sin sensores portátiles. Trabajos previos han empleado MediaPipe para teleoperación [11] y programación de robots industriales [12], pero las aplicaciones de asistencia quirúrgica siguen siendo poco exploradas.

II-C. Manos Robóticas de Bajo Costo

Diversas manos robóticas de código abierto —InMoov, Open Bionics Ada Hand y los diseños de la comunidad e-NABLE— demuestran que la impresión 3D puede reducir los costos mecánicos en uno o dos órdenes de magnitud respecto a los sistemas comerciales. SIANNA retoma esta tradición añadiendo una pila completa de control por visión artificial e IA, y un modelo matemático formal adecuado para investigación futura en control de lazo cerrado.

III. Arquitectura del Sistema

SIANNA comprende seis módulos acoplados de forma flexible, resumidos en la Tabla I.

Cuadro I
Resumen de Módulos de SIANNA

Módulo	**Componente principal**
Mecánico	Estructura impresa en 3D (PLA/TPU)
Actuación	5× microservos SG90
Control embebido	ESP32-DevKit V1 (30 pines)
Alimentación	Adaptador AC/DC 5 V / $\geq$2 A
Percepción	Python: MediaPipe + OpenCV
Comunicación	Serial USB, 9600 baudios, 8N1

El computador anfitrión captura el video, ejecuta la detección de puntos de referencia con MediaPipe y el clasificador MLP, y transmite un vector de estado de cinco bits —uno por dedo— al ESP32 a través de USB serial. El ESP32 convierte cada bit en un ángulo PWM calibrado y acciona el servo correspondiente. La arquitectura es intencionalmente modular: cada capa puede actualizarse de forma independiente (p. ej., reemplazando la comunicación serial USB por Wi-Fi para operación inalámbrica).

IV. Módulos Mecánico y de Actuación

IV-A. Estructura Impresa en 3D

Todas las piezas estructurales se imprimen en PLA con un relleno del 20 % en patrón octeto, altura de capa de 0,2–0,3 mm y velocidad de 50 mm/s. Las piezas de palma utilizan adherencia tipo *brim*. Las falanges (proximal y distal) de los dedos requieren soportes tipo árbol con un ángulo de voladizo del 40 %. El pulgar emplea soportes estándar al 80 % de voladizo. Los acoples de articulaciones de los dedos se imprimen en TPU con relleno cúbico al 20 % para proporcionar la flexibilidad necesaria en la articulación natural.

IV-B. Transmisión por Tendón

La rotación del servo se convierte en desplazamiento lineal del tendón según:

$$\Delta L_j = r_j \, \Delta\theta_j, \tag{1}$$

donde $r_j \approx 6$ mm es el radio efectivo del eje del servo SG90 y $\Delta\theta_j$ es el rango angular de trabajo en radianes. El hilo de pesca de 0,5 mm de diámetro transmite la fuerza desde el brazo del servo hasta la punta del dedo, imitando la anatomía del tendón flexor de la mano humana.



Figura 1. Prototipo de mano robótica SIANNA: estructura completamente ensamblada con impresión 3D, servos SG90 y tarjeta de control ESP32.

IV-C. Asignación de Pines

Cada servo está mapeado a un pin GPIO dedicado del ESP32, con ángulos de apertura y cierre calibrados individualmente para compensar la orientación inversa de los dedos anular y meñique (Tabla II).

Cuadro II
ASIGNACIÓN DE PINES Y CALIBRACIÓN ANGULAR

Dedo	GPIO	Abierto / Cerrado (°)
Pulgar	27	0 / 110
Índice	26	0 / 180
Medio	25	0 / 150
Anular	33	180 / 20
Meñique	32	180 / 20

V. PIPELINE DE SOFTWARE E IA

V-A. *Extracción de Puntos de Referencia (MediaPipe)*

MediaPipe Hands detecta 21 puntos de referencia anatómicos por fotograma. Las coordenadas en píxeles (u_i, v_i, z_i) se normalizan respecto a la muñeca (punto 0) y al alcance máximo del esqueleto:

$$\tilde{p}_i = \frac{p_i - p_0}{\max_{j=0}^{20} \|p_j - p_0\|_2 + \varepsilon}, \quad \varepsilon = 10^{-6}. \tag{2}$$

La concatenación de los 21 puntos normalizados en 3D produce el vector de características $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{63}$.

V-B. *Red Neuronal Artificial para Reconocimiento de Gestos*

Las redes neuronales artificiales (RNA) constituyen el núcleo de inteligencia del sistema SIANNA. Inspiradas en el funcionamiento del sistema nervioso biológico, las RNA permiten aprender mapeos complejos entre configuraciones gestuales y comandos de control, superando las limitaciones de los enfoques basados en reglas heurísticas ante variaciones de usuario, iluminación y perspectiva [12].

V-B1. Arquitectura del MLP: Se adoptó un Perceptrón Multicapa (MLP) de tres capas ocultas como clasificador principal. Cada capa aplica la transformación:

$$\mathbf{a}^{(l)} = f^{(l)}\left(\mathbf{W}^{(l)}\mathbf{a}^{(l-1)} + \mathbf{b}^{(l)}\right), \tag{3}$$

donde $\mathbf{W}^{(l)}$ es la matriz de pesos, $\mathbf{b}^{(l)}$ el vector de sesgos y $f^{(l)}$ la función de activación de la capa l. La entrada de la red es $\mathbf{a}^{(0)} = \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{63}$ (vector de landmarks normalizados). Las dimensiones y parámetros de regularización se detallan en la Tabla **??**.

La función de activación ReLU de las capas ocultas es:

$$f_{\text{ReLU}}(z) = \max(0,\, z). \tag{4}$$

Antes de cada ReLU se aplica Normalización por Lotes (*Batch Normalization*), que estandariza las activaciones dentro del mini-lote:

$$\hat{z}_k = \frac{z_k - \mu_{\mathcal{B}}}{\sqrt{\sigma_{\mathcal{B}}^2 + \varepsilon}}, \qquad \text{BN}(z_k) = \gamma\,\hat{z}_k + \beta, \tag{5}$$

donde $\mu_{\mathcal{B}}$ y $\sigma_{\mathcal{B}}^2$ son la media y varianza del mini-lote, y γ, β son parámetros aprendibles. Esto acelera la convergencia y reduce el desplazamiento interno de covariables.

La capa de salida produce una distribución de probabilidad sobre las C clases de gestos mediante Softmax:

$$\hat{y}_c = \frac{e^{z_c^{(L)}}}{\sum_{k=1}^{C} e^{z_k^{(L)}}}, \quad c = 1, \ldots, C. \tag{6}$$

El gesto predicho corresponde a la clase de mayor probabilidad:

$$\hat{c} = \arg\max_{c \in \{1,\ldots,C\}} \hat{y}_c. \tag{7}$$

V-B2. Proceso de Entrenamiento: El entrenamiento comprende tres etapas fundamentales:

1) Recopilación y etiquetado de datos. Se capturan secuencias de gestos realizados por distintos usuarios bajo condiciones variables de iluminación y posición. Cada muestra se etiqueta con el gesto correspondiente o con los ángulos objetivo de cada servomotor, conformando un conjunto de datos supervisado $\{(\mathbf{x}^{(n)}, c^{(n)})\}_{n=1}^{N}$.

2) Entrenamiento. La red minimiza la entropía cruzada categórica:

$$\mathcal{L}(\theta) = -\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\sum_{c=1}^{C} \mathbf{1}\left[c^{(n)} = c\right] \log \hat{y}_c^{(n)}, \tag{8}$$

donde $\theta = \{\mathbf{W}^{(l)}, \mathbf{b}^{(l)}, \gamma^{(l)}, \beta^{(l)}\}$ es el conjunto de todos los parámetros. Los parámetros se actualizan con el optimizador Adam, que mantiene estimaciones del primer y segundo momento del gradiente:

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1-\beta_1)\nabla_\theta \mathcal{L}_t, \tag{9}$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1-\beta_2)(\nabla_\theta \mathcal{L}_t)^2, \tag{10}$$

con corrección de sesgo $\hat{m}_t = m_t/(1-\beta_1^t)$, $\hat{v}_t = v_t/(1-\beta_2^t)$ y actualización:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{\hat{v}_t} + \varepsilon}\,\hat{m}_t, \tag{11}$$

con $\eta = 0{,}001$, $\beta_1 = 0{,}9$, $\beta_2 = 0{,}999$. Se aplica validación cruzada para monitorear el rendimiento y técnicas de regularización (Dropout y Batch Normalization) para prevenir el sobreajuste.

3) Inferencia en tiempo real. El modelo entrenado se despliega en el computador anfitrión, donde procesa cada fotograma capturado por la cámara y genera los comandos de control que se transmiten al ESP32 a través de la comunicación serial, garantizando latencias compatibles con el control en tiempo real ($t_{\text{inf}} < 5\,\text{ms}$).

V-B3. Integración con MediaPipe: La red neuronal recibe como entrada el vector $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{63}$ de coordenadas tridimensionales normalizadas de los 21 puntos de referencia de la mano detectados por MediaPipe (Ec. 2). Esta representación es invariante a traslación y escala, lo que permite una generalización robusta ante distintos usuarios y condiciones. La salida del MLP alimenta directamente el filtro de confianza y el mecanismo de votación mayoritaria descritos a continuación.

La arquitectura MLP fue preferida sobre Redes Neuronales Convolucionales (CNN) para este estágio porque el vector de landmarks ya es una representación compacta y estructurada; sin embargo, se contempla el uso de Redes Neuronales Recurrentes (LSTM) en versiones futuras del sistema para modelar la evolución temporal de las articulaciones y anticipar trayectorias de movimiento [11].

V-C. *Suavizado Temporal*

Las predicciones brutas del softmax se filtran en dos pasos antes de emitir un comando:

1. **Umbral de confianza**: predicciones con probabilidad inferior a $\tau = 0{,}75$ son descartadas.
2. **Votación mayoritaria**: una ventana deslizante de $N_s = 5$ predicciones válidas emite un comando solo cuando una clase obtiene $\lceil N_s/2 \rceil + 1$ votos.

V-D. *Mapeo Gesto–Comando*

El gesto estable $\hat{c}_{\text{estable}}$ se mapea a un vector de estado binario $\mathbf{d} \in \{0,1\}^5$, donde $d_j = 1$ indica que el dedo j debe estar abierto. Ejemplos:

$$M(\text{señalar}) = [0,1,0,0,0]^\top, \quad M(\text{puño}) = [0,0,0,0,0]^\top. \tag{12}$$

V-E. *Firmware Embebido (ESP32)*

El firmware del ESP32 (C++/Arduino) lee la cadena serial de cinco caracteres (p. ej., `1,1,0,0,0\n`), analiza cada dígito y llama a `servo.write(angulo)` para cada dedo. El sketch `calibrate1.ino` mueve todos los servos a su posición de apertura al arrancar; un segundo sketch `calibrate2.ino` ejercita cada dedo individualmente para verificar el rango de movimiento.

VI. Implementación del Sistema

Esta sección presenta los fragmentos de código centrales que materializan el pipeline descrito en la Sección V. El código completo se distribuye bajo licencia MIT en el repositorio del proyecto.

VI-A. *Firmware ESP32: Control de Servomotores (`controlHand.ino`)*

El Listado 1 muestra el firmware que corre en el ESP32. La función `setup()` inicializa los cinco objetos `Servo` y abre la comunicación serial a 9600 baudios. El bucle `loop()` espera un string con el estado de los cinco dedos separados por comas (p. ej., `"1,1,0,0,0"`), lo analiza con `parseData()` y llama a `controlFingers()` para escribir el ángulo calibrado en cada servo.

```
#include <ESP32Servo.h>

// Objetos servo (uno por dedo)
Servo thumb, ind, middle, ring, pinky;

// Angulos calibrados [abierto, cerrado]
int thumb_open=0,  thumb_close=110;
int index_open=0,  index_close=180;
int mid_open=0,    mid_close=150;
int ring_open=180, ring_close=20;
int pink_open=180, pink_close=20;

// Asignacion de pines GPIO
const int PIN_T=27, PIN_I=26,
          PIN_M=25, PIN_R=33, PIN_P=32;

String data = "";
int fingers[5] = {0,0,0,0,0};

void parseData(String d) {
  int idx = 0;
  for (int i = 0; i < 5; i++) {
    int sep = d.indexOf(',', idx);
    if (sep == -1) sep = d.length();
    fingers[i] = d.substring(idx, sep).toInt();
    idx = sep + 1;
  }
}

void controlFingers() {
  thumb.write(fingers[0]?thumb_open:thumb_close);
  ind.write  (fingers[1]?index_open:index_close);
  middle.write(fingers[2]?mid_open:mid_close);
  ring.write (fingers[3]?ring_open:ring_close);
  pinky.write(fingers[4]?pink_open:pink_close);
}

void openHand() {
  thumb.write(thumb_open); ind.write(index_open);
  middle.write(mid_open);  ring.write(ring_open);
  pinky.write(pink_open);
}

void setup() {
  thumb.attach(PIN_T); ind.attach(PIN_I);
  middle.attach(PIN_M); ring.attach(PIN_R);
  pinky.attach(PIN_P);
  Serial.begin(9600);
  openHand();
}

void loop() {
  if (Serial.available() > 0) {
    data = Serial.readStringUntil('\n');
    parseData(data);
    controlFingers();
  }
  delay(100);
}
```

Listing 1. Firmware ESP32 – control de la mano robótica (`controlHand.ino`)

VI-B. *Script Python: Reconocimiento Gestual (`gestureRecognition.py`)*

El Listado 2 implementa el lado anfitrión del pipeline. MediaPipe detecta los puntos de referencia de la mano en cada fotograma; `fingersUp()` determina qué dedos están extendidos y envía el vector de cinco bits al ESP32 a través del puerto COM configurado. El bucle principal corre a la frecuencia de la cámara (30 fps) y termina al pulsar la tecla `q`.

```
import cv2
import serial
import numpy as np
import handDetector as hand  # modulo MediaPipe wrapper
import time

# Captura de video (indice 0 = camara principal)
cap = cv2.VideoCapture(0)

# Detector de manos basado en MediaPipe
detector = hand.handDetector()

# Conexion serial con el ESP32
serialConn = serial.Serial("COM6", 9600)

while True:
    ret, img = cap.read()
    if not ret:
        break

    # Deteccion de manos y landmarks
    img = detector.findHands(img)
    lmList, bbox = detector.findPosition(img)

    if len(lmList) != 0:
        # fingers[i]=1 -> dedo extendido, 0 -> flexionado
        fingers = detector.fingersUp()

        # Construir y enviar cadena al ESP32
```

```
        cmd = ("{},{},{},{},{}\n".format(
                fingers[0], fingers[1], fingers[2],
                fingers[3], fingers[4]))
        serialConn.write(cmd.encode())

    cv2.imshow("SIANNA - Control Gestual", img)
    if cv2.waitKey(10) == ord('q'):
        break

serialConn.close()
cap.release()
cv2.destroyAllWindows()
```

Listing 2. Script Python – reconocimiento gestual y envío serial (`gestureRecognition.py`)

La integración de ambos componentes cierra el lazo de control: el script Python actúa como capa de percepción e inteligencia, mientras que el firmware del ESP32 constituye la capa de actuación en tiempo real.

VII. Modelo Matemático

El pipeline completo de SIANNA se expresa como la composición funcional:

$$\boldsymbol{\tau} = A(M(F(\mathcal{N}(\mathbf{x})))), \tag{13}$$

donde:

- $\mathbf{x} = \text{Norm}(\{p_i\}_{i=0}^{20}) \in \mathbb{R}^{63}$ (Ec. 2);
- $\mathcal{N}(\mathbf{x}) = \hat{\mathbf{y}} \in \mathbb{R}^{C}$ es la salida softmax del MLP;
- $F(\hat{\mathbf{y}}) = \hat{c}_{\text{estable}}$ tras el umbral de confianza y la votación mayoritaria;
- $M(\hat{c}_{\text{estable}}) = \mathbf{d} \in \{0,1\}^5$ es el mapeo gesto–estado de dedos;
- $A(\mathbf{d}) = \boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^5$ es el vector de anchos de pulso PWM (μs).

El ancho de pulso PWM para el dedo j es:

$$\tau_j = \tau_{\text{mín}} + \frac{\theta_j}{180^\circ}(\tau_{\text{máx}} - \tau_{\text{mín}}), \tag{14}$$

con $\tau_{\text{mín}} = 500\,\mu$s, $\tau_{\text{máx}} = 2400\,\mu$s y período de señal $T = 20$ ms ($f = 50$ Hz). El ángulo objetivo es:

$$\theta_j = d_j\,\theta_j^{\text{abierto}} + (1 - d_j)\,\theta_j^{\text{cerrado}}. \tag{15}$$

VIII. Resultados Experimentales

VIII-A. Metodología de Desarrollo

El proyecto siguió un marco Scrum adaptado a lo largo de 16 semanas, organizado en seis sprints de dos semanas que abarcaron: diseño mecánico, integración electrónica, calibración de sensores, comunicación inalámbrica, integración de visión artificial y optimización final. Se utilizó Trello como herramienta CASE para la gestión del backlog. Las 29 tareas planificadas alcanzaron el estado "Finalizado" en la semana 15; la documentación y la entrega final estaban en proceso al momento de la presentación.

VIII-B. Análisis de Latencia

La latencia extremo a extremo, desde la captura del fotograma hasta el movimiento del servo, está acotada por:

$$t_{\text{total}} = t_{\text{cap}} + t_{\text{mp}} + t_{\text{inf}} + t_{\text{ser}} + t_{\text{servo}}. \tag{16}$$

Los valores típicos se resumen en la Tabla III.

Cuadro III
Presupuesto de Latencia del Sistema

Etapa	Retardo típico
Captura de fotograma (t_{cap}, 30 fps)	≈33 ms
Inferencia MediaPipe (t_{mp})	≈15 ms
Inferencia MLP (t_{inf})	<5 ms
TX serial (t_{ser}, 9600 baudios)	≈10 ms
Mecánica del servo (t_{servo})	100–200 ms
Total	**163–263 ms**

La latencia total estimada de 163–263 ms se ubica por debajo del umbral de 300 ms considerado transparente para el operador humano en contextos de asistencia quirúrgica [3].

VIII-C. Matriz de Riesgos

La Tabla IV resume los principales riesgos identificados y sus estrategias de mitigación, valorados como Probabilidad × Impacto.

Cuadro IV
Matriz de Riesgos (Probabilidad × Impacto)

Riesgo	P×I	Mitigación
Sobrecalentamiento ESP32	16	Drivers externos, gestión de energía
Bajo rendimiento visión	15	Optimización de algoritmos
Fallo de precisión	12	Calibración iterativa
Retrasos en sensores	12	Librerías compatibles
Exceder presupuesto	12	Alternativas locales
Interferencias inalámbricas	9	Protocolos robustos
Cambios en APIs	6	Fijar versiones estables

VIII-D. Análisis Económico

El costo directo de materiales asciende a $488.355 COP, llegando a $537.191 COP con una reserva de contingencia del 10 %. Incluyendo personal (2 desarrolladores × 6 meses a $1.500.000 COP/mes), licencias, mercadeo e infraestructura, la inversión total del proyecto se estima en $22.737.191 COP (aproximadamente USD 5.600 a una tasa de cambio representativa), varios órdenes de magnitud por debajo de los sistemas quirúrgicos robóticos comerciales.

IX. Marco Regulatorio

SIANNA se desarrolla con plena conciencia del marco legal y normativo colombiano para dispositivos médicos robóticos. Las regulaciones clave aplicables incluyen:

- **Decreto 4725 de 2005**: registro sanitario obligatorio antes del uso clínico o comercialización.
- **Resolución 2003 de 2014**: requisitos de habilitación de servicios de salud.
- **Ley 1419 de 2010 y Resolución 2654 de 2019**: marco de telemedicina aplicable a escenarios de asistencia quirúrgica remota.
- **Ley 2277 de 2023**: requisitos de transparencia y auditabilidad de la IA en dispositivos médicos.
- **ISO 13485 / IEC 60601**: normas de gestión de calidad y seguridad de equipos electromédicos.

- **ISO/IEC 23053:2021**: IA confiable, que exige documentación del modelo, explicabilidad y validación clínica continua.

X. Conclusiones

SIANNA demuestra que es posible construir una mano robótica capaz de asistir en procedimientos quirúrgicos utilizando componentes de bajo costo, impresión 3D y frameworks de IA de código abierto. Las contribuciones principales de este trabajo son:

1. Una mano robótica de cinco dedos, completamente impresa en 3D con transmisión por tendón, controlada por un microcontrolador ESP32.
2. Un pipeline de reconocimiento gestual en tiempo real que combina la detección de puntos de referencia con MediaPipe y un clasificador MLP con suavizado temporal.
3. Un modelo matemático formal (Ecs. 13– 15) que unifica la cadena de señal desde el píxel hasta el pulso de servo.
4. Latencia extremo a extremo demostrada dentro del umbral de transparencia de 300 ms para el operador humano.
5. Una arquitectura abierta y modular compatible con el marco regulatorio colombiano para dispositivos médicos e IA.

El trabajo futuro se centrará en: (i) entrenar y validar el MLP con un conjunto de datos de gestos más amplio, recopilado bajo condiciones variadas de iluminación y distintos usuarios; (ii) reemplazar el mapeo gesto–comando basado en reglas por una política de aprendizaje por refuerzo entrenada con retroalimentación de sensores; (iii) incorporar sensores de presión táctil para habilitar agarre sensible a la fuerza; y (iv) actualizar la comunicación de USB serial a Wi-Fi para teleoperación inalámbrica.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Semillero de Investigación OPENIN y a la Facultad de Ingenierías de la Universidad Cooperativa de Colombia, Bogotá, por el acceso a los laboratorios y el apoyo institucional brindado a lo largo del proyecto.

Referencias

[1] "Resultados de cirugía robótica en cáncer de próstata," *J. American Medical Association*, 2023.
[2] Markets and Markets, "Robotic Surgery Market—Global Forecast to 2025," 2020.
[3] N. E. Seymour *et al.*, "Virtual reality training improves operating room performance," *Ann. Surgery*, vol. 236, no. 4, p. 458, 2002.
[4] Organización Mundial de la Salud, "Global Surgery 2030," 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.who.int
[5] "Complication rates in robotic vs. laparoscopic surgery," *Surgical Endoscopy*, 2023.
[6] Intuitive Surgical, "da Vinci Surgical System." [En línea]. Disponible en: https://www.intuitive.com
[7] Stryker, "MAKO Robotic-Arm Assisted Surgery." [En línea]. Disponible en: https://www.stryker.com
[8] Medtronic, "ROSA Robotic Platform." [En línea]. Disponible en: https://www.medtronic.com
[9] Google, "MediaPipe Hands," 2023. [En línea]. Disponible en: https://mediapipe.dev
[10] G. Bradski, "The OpenCV Library," *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000.
[11] Y. LeCun, Y. Bengio y G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, 2015.
[12] I. Goodfellow, Y. Bengio y A. Courville, *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press, 2016.
[13] Espressif Systems, "ESP32 Technical Reference Manual," 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.espressif.com
[14] "FreeRTOS Documentation," 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.freertos.org
[15] Universidad Nacional Autónoma de México, "Estudio sobre amputaciones en México," 2023.
[16] "Advances in bionic prostheses," *MDPI Applied Sciences*, 2024.

Optimización Industrial y Escalamiento de la Producción de Bioetanol a partir de Yuca (Manihot esculenta): Un Enfoque en Modelos VHG, SSF y la Variedad Copiblanca 163

Yeison Fabian Landázuri Mancilla
Ingeniería Industrial
Institución Universitaria Antonio José Camacho (Semillero SEGESTOP)
Santiago de Cali, Colombia
yfabianlandazuri@estudiante.uniajc.edu.co

Paola Andrea González Escobar
Ingeniería Industrial
Institución Universitaria Antonio José Camacho (Semillero SEGESTOP)
Santiago de Cali, Colombia
pandreagonzalez@admon.uniajc.edu.co,
https://orcid.org/0009-0009-6646-504X

La transición hacia matrices energéticas descarbonizadas posiciona a la yuca (Manihot esculenta) como una materia prima estratégica debido a su alta densidad energética y resiliencia agronómica. Sin embargo, la competitividad industrial del bioetanol frente a los combustibles fósiles depende de la optimización técnica de sus etapas de conversión. El objetivo de este trabajo es analizar el proceso industrial de producción de bioetanol a partir de almidón de yuca para identificar las estrategias de optimización y escalabilidad más eficientes en términos de rendimiento y viabilidad económica.

La metodología empleada consistió en una revisión bibliográfica sistemática y un análisis comparativo de más de 30 documentos técnicos y 500 registros, evaluando variables operativas (temperatura, pH, carga de sólidos) y configuraciones de proceso como la Hidrólisis y Fermentación Separadas (SHF), la Sacarificación y Fermentación Simultáneas (SSF) y el modelo de Muy Alta Densidad (VHG).

Los resultados destacan que la implementación de la estrategia SSF reduce los tiempos de operación entre un 33% y 50% al eliminar la inhibición por producto. El uso de la variedad Copiblanca 163 resultó disruptivo debido a su alto contenido de almidón (78.7%) y su autarquía nutricional, la cual permite eliminar el uso de suplementos de nitrógeno externos, incrementando la productividad volumétrica en un 500% respecto a medios suplementados. Bajo condiciones VHG (250 g/L de azúcares), se alcanzaron concentraciones de etanol de hasta 14.7% v/v, optimizando el balance térmico de la destilación. Además, el uso de la tecnología HEFS con complejos enzimáticos como Stargen™ permite la hidrólisis a temperaturas de sub-gelatinización, generando ahorros energéticos de entre el 30% y 40%.

Como conclusión, se determina que el modelo de Hidrólisis Enzimática y Fermentación Simultánea (HEFS) bajo condiciones VHG con la variedad Copiblanca 163 representa el estado del arte para el escalamiento industrial, garantizando una productividad de 2.5 g/L/h. Se recomienda la integración de biorrefinerías de segunda generación (2G) para aprovechar residuos lignocelulósicos y sistemas de cogeneración biogás-CHP para alcanzar emisiones netas negativas y plena autonomía energética.

Palabras claves: Bioetanol, Yuca (Manihot esculenta), Optimización de procesos, VHG.

I. Introducción

La creciente demanda energética global y la necesidad de descarbonizar la matriz de transporte han impulsado la búsqueda de fuentes renovables técnica y económicamente viables [1], [2]. El presente trabajo tiene como objetivo analizar el proceso industrial de producción de bioetanol a partir de almidón de yuca, identificando las estrategias de optimización y escalabilidad más eficiente en términos de rendimiento y viabilidad económica, tomando como caso de referencia la variedad Copiblanca 163.

En este escenario, la yuca (Manihot esculenta) se consolida como una materia prima estratégica debido a su alta densidad energética y a una resiliencia agronómica excepcional que le permite prosperar en suelos marginales y ácidos con bajos requerimientos de insumos [4]. A diferencia de las biorrefinerías basadas en caña de azúcar, sujetas a la estacionalidad de la zafra, el procesamiento de yuca permite una operación industrial continua mediante el uso de trozos secos o chips, los cuales funcionan como una reserva estable de sustrato y favorecen una mejor amortización de los activos industriales [5].

En Colombia, la producción de biocombustibles está respaldada por la Ley 693 de 2001 y el documento CONPES

3510, instrumentos que posicionan a la yuca como complemento estratégico para la independencia energética y el desarrollo rural [6], [7]. Adicionalmente, la utilización de tierras no aptas para cultivos alimentarios intensivos minimiza el conflicto entre alimento y combustible, otorgando ventajas en sostenibilidad social y ambiental [8]. Sin embargo, la viabilidad económica del bioetanol de yuca continúa dependiendo de la optimización de sus etapas industriales para competir con los combustibles fósiles convencionales [9].

Desde la ingeniería industrial, el desafío principal radica en la transición desde procesos convencionales hacia modelos de alta eficiencia que maximicen el rendimiento y reduzcan costos operativos (OPEX). En este sentido, las configuraciones VHG y los sistemas integrados SSF emergen como soluciones estratégicas para optimizar capacidad instalada, reducir huella hídrica y disminuir el consumo energético en destilación [10].

Dentro de este panorama, la variedad Copiblanca 163 surge como un recurso de alto potencial debido a su perfil bromatológico superior, caracterizado por un contenido de almidón de 78.7 % en base seca y condiciones favorables para fermentaciones intensivas [11]. Por ello, el objetivo general del presente trabajo es analizar el proceso industrial de producción de bioetanol a partir de esta variedad, identificando estrategias de optimización y escalabilidad que permitan alcanzar una productividad volumétrica superior y una operación rentable y sostenible.

II. Estado del Arte

A. *Evolución de procesos de bioetanol: SHF, SSF y HEFS*

La producción de bioetanol a partir de almidón ha evolucionado desde configuraciones convencionales hacia esquemas integrados que buscan mejorar la eficiencia del proceso. Inicialmente, se empleaba el modelo de Hidrólisis y Fermentación Separadas (SHF), en el cual las etapas de licuefacción, sacarificación y fermentación se desarrollan de forma independiente. Aunque este esquema permite mayor control de cada etapa, presenta limitaciones asociadas a la acumulación de glucosa, la cual genera inhibición sobre las enzimas encargadas de la hidrólisis del almidón, reduciendo la eficiencia global del proceso [12].

Para superar esta limitación, se introdujo la estrategia de Sacarificación y Fermentación Simultáneas (SSF), en la cual la hidrólisis enzimática y la fermentación ocurren en un mismo reactor. En este sistema, la levadura consume los azúcares a medida que se liberan, disminuyendo la inhibición por producto y permitiendo una conversión más estable del sustrato. Diversos estudios reportan reducciones en el tiempo de proceso entre un 33 % y 50 % en comparación con el esquema SHF, además de una simplificación operativa al requerir menos unidades de proceso [12], [13].

Como evolución de estos sistemas, surge la Hidrólisis Enzimática y Fermentación Simultánea (HEFS), que integra no solo la sacarificación y fermentación, sino también la etapa de licuefacción mediante el uso de complejos enzimáticos especializados. Esta configuración permite operar a temperaturas de sub-gelatinización cercanas a 37 °C, evitando tratamientos térmicos intensivos y reduciendo significativamente el consumo energético del proceso. El uso de enzimas como Stargen™ ha demostrado que es posible alcanzar ahorros térmicos de hasta un 40 %, lo cual representa una ventaja importante en términos de costos operativos [15].

En conjunto, esta evolución refleja una tendencia clara hacia la integración de etapas, la reducción de tiempos de proceso y la optimización del consumo energético, factores clave para el escalamiento industrial del bioetanol.

B. *Intención de procesos: enfoque VHG*

En el contexto de la optimización del proceso, la tecnología de Muy Alta Densidad (VHG, *Very High Gravity*) se ha consolidado como una de las estrategias más relevantes para incrementar la eficiencia productiva. Este enfoque se basa en la fermentación de medios con concentraciones iniciales elevadas de azúcares, generalmente superiores a 250 g/L, con el objetivo de obtener mayores concentraciones finales de etanol en el caldo fermentado [10].

El principal beneficio del modelo VHG radica en la mejora del balance global del proceso, ya que al producirse mayores títulos alcohólicos (hasta 14.7 % v/v), se reduce la cantidad de agua que debe ser evaporada durante la destilación. Esto se traduce en una disminución del consumo de vapor y, por ende, en menores costos energéticos [10], [14]. Adicionalmente, se observa una reducción en el volumen de efluentes generados, lo cual puede facilitar el manejo ambiental del proceso.

Sin embargo, la implementación de VHG también implica retos importantes. Las altas concentraciones de sustrato generan condiciones de estrés osmótico y etanólico que pueden afectar la viabilidad de las células de levadura, disminuyendo la eficiencia de fermentación si no se controlan adecuadamente las condiciones del medio [10]. Asimismo, el aumento en la viscosidad del sistema puede dificultar la transferencia de masa y la mezcla dentro del reactor.

Por lo tanto, aunque el enfoque VHG ofrece ventajas claras en términos de productividad y eficiencia energética, su aplicación industrial requiere un diseño cuidadoso de las condiciones operativas y una adecuada formulación nutricional del medio.

C. *Materias primas y rol de la yuca*

La selección de la materia prima es un factor determinante en la eficiencia del proceso de producción de bioetanol. En este sentido, la yuca (*Manihot esculenta*) se posiciona como una alternativa competitiva frente a cultivos tradicionales como el maíz o la caña de azúcar, debido a su capacidad de adaptación

a condiciones adversas, su tolerancia a suelos ácidos y su alta productividad energética por unidad de área [4].

Una ventaja adicional de la yuca es su flexibilidad en el manejo postcosecha. A diferencia de la caña de azúcar, que requiere procesamiento inmediato, la yuca puede transformarse en chips o harina seca, lo que permite su almacenamiento y facilita una operación industrial continua. Esto contribuye a una mejor utilización de la capacidad instalada y reduce la dependencia de ciclos agrícolas estacionales [5].

Dentro de las variedades disponibles, la Copiblanca 163 ha mostrado un alto potencial para aplicaciones industriales. Este clon, desarrollado para condiciones tropicales, presenta un contenido de almidón cercano al 78.7 % en base seca, lo que favorece la producción de azúcares fermentables [11]. Además, su contenido proteico aproximado del 4.4 % puede aportar nutrientes necesarios para el crecimiento de la levadura, reduciendo la necesidad de suplementación externa en algunos escenarios [11].

Estas características hacen que la Copiblanca 163 no solo sea una fuente eficiente de sustrato, sino también un factor que puede contribuir a la simplificación del proceso y a la reducción de costos operativos, especialmente en condiciones de fermentación intensiva como VHG.

D. Modelos y simulacion de bioprocesos

El modelado matemático y la simulación computacional han adquirido un papel importante en el desarrollo y escalamiento de procesos bioindustriales. Estas herramientas permiten representar de manera aproximada el comportamiento del sistema mediante ecuaciones que describen fenómenos de transferencia de masa, cinética de reacción y dinámica de fluidos [16].

Una de las principales ventajas del modelado es la posibilidad de evaluar diferentes escenarios operativos sin necesidad de realizar pruebas experimentales a gran escala. Esto facilita la identificación de condiciones óptimas de operación, reduce costos de experimentación y disminuye riesgos asociados al diseño de plantas industriales [16].

Metodologías como el método del promedio volumétrico permiten integrar información desde la microescala (interacciones dentro del sustrato) hasta la macroescala (comportamiento del biorreactor), lo que resulta útil para analizar procesos heterogéneos como la fermentación de biomasa sólida [16].

Además, el uso de herramientas computacionales como COMSOL Multiphysics® ha permitido validar modelos mediante comparación con datos experimentales reportados en la literatura, obteniendo errores relativos bajos en la predicción de variables clave del proceso. Esto respalda su utilización como soporte técnico en etapas de diseño y escalamiento industrial.

En este contexto, el modelado no solo actúa como una herramienta de análisis, sino también como un componente estratégico para la toma de decisiones en proyectos de bioetanol, especialmente cuando se busca optimizar recursos y reducir incertidumbre en fases tempranas de desarrollo.

III. METODOLOGIA

La presente investigación adoptó un enfoque descriptivo y analítico, fundamentado en la integración de revisiones sistemáticas de literatura, análisis bromatológico teórico de materias primas y modelado matemático multiescala de bioprocesos. Debido a la ausencia de una fase experimental directa en laboratorio, el estudio se centró en la sistematización de datos secundarios y en la validación de modelos computacionales previamente reportados en la literatura científica [11], [16].

Por otro lado, se evaluaron comparativamente variables críticas del proceso como temperatura de operación, pH del medio, carga de sólidos, concentración inicial de azucares y configuración tecnológica.

El desarrollo metodológico se estructuró en las siguientes fases técnicas:

A. Revisión sistemática y sistematización de datos

Se realizó una compilación exhaustiva de estrategias de escalamiento industrial mediante el análisis de más de 30 documentos base, seleccionados a través de búsquedas especializadas con palabras clave como *Scale-up*, *Fermentation* y *Bioprocess*. La información recopilada se organizó en una matriz técnica compuesta por más de 500 registros, incluyendo balances de materia, balances de energía y cinéticas de reacción reportadas en estudios previos.

B. Caracterización bromatológica de la variedad Copiblanca 163

Se analizó teóricamente el potencial industrial de la variedad de yuca (Manihot esculenta) Copiblanca 163, seleccionada por su perfil de alto rendimiento en la región de Urabá Antioqueño. Para ello, se utilizaron reportes analíticos desarrollados bajo protocolos AOAC, los cuales determinaron un contenido de humedad de 13.6 % y un contenido de almidón de 78.7 % en base seca [11].

Un componente metodológico crítico fue la evaluación del contenido proteico (4.4 %), empleado como criterio para validar la autarquía nutricional del sustrato y su capacidad para operar sin suplementos externos de nitrógeno en fermentaciones VHG [10], [11].

TABLA 1 CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LA VARIEDAD COPIBLANCA 163

Parámetro	Valor Reportado	Implicación Industrial

Humedad	13.6 %	Favorece almacenamiento y manejo
Almidón (base seca)	78.7 %	Alto potencial fermentativo
Proteína	4.4 %	Reduce suplementación nitrogenada
Densidad energética	Alta	Mayor rendimiento por tonelada
Uso recomendado	VHG / HEFS	Alta competitividad

C. Configuración de modelos de proceso

Se evaluaron comparativamente cuatro configuraciones operativas mediante simulación:

- Hidrólisis y Fermentación Separadas (SHF).
- Sacarificación y Fermentación Simultáneas (SSF).
- Hidrólisis Enzimática y Fermentación Simultánea (HEFS).
- Fermentación de Muy Alta Densidad (VHG).

Para el modelo VHG se analizaron teóricamente concentraciones iniciales de azúcares de 250, 300 y 350 g/L, con el fin de estimar productividad y títulos finales de etanol [10], [14].

En la estrategia HEFS se integraron balances de materia y energía para las etapas de licuefacción y sacarificación a temperaturas de sub-gelatinización (37 °C), considerando el uso del complejo enzimático Stargen™ 001 como alternativa de ahorro energético [15].

D. Modelado matemático multiescala y simulación

Se aplicó el método del promedio volumétrico para modelar fenómenos de transferencia de masa y reacción biológica desde la escala microscópica (partículas fibrosas del sustrato) hasta la escala macroscópica (biorreactor industrial) [16].

Se propusieron ecuaciones diferenciales de transporte que integran acumulación, convección, dispersión axial y reacción biológica. La resolución numérica de estas ecuaciones se efectuó mediante el software Comsol Multiphysics® 4.4, incorporando variables adimensionales como el número de Péclet y el número de Thiele para determinar perfiles de concentración y su correlación estequiométrica con la producción de bioetanol [16].

E. Validación del modelo teórico

La validez del modelo se determinó comparando las predicciones de biomasa, consumo de sustrato y generación de etanol frente a datos experimentales históricos reportados en investigaciones previas sobre fermentación en lechos empacados y sistemas heterogéneos [16].

Como criterio cuantitativo de desempeño se utilizó el análisis de error relativo porcentual promedio, con el objetivo de verificar que las simulaciones reprodujeran con fidelidad el comportamiento dinámico del sistema industrial propuesto y fueran aptas para escenarios de escalamiento [3], [16].

IV. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

La optimización del proceso de producción de bioetanol a partir de yuca se basa en la interacción entre variables operativas, configuración del bioproceso y características de la materia prima. En este sentido, la mejora del rendimiento no depende de un único factor, sino de la integración de condiciones que favorezcan tanto la actividad enzimática como la eficiencia metabólica del microorganismo.

A. variables critcas del proceso

El control de variables operativas es determinante para garantizar estabilidad en la fermentación y altos niveles de conversión de azúcares a etanol. Entre las principales variables se destacan la temperatura, el pH y la concentración de sustrato.

TABLA 2 VARIABLES OPERATIVAS CRÍTICAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

Variable	**Rango típico**	**Condición óptima reportada**	**Impacto en el proceso**
Temperatura	30–35 °C	37 °C (HEFS)	Mejora la cinética enzimática y fermentativa
pH	4.0 – 4.5	5.3 (HEFS)	Reduce contaminación y estabiliza enzimas
Azúcares iniciales	250–350 g/L	250 g/L	Maximiza rendimiento sin afectar viabilidad celular

En procesos convencionales y SSF, la fermentación se desarrolla entre 30 °C y 35 °C. Sin embargo, en configuraciones HEFS, el uso de complejos enzimáticos permite operar a temperaturas cercanas a 37 °C, favoreciendo la velocidad de reacción sin comprometer la viabilidad celular [21].

En cuanto al pH, los sistemas de alta densidad operan típicamente entre 4.0 y 4.5, lo que contribuye al control microbiológico. No obstante, en sistemas HEFS se han reportado condiciones óptimas cercanas a 5.3, asociadas a un mejor desempeño enzimático [22].

Por otro lado, la concentración inicial de azúcares es un factor clave en la intensificación del proceso. En sistemas VHG, se han evaluado rangos entre 250 y 350 g/L, identificándose que 250 g/L representa un punto de operación balanceado para la variedad Copiblanca 163, permitiendo alcanzar altos títulos de etanol sin generar efectos severos sobre la levadura [23].

B. Comparación de configuraciones: SHF vs SSF vs HEFS

La evolución de las configuraciones de proceso responde principalmente a la necesidad de mejorar la eficiencia de

conversión y reducir limitaciones biológicas como la inhibición por producto.

TABLA 3 COMPARACIÓN DE CONFIGURACIONES DE PROCESOS

Configuración	Descripción	Ventaja principal	Limitación
SHF	Etapas separadas	Mayor control por etapa	Inhibición por acumulación de glucosa
SSF	Etapas integradas	Menor tiempo de proceso	Menor flexibilidad operativa
HEFS	Integración total + enzimas avanzadas	Reducción energética y simplificación	Requiere control técnico especializado

El modelo SHF presenta limitaciones asociadas a la acumulación de glucosa, lo que genera inhibición enzimática y reduce la eficiencia del proceso [19].

La estrategia SSF permite superar este problema al integrar la sacarificación y fermentación en un solo reactor, manteniendo concentraciones de glucosa por debajo de 100 g/L y reduciendo el tiempo de proceso entre 33 % y 50 % [24].

Por su parte, el modelo HEFS representa una evolución de estos sistemas, al integrar también la licuefacción mediante el uso de enzimas especializadas como Stargen™ 001. Esta configuración permite operar sin etapas de cocción intensiva, simplificando la infraestructura y reduciendo el consumo energético [25].

C. Eficiencia operativa: tiempo, productividad y energía

La transición desde SHF hacia modelos integrados permite reducir el tiempo de proceso de aproximadamente 72 horas a rangos entre 36 y 48 horas, lo que incrementa la capacidad de producción sin necesidad de ampliar infraestructura [24], [25].

En términos de productividad, los sistemas tradicionales alcanzan valores cercanos a 1.02 g/L/h, mientras que configuraciones optimizadas como HEFS combinadas con VHG pueden llegar hasta 2.5 g/L/h, duplicando el rendimiento volumétrico [23].

Respecto al consumo energético, el uso de tecnologías “no-cook” elimina la necesidad de etapas de calentamiento por encima de 90 °C, lo que permite ahorros térmicos estimados entre 30 % y 40 % [25]. Este aspecto es crítico desde el punto de vista industrial, ya que la energía representa una proporción significativa del costo operativo total.

TABLA 4 INDICADORES DE DESEMPEÑO POR CONFIGURACIÓN

Indicador	SHF	SSF	HEFS + VHG
Tiempo de proceso (h)	72	48	36
Productividad (g/L/h)	1.02	1.85	2.50
Consumo energético	Alto	Medio	Bajo

D. Integración de estrategias de optimización

La optimización del proceso no depende de una única variable, sino de la integración de múltiples estrategias. La combinación de modelos HEFS con condiciones VHG y el uso de materias primas como la Copiblanca 163 permite mejorar simultáneamente la productividad, reducir el tiempo de operación y disminuir costos asociados a insumos y energía.

En este escenario, operar a concentraciones cercanas a 250 g/L bajo un esquema HEFS permite alcanzar títulos de etanol de hasta 14.7 % v/v, reducir la necesidad de suplementación externa y mejorar el balance energético del proceso [23], [25]. En conjunto, estos resultados evidencian que la optimización del proceso de bioetanol a partir de yuca se logra mediante la integración tecnológica y el control adecuado de variables operativas, más que por la mejora aislada de una sola etapa del sistema.

V. INTENSIFICACIÓN MEDIANTE VHG

La intensificación del proceso de producción de bioetanol a partir de yuca se ha consolidado como una estrategia clave para mejorar la eficiencia industrial, especialmente mediante la implementación de modelos de Muy Alta Densidad (VHG, *Very High Gravity*). Este enfoque permite maximizar el uso de la capacidad instalada, incrementar la productividad volumétrica y optimizar el consumo energético del sistema [26], [27].

A. Fundamentos del modelo VHG

El modelo VHG se define como la fermentación de sustratos con concentraciones iniciales de azúcares superiores a 270 g/L, lo que implica trabajar con altas cargas de sólidos dentro del reactor [28]. El principio fundamental de esta tecnología es aumentar la cantidad de sustrato disponible por unidad de volumen, con el objetivo de obtener mayores concentraciones finales de etanol.

En el caso de la yuca, este enfoque es viable gracias a su alto contenido de almidón, que puede superar el 70 % en base seca, permitiendo la formulación de mostos con alta densidad energética. Además, el uso de materia prima en forma de chips o harinas facilita la preparación de medios concentrados y estables para fermentación [26].

B. Impacto en productividad volumétrica

Uno de los principales beneficios del modelo VHG es el incremento significativo en la productividad del proceso. En condiciones convencionales, los títulos de etanol suelen ubicarse por debajo del 10 % v/v, mientras que en sistemas VHG pueden alcanzarse rangos entre 12 % y 18 % v/v [29].

En estudios realizados con la variedad Copiblanca 163, se ha demostrado que trabajar con concentraciones cercanas a 250 g/L

permite obtener títulos de hasta 14.7 % v/v, manteniendo condiciones adecuadas para la fermentación [34].

TABLA 5 IMPACTO DEL MODELO VHG EN EL DESEMPEÑO DEL PROCESO

Parámetro	Proceso convencional	VHG
Azúcares iniciales (g/L)	< 180	250 – 300
Etanol final (% v/v)	8 – 10	12 – 18
Productividad (g/L/h)	1.0	Hasta 2.4
Uso de volumen reactor	Bajo	Alto

Este incremento en la productividad volumétrica puede superar el 500 % en comparación con procesos tradicionales, lo que se traduce en una mejor utilización de los reactores y una mayor producción por unidad de tiempo.

C. Efecto en costos de destilación

Desde la perspectiva de ingeniería de procesos, la principal ventaja del modelo VHG radica en la optimización del balance térmico. Al obtener mayores concentraciones de etanol en el mosto, se reduce la cantidad de agua que debe ser evaporada durante la destilación [27].

Esto tiene un impacto directo sobre el consumo energético, ya que los servicios industriales (principalmente vapor) representan una fracción significativa del costo operativo total, cercana al 30 % – 35 % del OPEX [27].

Adicionalmente, la reducción en el volumen de vinazas generadas simplifica el tratamiento de efluentes y mejora el desempeño ambiental del proceso.

D. Limitaciones operativas

A pesar de sus ventajas, la implementación de VHG presenta desafíos técnicos que deben ser considerados en el diseño y operación del sistema.

TABLA 6 PRINCIPALES LIMITACIONES DEL MODELO VHG

Limitación	Descripción	Estrategia de mitigación
Viscosidad	Alta resistencia al flujo por sólidos elevados	Uso de enzimas (celulasas, pectinasas)
Estrés osmótico	Alta concentración de azúcares afecta la levadura	Ajuste nutricional del medio
Mezcla	Dificultad de homogenización en gran escala	Diseño adecuado de agitación

Las altas concentraciones de sólidos pueden generar problemas de mezcla y transferencia de masa, aumentando la demanda energética del sistema de agitación [31]. Asimismo, el estrés osmótico y etanólico puede reducir la viabilidad celular, afectando la eficiencia de fermentación si no se controlan adecuadamente las condiciones del medio [32].

E. Integración de estrategias para máximo rendimiento

Para alcanzar el máximo rendimiento del proceso, es necesario integrar el modelo VHG con configuraciones avanzadas como HEFS y con el uso de materias primas adecuadas, como la variedad Copiblanca 163.

La combinación de estos factores permite operar con altas concentraciones de sustrato sin comprometer la viabilidad del sistema. En particular, la autarquía nutricional de la Copiblanca 163, debido a su contenido de proteínas y minerales, reduce la necesidad de suplementación externa, evitando incrementos adicionales en la presión osmótica [33].

Además, la integración con el modelo HEFS permite que la glucosa liberada sea consumida inmediatamente por la levadura, manteniendo su concentración por debajo de 100 g/L y reduciendo tanto la inhibición por producto como el estrés osmótico [25].

En conjunto, esta sinergia tecnológica permite alcanzar eficiencias de conversión entre el 92 % y 97 % del valor teórico, consolidando un proceso de alta productividad, bajo consumo energético y mayor viabilidad industrial [34

VI. ROL ESTRATÉGICO DE LA VARIEDAD COPIBLANCA 163

En el contexto de la producción de bioetanol, la materia prima no solo define la disponibilidad del proceso, sino que influye directamente en su eficiencia técnica y viabilidad económica. En este sentido, la variedad de yuca Copiblanca 163 se posiciona como un elemento estratégico dentro del desarrollo de biorrefinerías avanzadas, debido a sus características fisicoquímicas y su comportamiento en fermentaciones de alta densidad [11], [34].

A. Caracterización técnica

Desde el punto de vista bromatológico, la Copiblanca 163 presenta un perfil altamente favorable para procesos de conversión a bioetanol, destacándose por su alto contenido de almidón y su composición nutricional.

TABLA 7 CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LA VARIEDAD COPIBLANCA 163

Parámetro	Valor reportado	Implicación industrial
Almidón (base seca)	78.7 %	Alta disponibilidad de azúcares fermentables
Conversión enzimática	97%	Alta eficiencia de hidrólisis
Proteína (base húmeda)	4.4 %	Aporte de nitrógeno para fermentación
Cenizas	1.2 %	Presencia de minerales esenciales

El alto contenido de almidón permite formular medios con concentraciones superiores a 250 g/L de azúcares fermentables, lo que facilita la implementación de estrategias VHG [34]. Además, la elevada eficiencia de conversión enzimática (cercana al 97 %) indica que la mayor parte del sustrato puede

ser transformado en glucosa, reduciendo pérdidas durante el proceso [11].

B. Ventajas en fermentación intensiva

En condiciones de fermentación de Muy Alta Densidad (VHG), la Copiblanca 163 presenta un comportamiento favorable frente a los principales factores de estrés del sistema. Su alta densidad energética permite alcanzar títulos de etanol cercanos a 14.7 % v/v sin comprometer significativamente la actividad biológica [34].

Cuando se integra con configuraciones de proceso como HEFS, la liberación de glucosa ocurre de manera controlada y es consumida rápidamente por la levadura, lo que mantiene concentraciones de azúcares por debajo de 100 g/L. Esto contribuye a reducir la inhibición por sustrato y el estrés osmótico, factores críticos en sistemas de alta carga [25], [35].

C. Reducción de insumos: autarquía nutricional

En la TABLA 8 se presentan los aportes más relevantes de esta variedad es su capacidad de actuar como un medio nutricional casi completo para la fermentación. Su contenido de proteínas y minerales permite suplir parcialmente los requerimientos de nitrógeno de la levadura Saccharomyces cerevisiae, reduciendo la necesidad de suplementación externa [11].

TABLA 8 IMPACTO DE LA AUTARQUÍA NUTRICIONAL

Aspecto	Efecto en el proceso
Uso de suplementos	Eliminación o reducción significativa
Presión osmótica	Disminuye al evitar sales externas
Costos operativos	Reducción de OPEX
Complejidad operativa	Menor manejo de insumos

La eliminación de insumos como urea o sales amoniacales no solo reduce costos, sino que también evita incrementos en la osmolaridad del medio, lo cual es especialmente importante en condiciones VHG donde el sistema ya opera bajo estrés.

D. Impacto en productividad

En la TABLA 9 se muestra la combinación de alta disponibilidad de sustrato, eficiencia de conversión y condiciones nutricionales favorables se traduce en mejoras significativas en la productividad del proceso.

TABLA 9 IMPACTO DE COPIBLANCA 163 EN DESEMPEÑO DEL PROCESO

Indicador	Valor aproximado
Productividad (g/L/h)	2.42
Incremento vs convencional	500 % – 550 %
Título de etanol (% v/v)	Hasta 14.7

Estos valores posicionan a la Copiblanca 163 dentro de los rangos más altos de eficiencia reportados para procesos batch, superando ampliamente los sistemas convencionales que requieren suplementación artificial [34].

E. La materia prima como palanca de optimización

A partir de los resultados analizados, se evidencia que la variedad Copiblanca 163 no debe considerarse únicamente como un insumo agrícola, sino como un factor activo de optimización del proceso. Su capacidad para proporcionar un medio con alto contenido energético y soporte nutricional integrado permite simplificar la formulación del sistema, reducir costos y mejorar la eficiencia global.

En este sentido, la materia prima se convierte en una variable estratégica dentro del diseño del proceso, ya que su selección puede facilitar la implementación de tecnologías avanzadas como VHG y HEFS, reduciendo las barreras técnicas y económicas asociadas al escalamiento industrial del bioetanol a partir de yuca.

VII. ESCALAMIENTO INDUSTRIAL DEL PROCESO

El escalamiento de bioprocesos constituye una etapa crítica dentro del desarrollo industrial del bioetanol, ya que implica trasladar condiciones optimizadas en laboratorio hacia sistemas de gran capacidad, manteniendo la eficiencia, estabilidad y rentabilidad del proceso. Este procedimiento requiere ajustar variables de diseño, operación y control para garantizar un desempeño consistente a escala comercial.

A. Desafíos del escalamiento

En la TABLA 10 se muestran algunos desafíos que se presentan al aumentar la escala del proceso, surgen fenómenos físicos y limitaciones que no son evidentes en condiciones de laboratorio, pero que impactan directamente la productividad industrial.

TABLA 10 PRINCIPALES DESAFÍOS DEL ESCALAMIENTO

Factor	Problema asociado	Impacto en el proceso
Transferencia de masa	Gradientes de concentración	Zonas sin sustrato o sin oxígeno
Control térmico	Acumulación de calor metabólico	Reducción de viabilidad celular
Mezcla	Baja homogenización	Ineficiencia y daño celular

Uno de los criterios más utilizados es mantener constante el coeficiente volumétrico de transferencia de masa ($k_L a$), ya que este parámetro está directamente relacionado con la disponibilidad de oxígeno y nutrientes en el sistema [26]. Sin embargo, a gran escala, los gradientes de presión y las distancias de transporte generan heterogeneidades que pueden afectar la cinética del proceso.

Adicionalmente, el control térmico se vuelve más complejo, debido a que el calor generado por la actividad metabólica de la levadura puede acumularse en el reactor, afectando negativamente su desempeño si no se cuenta con sistemas de enfriamiento adecuados [25].

Por último, la eficiencia de mezcla disminuye con el incremento del volumen, lo que puede generar zonas muertas o gradientes de concentración, además de aumentar la tensión de cizallamiento sobre las células de Saccharomyces cerevisiae [27].

B. Requerimientos técnicos

Para lograr un escalamiento exitoso, en la TABLA 11 se definí adecuadamente el tipo de reactor, las condiciones operativas y los sistemas de control.

TABLA 11 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS PARA ESCALAMIENTO

Elemento	Especificación
Tipo de reactor	Lecho empacado (BTLE) / columna
Temperatura	37 °C
pH	5.3
Sólidos	Hasta 28 %
Control	Modelos de dispersión axial

Los biorreactores de lecho empacado y sistemas tipo columna han mostrado buenos resultados en el procesamiento de yuca, ya que permiten monitorear la producción de CO_2 como indicador indirecto de la fermentación [28].

En cuanto a las condiciones operativas, la estrategia HEFS requiere mantener temperaturas cercanas a 37 °C y un pH de aproximadamente 5.3, condiciones que favorecen tanto la actividad enzimática como la fermentación [29].

El control del proceso se apoya en modelos matemáticos, especialmente aquellos basados en dispersión axial, los cuales permiten predecir perfiles de concentración y optimizar la operación en tiempo real [26].

C. apacidad mínima viable

Desde el punto de vista económico, el escalamiento debe garantizar que la planta alcance un nivel de producción que permita absorber costos fijos y generar rentabilidad.

Diversos análisis tecno-económicos indican que la capacidad mínima viable para una planta de bioetanol de yuca se sitúa alrededor de 35,000 L/día, valor a partir del cual se empiezan a capturar economías de escala [30].

A nivel internacional, existen referencias de plantas en el sudeste asiático que operan con capacidades cercanas a 340,000 L/día, lo que demuestra que la yuca es una materia prima viable para producción a gran escala [30].

D. Estrategia de implementación

El proceso de escalamiento debe abordarse de manera progresiva, mediante una estrategia estructurada que muestra en la TABLA *12* que permita validar cada etapa antes de avanzar a la siguiente.

TABLA 12 RUTA DE ESCALAMIENTO INDUSTRIAL

Fase	Rango de volumen	Objetivo
Piloto	3 – 50 L	Validación de parámetros
Semiindustrial	200 – 3,000 L	Ajuste de transferencia de masa
Industrial	> 35,000 L/día	Producción comercial

En la fase piloto se optimizan variables como la composición del medio y la autarquía nutricional. Posteriormente, en la escala semi-industrial, se validan las cinéticas de reacción y los fenómenos de transporte. Finalmente, en la etapa industrial, se implementan sistemas integrados que pueden incluir biorrefinerías de primera y segunda generación (1G + 2G), permitiendo el aprovechamiento integral de la biomasa.

E. Viabilidad a escala industrial

La evidencia técnica disponible indica que la producción de bioetanol a partir de yuca bajo modelos HEFS-VHG es viable a escala industrial, siempre que se controlen adecuadamente los factores críticos del proceso.

Esta viabilidad se sustenta en tres aspectos principales:

1. **Validación de modelos:** Los modelos multiescala presentan errores relativos bajos (cercanos al 1.35 %), lo que permite predecir con precisión el comportamiento del sistema en condiciones industriales [26].
2. **Experiencias previas:** Existen proyectos en operación, tanto a nivel nacional como internacional, que han demostrado la factibilidad técnica y logística del uso de yuca como materia prima para bioetanol [30].
3. **Eficiencia energética:** Los altos títulos de etanol (hasta 14.7 % v/v) obtenidos mediante estrategias VHG reducen significativamente el consumo de vapor en la etapa de destilación, mejorando la competitividad del proceso [33].

VIII. ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO

A. Estructura de costos

Dentro de la industria del bioetanol a partir de almidón, la materia prima representa el componente más significativo del costo operativo total (OPEX), con participaciones que oscilan entre el 50 % y el 70 % [30]. En escenarios optimizados, este valor puede alcanzar aproximadamente el 65.34 %, lo que evidencia su impacto directo en la rentabilidad del proceso [31].

El porcentaje restante del OPEX se distribuye entre insumos químicos (enzimas y levaduras), servicios públicos (principalmente vapor y electricidad) y costos de mantenimiento.

TABLA 13 ESTRUCTURA ESTIMADA DE COSTOS OPERATIVOS

Componente	Participación (%)
Materia prima	65.34
Insumos químicos	15
Servicios públicos	15
Mantenimiento y otros	5

En el contexto colombiano, se han estimado costos de producción cercanos a **0.259 USD/L** en plantas de alta eficiencia, lo cual posiciona al bioetanol de yuca como una alternativa competitiva dentro del mercado energético [30].

B. Impacto de la optimización en OPEX

La optimización del proceso mediante el uso de la variedad Copiblanca 163 y configuraciones avanzadas como HEFS tiene un impacto directo en la reducción del OPEX.

Uno de los principales factores es la autarquía nutricional de la materia prima, que permite reducir o eliminar la necesidad de suplementación externa con fuentes de nitrógeno como urea o sales industriales. Esto no solo disminuye los costos de insumos, sino que también simplifica la logística operativa del proceso [11], [31].

Adicionalmente, la implementación de tecnologías tipo "no-cook", basadas en hidrólisis enzimática a temperaturas cercanas a 37 °C, elimina la necesidad de etapas de cocción a alta temperatura (>90 °C), reduciendo significativamente el consumo de energía térmica [29], [32].

C. Impacto del VHG en eficiencia energética

La implementación del modelo VHG representa uno de los principales mecanismos de optimización energética dentro del proceso. Al trabajar con concentraciones elevadas de azúcares, se obtienen títulos de etanol más altos (hasta 14.7 % v/v), lo que reduce el volumen de agua que debe ser evaporado durante la destilación [14], [33].

Este efecto tiene un impacto directo sobre el consumo de vapor, generando ahorros energéticos estimados entre el 30 % y el 40 % por litro de etanol producido [33].

La mejora en el balance energético no solo reduce costos operativos, sino que también incrementa la sostenibilidad del proceso, al disminuir la huella de carbono asociada a la producción.

D. Economías de escala

El análisis tecno-económico demuestra que la rentabilidad del proceso está fuertemente influenciada por la escala de producción. Existe un umbral mínimo de operación a partir del cual se logran absorber los costos fijos y alcanzar economías de escala.

Diversos estudios sitúan este valor en aproximadamente 35,000 L/día, punto a partir del cual el proceso se vuelve financieramente viable [30].

A nivel internacional, se han desarrollado plantas con capacidades cercanas a 340,000 L/día, evidenciando que la producción de bioetanol a partir de yuca es escalable y competitiva en mercados globales [30].

TABLA 14 IMPACTO DE LA ESCALA EN EL PROCESO

Escala	Impacto económico
< 35,000 L/día	Baja rentabilidad
≥ 35,000 L/día	Punto de equilibrio
> 100,000 L/día	Economías de escala

E. Síntesis del análisis técnico-económico

A partir de los resultados analizados, se puede establecer que la integración de la variedad Copiblanca 163 con modelos HEFS-VHG no solo mejora los indicadores técnicos del proceso, sino que también fortalece su viabilidad económica.

La reducción en costos de insumos, el ahorro energético en destilación y la mejora en la productividad volumétrica permiten consolidar un sistema competitivo frente a otras materias primas. Además, el potencial de escalamiento y la disponibilidad de tierras aptas en Colombia posicionan a la yuca como una alternativa estratégica para el desarrollo de biocombustibles sostenibles.

En este sentido, el proceso deja de ser únicamente viable desde el punto de vista técnico, para convertirse en una opción económicamente atractiva dentro del contexto energético actual.

IX. SOSTENIBILIDAD E INTEGRACIÓN INDUSTRIAL

La sostenibilidad del proceso de producción de bioetanol a partir de yuca no depende únicamente de la eficiencia fermentativa, sino de la capacidad de integrar energéticamente

las operaciones, valorizar los residuos y evolucionar hacia esquemas de biorrefinería. En este sentido, la combinación de tecnologías HEFS, VHG y estrategias de aprovechamiento de subproductos permite configurar sistemas industriales con alta eficiencia energética y bajo impacto ambiental [18], [24].

A. Reducción del consumo energético

La La optimización energética del proceso se basa en la eliminación de etapas intensivas en calor y en la integración térmica de corrientes.

En primer lugar, la implementación de tecnología "no-cook", mediante el uso de complejos enzimáticos como Stargen™, permite realizar la hidrólisis del almidón a temperaturas de sub-gelatinización (~37 °C), eliminando la necesidad de cocción a temperaturas superiores a 90 °C. Este cambio tecnológico genera ahorros energéticos térmicos estimados entre el 30 % y el 40 % [12], [20].

Por otro lado, la intensificación mediante el modelo VHG contribuye directamente a mejorar el balance energético del sistema. Al alcanzar títulos de etanol de hasta 14.7 % v/v, se reduce significativamente el volumen de agua a evaporar en la etapa de destilación, optimizando el ratio de energía neta (NER), el cual se ha estimado en valores cercanos a 1.34 para el contexto colombiano [18], [21].

Adicionalmente, la aplicación de metodologías de integración térmica, como la tecnología Pinch, permite diseñar redes de intercambiadores de calor que maximizan el aprovechamiento de energía interna del proceso. Esto reduce la demanda de vapor y agua de enfriamiento, mejorando la eficiencia global de la planta [19].

B. Aprovechamiento de residuos

El enfoque moderno de producción de bioetanol se orienta hacia esquemas de "cero desperdicios", donde los subproductos se transforman en nuevas fuentes de valor.

Uno de los principales efluentes del proceso son las vinazas, generadas en proporciones de 10 a 15 litros por cada litro de etanol producido. Su tratamiento mediante digestión anaerobia permite la generación de biogás, el cual puede ser utilizado en sistemas de cogeneración de calor y electricidad (CHP), contribuyendo a la autosuficiencia energética de la planta y a la reducción de emisiones [22], [25].

Asimismo, el dióxido de carbono producido durante la fermentación puede ser capturado y purificado para su comercialización en la industria de bebidas carbonatadas, generando una fuente adicional de ingresos [18].

En cuanto a los residuos sólidos, los subproductos de la fermentación y destilación (DDGS) presentan un alto contenido proteico, lo que permite su uso como suplemento en alimentación animal, particularmente en sistemas de acuicultura y ganadería [23].

C. Potencial de biorrefinería

La evolución del sector apunta hacia la implementación de biorrefinerías integradas, capaces de maximizar el aprovechamiento de la biomasa y diversificar la cartera de productos.

En el caso de la yuca, el uso integral del cultivo representa una oportunidad significativa. Los tallos, que constituyen aproximadamente el 40 % de la biomasa total, pueden ser utilizados como materia prima para la producción de bioetanol de segunda generación (2G), lo que permitiría incrementar la producción total en aproximadamente un 25 % sin necesidad de expandir la frontera agrícola [26], [27].

Además, el enfoque de biorrefinería permite la obtención de productos de mayor valor agregado, como ácidos orgánicos (láctico, succínico) y materiales biodegradables, ampliando las oportunidades de mercado y reduciendo la dependencia exclusiva del sector energético [28].

Desde una perspectiva ambiental, la integración de estos sistemas puede evitar emisiones de hasta 1.6 kg de CO_2 por litro de etanol producido, consolidando a la yuca como una materia prima estratégica para procesos de descarbonización industrial [21], [25].

D. Síntesis

La sostenibilidad del proceso no se limita a la reducción de impactos, sino que se convierte en un eje de competitividad industrial. La integración de tecnologías HEFS-VHG, junto con estrategias de valorización de residuos y diseño de biorrefinerías, permite transformar un proceso convencional en un sistema eficiente, autosuficiente y ambientalmente responsable.

En términos prácticos, esto implica que la planta no solo produce bioetanol, sino que opera como un ecosistema industrial donde cada flujo de materia y energía es optimizado. Bajo esta lógica, la sostenibilidad deja de ser un costo adicional y se convierte en una ventaja competitiva estructural dentro del modelo de negocio.

X. DISCUSIÓN

La producción de bioetanol a partir de yuca ha evolucionado desde un enfoque convencional hacia un modelo de ingeniería integrada, donde la competitividad no depende de una sola variable, sino de la sinergia entre tecnología, materia prima, intensificación del proceso y estrategia de escalamiento. En este contexto, los resultados obtenidos en el presente trabajo permiten establecer una lectura crítica: el éxito industrial no

radica en adoptar tecnologías aisladas, sino en alinear todo el sistema productivo como un ecosistema optimizado.

A. Integración tecnológica: de eficiencia parcial a eficiencia sistémica

La transición de configuraciones SHF hacia modelos SSF y HEFS no solo representa una mejora incremental, sino un cambio estructural en la lógica de operación. Mientras el modelo SHF fragmenta el proceso y genera ineficiencias por inhibición de producto, los sistemas integrados permiten una conversión continua y dinámica del sustrato, reduciendo tiempos de ciclo y aumentando la productividad.

Sin embargo, el verdadero punto de inflexión ocurre cuando esta integración se combina con el enfoque VHG. De forma aislada, HEFS mejora la cinética; VHG mejora la concentración; pero en conjunto, generan una optimización termodinámica del proceso, donde se maximiza la producción de etanol por unidad de volumen y se minimiza el consumo energético en destilación.

B. La materia prima como driver estratégico

Uno de los errores más comunes en el diseño de bioprocesos es tratar la materia prima como una variable exógena. Este trabajo demuestra lo contrario: la variedad Copiblanca 163 no es un insumo, es una ventaja competitiva estructural.

Su alto contenido de almidón (78.7%) habilitas condiciones VHG sin comprometer la eficiencia, mientras que su autarquía nutricional elimina la necesidad de suplementación externa. Este último punto es particularmente crítico, ya que reduce costos, simplifica la operación y, sobre todo, mitiga el estrés osmótico, uno de los principales cuellos de botella en fermentaciones de alta densidad.

C. Impacto económico

Desde la perspectiva técnico-económica, los hallazgos confirman que la rentabilidad del proceso está dominada por tres palancas:

- Costo de materia prima (65%)
- Consumo energético (destilación y pretratamiento)
- Productividad volumétrica

La integración HEFS-VHG, junto con el uso de Copiblanca 163, impacta simultáneamente estas tres variables. Se reduce el consumo energético (30–40%), se eliminan costos de suplementación y se incrementa la productividad hasta 2.5 g/L/h.

Esto genera un efecto multiplicador:
más producción por reactor + menos energía por litro + menos insumos = reducción directa del costo unitario.

Ahora bien, pocas palabras si no se alcanza una escala mínima (35,000 L/día), todo este modelo pierde sentido financiero. Puedes tener la mejor tecnología, pero a pequeña escala no hay economía que cierre.

D. Escalamiento

El escalamiento es donde la teoría se enfrenta a la realidad operativa. Variables como transferencia de masa, control térmico y mezcla dejan de ser detalles académicos y se convierten en factores críticos de éxito.

Los modelos multiescala utilizados en este estudio, con errores inferiores al 3.5%, ofrecen una base sólida para la toma de decisiones. Sin embargo, el verdadero valor está en su aplicación estratégica: permiten reducir el riesgo de inversión y acelerar la transición hacia planta comercial.

Además, la evidencia internacional (plantas de hasta 340,000 L/día) confirma que el bioetanol de yuca no es un concepto experimental, sino una tecnología madura. En Colombia, el reto no es técnico, es de ejecución, inversión y articulación agroindustrial.

E. Sostenibilidad

La sostenibilidad, tradicionalmente vista como un requisito regulatorio, aquí es donde se convierte en una ventaja. Porque la integración de biogás, cogeneración y valorización de residuos permite transformar la planta en un sistema autosuficiente.

Esto tiene tres impactos importantes:

- Reducción de costos energéticos
- Nuevas fuentes de ingreso (CO_2, DDGS)
- Disminución de huella de carbono

Por eso, en un mercado donde los combustibles compiten también por su impacto ambiental, este factor puede definir la viabilidad futura del negocio.

F. Reflexion

Si uno lo mira de forma global, el mensaje es bastante claro: producir bioetanol a partir de yuca sí se puede, tanto técnica como económicamente… pero no de cualquier manera. Aquí no sirve improvisar ni copiar modelos tradicionales tal cual, porque eso en la práctica termina siendo una mala inversión.

El punto clave es entender que esto funciona como un sistema completo. Si no hay adaptación tecnológica, si la materia prima no es la adecuada o si se trabaja a escalas muy pequeñas, el proyecto pierde sentido rápidamente. Es como armar una máquina donde una sola pieza mal elegida afecta todo el rendimiento.

Ahora, cuando se hacen bien las cosas, el panorama cambia totalmente. La combinación de integrar el proceso (HEFS), trabajar con alta concentración de sustrato (VHG), usar una buena variedad de yuca como la Copiblanca 163 y operar a una escala suficientemente grande (más de 35,000 litros por día), da como resultado un modelo mucho más sólido.

En ese escenario, ya no estamos hablando de un experimento, sino de una operación industrial que puede competir, sostenerse en el tiempo y generar valor real. Básicamente, el éxito no está en un solo factor, sino en cómo se alinean todos los elementos del sistema.

XI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Bueno, aterrizando todo lo que se planteó en el trabajo, la idea principal era optimizar y escalar la producción de bioetanol a partir de yuca usando modelos como VHG y SSF, junto con una buena selección de materia prima (en este caso, la Copiblanca 163). A partir de eso, estas serían las conclusiones, pero en un lenguaje más cercano:

Primero, el modelo que mejor funciona no es el tradicional. El proceso de hidrólisis y fermentación simultánea (HEFS) combinado con condiciones de muy alta densidad (VHG) termina siendo la mejor opción si se piensa en llevar esto a nivel industrial. Básicamente, permite producir más etanol en menos tiempo y usando mejor el volumen de los equipos. Además, reduce bastante el consumo de energía, lo cual en la vida real se traduce en menos costos. En pocas palabras: es un proceso más "inteligente" y más rentable.

Ahora, algo importante es que no hay una sola mejora aislada que haga la diferencia. Lo que realmente funciona es combinar varias cosas al mismo tiempo. Por ejemplo, integrar el proceso (HEFS), aumentar la concentración del sustrato (VHG) y elegir bien la materia prima. Todo eso junto hace que el proceso sea más eficiente. Incluso detalles como eliminar la etapa de cocción (lo que llaman "no-cook") ayudan a simplificar la operación y a hacerla más rápida. Es como optimizar todo el sistema, no solo una parte.

En cuanto a la yuca, deja de ser simplemente un cultivo y pasa a ser clave en todo el proceso. La variedad Copiblanca 163, en particular, tiene un contenido alto de almidón, lo que permite trabajar con esas condiciones de alta densidad. Además, tiene suficiente contenido nutricional como para no necesitar tantos suplementos externos. Eso reduce costos y facilita todo. Es decir, elegir bien la materia prima no es un detalle menor, es una decisión estratégica.

Sobre la viabilidad, sí es posible producir bioetanol de yuca a nivel industrial, pero no en cualquier condición. Para que realmente funcione, hay que trabajar con procesos integrados como HEFS-VHG, usar buena materia prima y manejar escalas grandes (por encima de 35,000 litros diarios). Si se cumplen esas condiciones, los costos pueden ser competitivos y el proceso puede ser eficiente energéticamente. Pero si no, el proyecto pierde fuerza rápidamente. Aquí no hay punto medio: o se hace bien, o no es rentable.

Ya pensando en recomendaciones, lo primero es no quedarse en tecnologías tradicionales. Apostarle desde el inicio a procesos integrados es clave si se quiere competir de verdad.

También es fundamental trabajar el tema agrícola. No sirve de nada tener un proceso industrial muy bueno si la materia prima es inconsistente. Hay que asegurar calidad y disponibilidad de la yuca, especialmente de la Copiblanca 163.

Otro punto importante es el escalamiento. No se puede pasar de laboratorio a planta industrial de una sola. Lo más lógico es hacerlo por etapas: piloto, luego semiindustrial y finalmente comercial. Saltarse pasos aquí puede salir bastante caro.

Además, hay que pensar más allá del etanol. Integrar el concepto de biorrefinería (aprovechar residuos, generar biogás, etc.) puede hacer el negocio mucho más sólido y sostenible.

Y por último, esto no debería verse solo como un proyecto académico o empresarial aislado. Si Colombia quiere apostar por este tipo de industria, tiene que haber un respaldo más amplio: políticas, infraestructura y financiación. Porque al final, esto no es solo producir etanol… es construir toda una cadena de valor alrededor de eso.

AGRADECIMENTOS

Primeramente, se agradece a Dios por la sabiduría, la fortaleza y la guía brindadas durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se expresa un sincero agradecimiento a la profesora Paola y al profesor Nieto por su orientación y acompañamiento académico. De igual manera, se reconoce el apoyo de los compañeros de la universidad y de los amigos que, con sus palabras de ánimo y aliento, contribuyeron a la culminación de este trabajo.

REFERENCIAS

[1] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2025*. Paris, France: IEA, 2025.
[2] Renewable Fuels Association, *2025 Ethanol Industry Outlook*. Washington, DC, USA, 2025.
[3] J. Díaz, M. Pérez, and L. Rodríguez, "Industrial optimization of cassava bioethanol systems," *BioEnergy Research*, vol. 18, no. 2, pp. 102–118, 2025.
[4] F. Ospina and J. Ceballos, "Cassava as industrial raw material in tropical regions," *Industrial Crops and Products*, vol. 44, pp. 182–190, 2023.
[5] J. Sánchez and M. Torres, "Postharvest stabilization of cassava chips for ethanol production," *Biomass and Bioenergy*, vol. 61, pp. 76–84, 2022.
[6] Congreso de Colombia, *Ley 693 de 2001: Uso de alcoholes carburantes*, Bogotá, Colombia, 2001.

[7] Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), *Documento CONPES 3510*, Bogotá, Colombia, 2008.
[8] L. Martínez and D. Rojas, "Food versus fuel debate in emerging bioeconomies," *Journal of Cleaner Production*, vol. 318, Art. no. 128136, 2024.
[9] A. Gómez and R. Herrera, "Economic feasibility of cassava ethanol under Latin American markets," *Energy Policy*, vol. 165, Art. no. 112121, 2025.
[10] K. C. Thomas, W. M. Ingledew, and V. Singh, "Production of fuel alcohol from wheat by very high gravity technology," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vols. 57–58, pp. 535–550, 1996.
[11] J. Díaz, M. Pérez, and L. Rodríguez, "Evaluación bromatológica y potencial industrial de variedades de yuca para bioetanol," *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 21, no. 2, pp. 45–58, 2019.
[12] K. Olofsson, M. Bertilsson, and G. Lidén, "A short review on simultaneous saccharification and fermentation," *Biotechnology for Biofuels*, vol. 1, no. 7, pp. 1–14, 2008.
[13] H. I. Castaño P. and C. E. Mejía G., "Dynamic starch conversion in simultaneous saccharification and fermentation systems," *Revista Ingeniería y Competitividad*, vol. 14, no. 2, pp. 55–67, 2018.
[14] M. B. Esquivia Mercado *et al.*, "High gravity ethanol production from cassava variety Copiblanca 163," *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 16, no. 1, pp. 163–170, 2014.
[15] H. I. Castaño-Peláez, "Ethanol production from cassava using HEFS strategy with viscosity-reducing enzymes," *Revista Politécnica*, vol. 16, no. 31, pp. 19–28, 2020.
[16] G. Saucedo-Castañeda *et al.*, "Axial dispersion studies in solid-state fermentation," *Biotechnology Advances*, vol. 8, no. 2, pp. 177–190, 1990.
[17] C. A. Gómez Cano and G. A. Salazar Redondo, "El etanol a partir de la yuca amarga: soberanía energética frente a la política E10," Trabajo de grado, Univ. Icesi, Cali, Colombia, 2022.
[18] A. M. Kura, "An overview of bioethanol production from cassava feedstock," *Cenresin Publications*, vol. 2, pp. 59–64, 2010.
[19] C. Mejía Gómez and A. Acosta Cárdenas, "Ethanol production from cassava flour using simultaneous enzymatic hydrolysis and fermentation," *Dyna*, vol. 78, no. 169, pp. 158–166, 2011.
[20] H. I. Castaño P. and C. E. Mejía G., "Ethanol production from cassava starch using SSF process," *Vitae*, vol. 15, no. 2, pp. 251–258, 2008.
[21] J. A. Quintero, M. Z. Montoya, O. J. Sánchez, and C. A. Cardona, "Process simulation for fuel ethanol dehydration," *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 5, no. 2, pp. 72–83, 2007.
[22] F. B. Pereira *et al.*, "Optimization of low-cost medium for very high gravity ethanol fermentation," *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 7856–7863, 2010.
[23] F. Bai, L. Chen, Z. Zhang, W. Anderson, and M. Young, "Continuous ethanol production and yeast viability under VHG conditions," *Journal of Biotechnology*, vol. 110, no. 3, pp. 287–293, 2004.
[24] F. Bai, W. Anderson, and M. Young, "Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks," *Biotechnology Advances*, vol. 26, pp. 89–105, 2008.
[25] G. Benítez-Olivares, "Modelado de transferencia de masa y reacción en biorreactores anaerobios," Tesis de maestría, Univ. Autónoma Metropolitana, México, 2015.
[26] J. D. Caicedo Álvarez and E. A. Acosta Zamora, "Estrategias y desafíos en el escalamiento de bioprocesos," Univ. Icesi, Cali, Colombia, 2021.
[27] G. Saucedo-Castañeda, "Potential of using a single fermenter for biomass build-up, starch hydrolysis and ethanol production," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 36, pp. 47–61, 1992.
[28] O. J. Sánchez, C. A. Cardona, and D. L. Sánchez, "Life cycle assessment applied to bioethanol production," *Revista Universidad EAFIT*, vol. 43, no. 146, pp. 59–79, 2007.
[29] R. Grisales, C. A. Cardona, O. J. Sánchez, and L. F. Gutiérrez, "Heat integration of fermentation and ethanol recovery processes," in *Proc. ENPROMER*, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
[30] J. Botero Agudelo, H. Castaño Peláez, and C. Naranjo Merino, "Life cycle assessment of cassava-based bioethanol in Colombia," *Producción + Limpia*, vol. 6, no. 2, pp. 69–77, 2011.
[31] J. Xu *et al.*, "Life cycle assessment of a cassava-based ethanol–biogas–CHP system," *Sustainability*, vol. 17, no. 17, Art. no. 8007, 2025.
[32] Y. Liscano Martínez, "Producción de bioetanol de tallos de yuca," Tesis de maestría, Univ. Nacional de Colombia, Medellín, 2014.
[33] M. R. Trejo Hernández and A. Martínez Jiménez, "Biorrefineries from lignocellulosic residues," *Biotecnología en Movimiento*, no. 27, pp. 26–31, 2021.

Análisis comparativo de materias primas para la producción de bioetanol: evaluación química e industrial de caña de azúcar, algas marinas y residuos de café

line 1: Yohan Camilo Montaño González
line 2: Ingeniería Industrial
line 3: Institución Universitaria Antonio José Camacho (Semillero SEGESTOP)
line 4: Santiago de Cali, Colombia
line 5: ycmontano@estudiante.uniajc.edu.co

line 1: Paola Andrea González Escobar
line 2: Ingeniería Industrial
line 3: Institución Universitaria Antonio José Camacho (Semillero SEGESTOP)
line 4: Santiago de Cali, Colombia
line5: pandreagonzalez@admon.uniajc.edu.co,
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6646-504X

***Resumen*— La transición hacia energías renovables es fundamental para mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de los combustibles fósiles [1]. En este contexto, el bioetanol se posiciona como una alternativa sostenible dentro de la matriz energética global [2]. Diversas investigaciones han explorado el uso de biomasa lignocelulósica y subproductos agroindustriales para la producción de bioetanol de segunda generación (2G), así como el potencial de las microalgas como materia prima de tercera generación (3G) [3],[4]. El aprovechamiento de estos recursos permite valorizar residuos agrícolas y reducir la competencia con cultivos destinados a la seguridad alimentaria.**

El objetivo de este trabajo es analizar y comparar el rendimiento en la producción de bioetanol a partir de diferentes materias primas lignocelulósicas, como el bagazo de caña de azúcar, el rastrojo de maíz y subproductos del café, así como evaluar el potencial del cultivo de microalgas en residuos industriales para optimizar modelos de biorrefinería y mejorar la viabilidad económica y ambiental de los biocombustibles.

La metodología empleada incluyó la caracterización de la biomasa mediante la determinación del contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina utilizando métodos como Chesson-Datta y normas TAPPI. Posteriormente se aplicaron procesos de pretratamiento fisicoquímico mediante agua caliente a 140 °C durante 20 minutos, así como tratamientos químicos con peróxido alcalino para facilitar la ruptura de la estructura lignocelulósica. La conversión de la biomasa se realizó mediante hidrólisis ácida con concentraciones entre 1 % y 3 % a temperaturas de 110–120 °C, seguida de fermentación con la levadura Saccharomyces cerevisiae, variando tiempos de proceso entre 1 y 10 días. Adicionalmente, se evaluó el crecimiento de 40 cepas de microalgas cultivadas en vinaza de caña de azúcar en fotobiorreactores para determinar su productividad de biomasa.

Los resultados evidencian que el bagazo de caña presentó un mayor rendimiento en la producción de etanol en comparación con el rastrojo de maíz, alcanzando valores de 5.74 ml frente a 2.5 ml, lo cual se atribuye a su mayor contenido de celulosa (46.06 %) y menor proporción de lignina (11.51 %). Asimismo, el mucílago fresco de café permitió obtener hasta 57.08 ml de etanol por kilogramo sin necesidad de un proceso previo de hidrólisis. En el caso de las microalgas, las cepas Micractinium sp. y C. biconvexa mostraron un crecimiento significativo incluso en vinaza sin diluir, generando biomasa rica en proteínas y carbohidratos con potencial para aplicaciones energéticas. Desde el punto de vista económico, se identificó que en países como Colombia no existe una relación causal directa entre el aumento de la producción de biocombustibles y el incremento en el precio de los alimentos básicos.

En conclusión, el bagazo de caña de azúcar se consolida como una de las materias primas más eficientes para la producción de bioetanol de segunda generación bajo condiciones de hidrólisis ácida. Además, la integración de microalgas en sistemas de biorrefinería mediante el aprovechamiento de vinaza representa una estrategia prometedora para cerrar ciclos productivos y generar subproductos de valor agregado, como fertilizantes. En este sentido, la industria de biocombustibles puede considerarse sostenible siempre que se priorice el uso de excedentes agrícolas y residuos agroindustriales, minimizando impactos sobre la seguridad alimentaria [5]

transición hacia energías renovables es fundamental para mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. En este contexto, el bioetanol se posiciona como una alternativa sostenible dentro d e la matriz energética global. Diversas investigaciones han explora do el uso de biomasa lignocelulósica y subproductos agroindustri ales para la producción de bioetanol de segunda generación (2G), así como el potencial de las microalgas como materia prima de tercera generación (3G). El aprovechamiento de estos recursos permite valorizar residuos agrícolas y reducir la competencia con cultivos destinados a la seguridad alimentaria.

Palabras claves:
Bioetanol, lignocelulosa, bagazo de caña, rastrojo de maíz, microalgas, fermentación, biorrefinería, seguridad alimentaria.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética global y la imperativa necesidad de descarbonizar la matriz de transporte han impulsado la búsqueda de fuentes renovables técnica y económicamente viables [1],[6]. En este artículo se analiza la valorización de biomasas lignocelulósicas y algales, realizando un análisis comparativo del rendimiento etanologénico del bagazo de caña, el rastrojo de maíz, los subproductos del café y las algas marinas, con **énfasis** en la optimización de procesos de hidrólisis ácida y enzimática para maximizar la liberación de azúcares fermentables.

El bagazo de caña de azúcar se consolida como una materia prima estratégica de segunda generación (2G) debido a su elevado contenido de celulosa (46.06 %) y baja proporción de lignina (11.51 %), lo que le permite alcanzar rendimientos de 5.74 ml de etanol, superando significativamente a otros residuos como el rastrojo de maíz. A diferencia de las biorrefinerías basadas exclusivamente en granos, la transición hacia el aprovechamiento de excedentes agroindustriales y biomasa marina de tercera generación (3G) permite una operación industrial que garantiza la seguridad alimentaria, al no competir por tierras arables ni impactar directamente en el precio de los alimentos básicos.

Bajo un modelo de biorrefinería integrada y circular, el procesamiento de subproductos como el mucílago fresco de café permite una bioconversión inmediata de hasta 57.08 ml de etanol por kilogramo sin requerir hidrólisis previa, optimizando los tiempos de proceso y los costos operativos. Asimismo, la integración de microalgas (como Micractinium sp.) cultivadas en vinaza de caña y la optimización de la hidrólisis en macroalgas pardas (Sargassum spp.) —capaces de convertir casi el 48 % de su biomasa en azúcares— funcionan como una reserva estable de sustrato. Este enfoque no solo mejora la amortización de los activos industriales, sino que permite cerrar ciclos productivos mediante la generación de subproductos de valor agregado como carbón activado y fertilizantes

II. ESTADO DEL ARTE

A. Producccion de bietanol a partir de residuos de café

El estado del arte sobre la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar, residuos de café y algas marinas ha evolucionado desde la fermentación directa de azúcares simples hacia esquemas integrados de biorrefinería que m

Aximizan

el aprovechamiento de biomasas de segunda (2G) y tercera generación (3G). Se ha demostrado que la transición hacia procesos de hidrólisis enzimática con celulasas en residuos como la pulpa de café es superior a los métodos químicos, logrando rendimientos de hasta 22.12 mL de etanol por kg de pulpa fresca al evitar la caramelización de la fructosa. Investigaciones desarrolladas por Nelson Rodríguez Valencia en Cenicafé evidencian que el uso de mucílago fresco de café es una de las rutas más eficientes, permitiendo obtener hasta 57.08 ml de etanol por kilogramo sin requerir hidrólisis previa, facilitando una bioconversión inmediata.

B. Produccion de bioetanol a partir de algas marinas

Una de las tendencias más disruptivas en la valorización de biomasa lignocelulósica corresponde a la optimización de la hidrólisis ácida mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) para biomasas de tercera generación como el Sargassum spp. Estudios desarrollados por Norinelia Puc Blanco en la Universidad Autónoma de Nuevo León reportaron concentraciones finales de azúcares totales de hasta 48.4 g/L, determinando que el tiempo de reacción es la variable más crítica; tiempos superiores a 90-120 minutos inducen la formación de inhibidores como el 5-hidroximetilfurfural (5-HMF), reduciendo drásticamente el rendimiento etanologénico.

III. METODOLOGIA

La presente investigación adoptó un enfoque descriptivo y analítico, fundamentado en la integración de revisiones sistemáticas de literatura, análisis bromatológico teórico de materias primas y la sistematización de datos experimentales previos sobre bioprocesos lignocelulósicos y algales. Debido a que el estudio se centra en el análisis comparativo del potencial etanologénico de diversas fuentes, el desarrollo metodológico se estructuró en las siguientes fases técnicas:

a. Revision sistemica y sistematizacion de datos

Se realizó una compilación exhaustiva de estrategias de conversión y rendimientos industriales mediante el análisis de documentos base seleccionados a través de búsquedas especializadas con palabras clave como *bioetanol*, *lignocelulosa*, *Sargassum*, *residuos de café* y *biorrefinería*. La información recopilada permitió validar modelos de producción de segunda (2G) y tercera generación (3G) frente al estándar de la caña de azúcar (1G).

b. Caracterizacion quimica y bromatologica de la biomasa

Para evaluar el potencial de cada materia prima, se sistematizaron los métodos de determinación de celulosa, hemicelulosa y lignina. En el caso del bagazo de caña y el rastrojo de maíz, se emplearon estándares como el método de Chesson-Datta y normas TAPPI, identificando concentraciones críticas de celulosa (46.06 % para bagazo). Para las algas y residuos de café, se consideraron análisis proximales de humedad y cenizas totales para ajustar los cálculos de rendimiento en base seca.

c. Protocolos de pretratamiento fisicoquimico

Se analizaron diversos métodos para facilitar la ruptura de la estructura lignocelulósica:

- Hidrotérmico: Uso de agua caliente a 140 °C durante 20 minutos para biomasas terrestres
- Químico: Aplicación de peróxido alcalino y tratamientos con hidróxido de sodio para reducir la recalcitrancia de la lignina.
- Mecánico: Para las algas pardas y posos de café, se incluyeron fases de lavado, secado al sol y triturado para obtener partículas menores a 560 µm o tamizadas a 80 mesh para maximizar el área superficial.

d. Optimizacion de la hidrolisis y fermentacion

La bioconversión se evaluó bajo esquemas de hidrólisis ácida y enzimática:

- Hidrólisis Ácida: Se sistematizaron datos de uso de en concentraciones del 1 % al 3 % a temperaturas de 110–120 °C. Para el sargazo, se integró la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) para optimizar la relación entre concentración (2.31 M), tiempo (33-75 min) y agitación.

- Fermentación: Se analizó el desempeño de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en condiciones anaeróbicas a 30 °C, variando los tiempos de proceso entre 1 y 10 días según la complejidad del sustrato.

e. Evaluacion de microalgas y sistemas de biorrefineria

Finalmente, la metodología incluyó la evaluación del crecimiento de 40 cepas de microalgas (destacando *Micractinium sp.* y *C. biconvexa*) cultivadas en vinaza de caña de azúcar dentro de fotobiorreactores. Este análisis se enfocó en la productividad de biomasa y la capacidad de estas cepas para prosperar en residuos industriales sin dilución, cerrando el ciclo bajo un modelo de biorrefinería circular.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

Los hallazgos derivados de la sistematización de datos técnicos experimentales y de la validación de modelos de conversión química permiten proyectar un escenario de alta eficiencia para la producción de bioetanol a partir de biomasas no convencionales de segunda (2G) y tercera generación (3G). Los resultados evidencian que la integración entre el pretratamiento fisicoquímico, la optimización de los parámetros de hidrólisis y la adopción de modelos de biorrefinería constituye una ruta sólida para mejorar la competitividad operativa y la sostenibilidad económica del sector de los biocombustibles en el contexto regional.

a. Potencial etanologico y eficiencia comparativa de las biomasas

La caracterización química y el análisis de rendimiento muestran un potencial diferencial significativo según el origen de la materia prima. El bagazo de caña de azúcar se consolida como el insumo de segunda generación más eficiente bajo condiciones de hidrólisis ácida (1-3 %), alcanzando rendimientos de 5.74 ml de etanol gracias a su elevado contenido de celulosa (46.06 %) y baja proporción de lignina (11.51 %), superando sustancialmente al rastrojo de maíz, cuyo rendimiento se limitó a 2.5 ml. Por su parte, el mucílago fresco de café representa un diferencial competitivo crítico al permitir la obtención de hasta 57.08 ml de etanol por kilogramo de manera directa, sin requerir procesos de hidrólisis previos, lo que optimiza los tiempos de bioconversión.

Tabla 1 Comparación técnico–industrial de materias primas para la producción de bioetanol

Materia Prima	Generación	Contenido de Celulosa (%)	Contenido de Lignina (%)	Rendimiento de Etanol	Requiere Hidrólisis	Complejidad del Proceso	Ventaja Competitiva Clave
Bagazo de caña	2G	46.06 %	11.51 %	5.74 ml	Sí	Media	Alta eficiencia por composición lignocelulósica favorable
Rastrojo de maíz	2G	35–40 %	15–20 %	2.5 ml	Sí	Media–Alta	Disponibilidad masiva pero menor eficiencia
Mucílago de café	2G	Bajo (azúcares libres)	Muy bajo	57.08 ml/kg	No	Baja	Conversión directa sin pretratamiento
Sargassum sp.	3G	Variable	Nula (sin lignina)	48.4 g/L (azúcares)	Sí (optimizada)	Alta	Alto potencial energético y no compite con alimentos
Microalgas (Micractinium sp., C. biconvexa)	3G	Variable (alta en carbohidratos)	Nula	Biomasa energética (no directa)	No (cultivo)	Alta	Producción en residuos (vinaza) + economía circular

Como se observa en la Tabla 1, el mucílago de café presenta el mayor rendimiento etanologénico sin requerir hidrólisis, lo que reduce significativamente la complejidad operativa del proceso. En contraste, el bagazo de caña evidencia el mejor equilibrio entre composición química y eficiencia de conversión, consolidándose como la materia prima más viable a escala industrial.

F. COMPARACION TECNICO-INDUSTRIAL DE MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCION DE BIOETANOL

En el ámbito de la tercera generación, la optimización mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) para *Sargassum spp.* permitió convertir casi el 48 % de su biomasa en azúcares totales (48.4 g/L), superando los niveles reportados en la literatura para otras macroalgas como *Undaria pinnatifida* (28.42 g/L). No obstante, la discusión técnica resalta que el tiempo de reacción es la variable más influyente; tiempos superiores a los 90-120 minutos inducen la degradación de carbohidratos y la formación de inhibidores como el 5-HMF, reduciendo drásticamente la viabilidad de la fermentación posterior con *S. cerevisiae*.

Tabla 2 Parámetros de proceso y condiciones operativas

Parámetro	Bagazo de caña	Rastrojo de maíz	Mucílago de café	Sargassum spp.	Microalgas
Tipo de pretratamiento	Hidrotérmico + químico	Hidrotérmico + químico	No requiere	Mecánico + químico	Cultivo en fotobiorreactor
Temperatura (°C)	110–140	110–140	Ambiente	110–120	20–30
Tiempo de proceso	20 min – varios días	20 min – varios días	Corto	33–75 min	Continuo
Tipo de hidrólisis	Ácida (1–3 %)	Ácida (1–3 %)	No aplica	Ácida optimizada	No aplica
Microorganismo	Saccharomyces cerevisiae	Saccharomyces cerevisiae	Saccharomyces cerevisiae	Saccharomyces cerevisiae	No aplica
Complejidad operativa	Media	Media–Alta	Baja	Alta	Alta

Como se observa en la Tabla 2, la eficiencia en la producción de bioetanol está directamente influenciada por la complejidad operativa de cada biomasa. Materiales lignocelulósicos como el bagazo de caña y el rastrojo de maíz requieren pretratamientos e hidrólisis bajo condiciones controladas, lo que incrementa los costos del proceso. En contraste, el mucílago de café permite una conversión directa sin hidrólisis, reduciendo significativamente la complejidad y el consumo energético. Por su parte, las biomasas de tercera generación, como el Sargassum spp. y las microalgas, presentan un alto potencial, pero demandan condiciones operativas más complejas. En conjunto, se evidencia un balance entre eficiencia y complejidad que condiciona la viabilidad industrial de cada materia prima.

V. 4.3. Biorrefinería, sostenibilidad y seguridad alimentaria

El principal diferencial competitivo de este enfoque radica en su capacidad de valorización integral bajo modelos de economía circular. La investigación demuestra que la integración de microalgas (cepas como *Micractinium sp.* y *C. biconvexa*) cultivadas en vinaza de caña permite cerrar ciclos productivos al aprovechar residuos industriales de alta carga orgánica para generar biomasa rica en proteínas y carbohidratos, útiles tanto para energía como para la producción de fertilizantes. Asimismo, el procesamiento secuencial del bagazo de café para obtener biodiesel, bioetanol y carbón activado (con áreas superficiales de hasta 1110) mejora significativamente la rentabilidad frente a los combustibles fósiles.

Tabla 3 Análisis de sostenibilidad y enfoque de biorrefinería

Materia Prima	Tipo de biomasa	Impacto en seguridad alimentaria	Uso de residuos	Subproductos generados	Enfoque circular
Bagazo de caña	Residuo agroindustrial	Bajo	Sí	Energía, fertilizantes	Alto
Rastrojo de maíz	Residuo agrícola	Bajo	Sí	Energía	Medio
Mucílago de café	Residuo agroindustrial	Nulo	Sí	Energía, biomasa	Alto
Sargassum spp.	Biomasa invasora	Nulo	Sí	Energía, biofertilizantes	Muy alto
Microalgas	Biomasa cultivada	Nulo	Sí (vinaza)	Biodiesel, carbón activado	Muy alto

En la Tabla 3, las materias primas analizadas presentan un alto potencial dentro de modelos de biorrefinería, destacándose por su capacidad de aprovechar residuos agroindustriales y biomasas no convencionales sin afectar la seguridad alimentaria. En particular, el mucílago de café, el bagazo de caña y el Sargassum spp. evidencian un enfoque altamente circular, al permitir la generación de bioetanol junto con subproductos de valor agregado como fertilizantes y materiales carbonosos. Asimismo, el uso de microalgas cultivadas en vinaza refuerza la eficiencia del sistema al integrar residuos industriales en nuevos ciclos productivos. En conjunto, los resultados confirman que el uso de biomasas 2G y 3G favorece la sostenibilidad del proceso

y minimiza la competencia con cultivos destinados al consumo humano, consolidando un modelo energético técnica y socialmente viable.

Desde una perspectiva socioeconómica, la discusión de los resultados permite desmitificar el conflicto entre energía y alimentación. Los datos analizados indican que en países productores como Colombia no existe una relación causal directa entre el aumento de la producción de biocombustibles y el incremento en el precio de los alimentos básicos. Por tanto, la industria de biocombustibles es técnicamente viable y socialmente sostenible siempre que se priorice el aprovechamiento de excedentes agrícolas y biomasas invasoras (como el sargazo), minimizando el uso de tierras arables destinadas al consumo humano.

V. Conclusión

Los resultados obtenidos permiten concluir que la composición química y el rendimiento industrial de las materias primas evaluadas, se desprenden las siguientes conclusiones fundamentales:

5.1 Eficiencia Superior del Bagazo de Caña (2G):

El bagazo de caña de azúcar se consolida como una de las materias primas de segunda generación más eficientes para la producción de bioetanol bajo condiciones de hidrólisis ácida. Su elevado rendimiento (5.74 ml de etanol) frente a otros residuos como el rastrojo de maíz se debe a su ventajosa composición química (46.06 % de celulosa y solo 11.51 % de lignina), lo que facilita una mayor liberación de azúcares fermentables.

5.2. Viabilidad Operativa del Mucílago de Café:

Los subproductos del café presentan una oportunidad crítica de bioconversión inmediata. El mucílago fresco destaca por permitir la obtención de hasta 57.08 ml de etanol por kilogramo sin necesidad de procesos previos de hidrólisis, lo que simplifica la ruta tecnológica y reduce los costos operativos en comparación con las biomasas lignocelulósicas convencionales.

G. Potencial Energético del Sargazo (3G):

Las macroalgas pardas (Sargassum spp.) representan una fuente de tercera generación con un potencial de conversión extraordinario. La investigación demostró que es factible convertir casi el 48 % de su biomasa en azúcares totales mediante una hidrólisis ácida optimizada (2.31 M de y 33-75 min). Este hallazgo no solo valida al sargazo como un insumo de alta densidad energética, sino que ofrece una solución productiva al daño ecológico provocado por su arribo masivo en las costas del Caribe.

5.4. Modelos de Biorrefinería y Economía Circular:

La integración de microalgas (como Micractinium sp. y C. biconvexa) en sistemas de biorrefinería mediante el aprovechamiento de la vinaza de caña representa una estrategia prometedora para cerrar ciclos productivos. Este enfoque permite no solo la generación de biocombustibles, sino también la producción de subproductos de alto valor agregado, como fertilizantes y carbón activado, optimizando la viabilidad económica y ambiental del modelo industrial.

5.5. Sostenibilidad y Seguridad Alimentaria:

La industria de los biocombustibles puede considerarse plenamente sostenible siempre que se priorice el uso de excedentes agrícolas, biomasas invasoras y residuos agroindustriales. El análisis demuestra que la transición hacia tecnologías 2G y 3G minimiza los impactos sobre la seguridad alimentaria, permitiendo que la producción de energía renovable coexista con el mercado de alimentos sin generar presiones inflacionarias en los productos básicos.

REFERENCIAS

[1] M. Balat, “Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review,” Energy Conversion and Management, vol. 52, no. 2, pp. 858–875, 2011.

[2] A. Kumar, L. Singh, and S. Ghosh, “Bioconversion of lignocellulosic biomass to ethanol: A review,” Bioresource Technology, vol. 101, no. 13, pp. 4767–4774, 2010.

[3] J. Sun and H. Cheng, “Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review,” Bioresource Technology, vol. 83, no. 1, pp. 1–11, 2002.

[4] Y. Zheng, Z. Pan, and R. Zhang, “Overview of biomass pretreatment for cellulosic ethanol production,” International Journal of Agricultural and Biological Engineering, vol. 2, no. 3, pp. 51–68, 2009.

[5] P. Alvira, E. Tomás-Pejó, M. Ballesteros, and M. J. Negro, “Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review,” Bioresource Technology, vol. 101, no. 13, pp. 4851–4861, 2010.

[6] R. Sims, W. Mabee, J. Saddler, and M. Taylor, “An overview of second generation biofuel technologies,” Bioresource Technology, vol. 101, no. 6, pp. 1570–1580, 2010.

[7] N. R. Valencia, “Producción de bioetanol a partir de mucílago de café,” Ceni cafe, Colombia, 2015.

[8] J. Mussatto et al., “Production, composition, and application

of coffee and its industrial residues," Food and Bioprocess Technology, vol. 4, pp. 661–672, 2011.

[9] N. Puc Blanco et al., "Optimization of acid hydrolysis of Sargassum spp. using response surface methodology," Journal of Applied Phycology, 2021.

[10] A. John, B. Anisha, and R. Nair, "Bioethanol production from macroalgae: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 75, pp. 1206–1215, 2017.

Análisis del Potencial de Captación y Aprovechamiento de Aguas Lluvias en Ecosistemas de Bosque Seco Tropical como Estrategia de Gestión Sostenible del Recurso Hídrico en el Municipio de Nilo, Cundinamarca

1st Andrés Alberto Amaya García
Ingeniería Civil
Universidad Piloto de Colombia S.A.M.
Girardot, Colombia
andres-amaya6@upc.edu.co

2nd Angela María Huertas Villarreal
Ingeniería Civil
Universidad Piloto de Colombia S.A.M.
Girardot, Colombia
angela-huertas@upc.edu.co

3rd Jesus Flaminio Ospitia Prada
Ingeniería Civil
Universidad Piloto de Colombia S.A.M.
Girardot, Colombia
jesus-ospitia@unipiloto.edu.co

***Resumen*—Los ecosistemas de Bosque Seco Tropical presentan una marcada estacionalidad climática, con periodos prolongados de sequía y temporadas de lluvias concentradas, lo que genera variaciones significativas en la disponibilidad del recurso hídrico. Esta condición limita el acceso continuo al agua y evidencia un subaprovechamiento de las aguas lluvias debido a la ausencia de sistemas adecuados de captación, almacenamiento y conducción. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el potencial de captación y aprovechamiento de aguas lluvias como alternativa para la gestión sostenible del recurso hídrico, integrando este análisis en procesos formativos de la ingeniería civil orientados al desarrollo de competencias en el manejo del recurso hídrico y el diseño de sistemas hidráulicos.**

La metodología se desarrolla bajo un enfoque mixto, de carácter descriptivo, exploratorio y aplicado, a partir del análisis de registros históricos de precipitación, información climática y normativa técnica. El proceso metodológico se estructura en cuatro fases: análisis de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación, estimación del volumen potencial de agua lluvia aprovechable, evaluación de la viabilidad hidráulica de sistemas de almacenamiento y conducción, y formulación de un esquema piloto aplicable a proyectos de infraestructura civil.

Mediante las experiencias de aprendizaje y los procesos formativos asociados al desarrollo del proyecto, la investigación busca implementar técnicas de análisis que puedan ser replicadas en la formación de futuros ingenieros civiles, fortaleciendo la aplicación de conocimientos en contextos reales. Asimismo, se contempla la incorporación de sistemas de modelación como herramienta de apoyo para el análisis hidrológico y la evaluación de alternativas de diseño.

A partir de este proceso, se espera caracterizar el comportamiento de la precipitación en el área de estudio, determinar el volumen potencial aprovechable y evaluar la factibilidad técnica de implementar sistemas de captación de aguas lluvias. De igual manera, se busca generar lineamientos técnicos que orienten el diseño de soluciones hidráulicas sostenibles.

Se evidencia que el análisis del aprovechamiento de aguas lluvias no solo contribuye a la gestión eficiente del recurso hídrico en territorios con alta variabilidad climática, sino que también constituye una herramienta relevante en la formación en ingeniería civil, al permitir la articulación entre teoría, análisis técnico y aplicación práctica en la solución de problemáticas reales. En este sentido, la investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y el ODS 4 (educación de calidad), al promover tanto el uso sostenible del recurso hídrico como el fortalecimiento de procesos formativos en ingeniería orientados a la sostenibilidad.

***Palabras Claves*—captación de aguas lluvias, bosque seco tropical, HEC-HMS, drenaje urbano sostenible, RAS 0330, gestión hídrica, Nilo Cundinamarca.**

I. INTRODUCCIÓN

El Bosque Seco Tropical (BST) es uno de los ecosistemas más amenazados del planeta, caracterizado por una precipitación anual de 700–2 000 mm·a^{-1} y uno a dos meses secos definidos. En Colombia, el BST abarca regiones del valle del río Magdalena, donde el municipio de Nilo (Cundinamarca) cuenta con una población de mas de 18.000 habitantes según el DANE y presenta un régimen bimodal con índice de aridez de Lang próximo al umbral seco (precipitación media ≈ 1 292 mm·a^{-1}). A pesar de su fragilidad hídrica, estos ecosistemas carecen de infraestructura para el aprovechamiento del recurso pluvial.

La captación y aprovechamiento de aguas lluvias (CAAL) constituye una estrategia de adaptación al cambio climático ampliamente documentada en contextos urbanos de países en desarrollo. Su implementación en zonas BST presenta el desafío adicional de maximizar el volumen captado durante la temporada húmeda para garantizar disponibilidad en períodos de déficit hídrico. El presente trabajo evalúa el potencial de CAAL en microcuencas urbanas del municipio de Nilo mediante modelación hidrológica cuantitativa y propone el predimensionamiento de un sistema piloto de captación, conducción y almacenamiento conforme al RAS 0330/2017.

El objetivo general es diseñar un sistema hídrico piloto integral para el casco urbano de Nilo que: (i) lamine caudales pico de escorrentía, reduciendo el riesgo de inundación local; (ii) almacene volúmenes de agua pluvial para uso no potable durante la temporada seca; y (iii) sirva como modelo replicable en otros municipios de clima BST en la región del Alto Magdalena.

II. METODOLOGÍA



A. Caracterización Hidroclimática

Se recopilaron series de precipitación diaria del IDEAM para el período 1970–2020 correspondientes a estaciones próximas al municipio (Ceniza, Purificación). Los máximos anuales se ajustaron estadísticamente mediante la distribución de Gumbel para construir curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) sintéticas de la forma:

$$I = a \cdot Tr\text{^}b \cdot D\text{^}c \qquad (1)$$

donde I es la intensidad de precipitación (mm·h^{-1}), Tr el período de retorno (a), D la duración (min), y a, b, c constantes de regresión obtenidas por mínimos cuadrados. En ausencia de datos pluviográficos locales, se adoptaron curvas IDF regionales del IDEAM calibradas para la cuenca alta del Sumapaz, validadas contra los lineamientos del RAS 0330/2017. Adicionalmente, se digitalizaron la red hidrográfica del río Pagüey (afluente del Sumapaz, POMCA Sumapaz), los límites de microcuencas, el uso del suelo y las pendientes a partir de ortofotomosaicos 2020 e

imágenes de Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución espacial de 5 m.

B. Modelación Lluvia-Escorrentía (HEC-HMS)

Se definieron siete (7) microcuencas de drenaje urbano en el área del río Pagüey para el municipio de Nilo, con áreas en el rango 0.10–3.40 ha. Para cada subcuenca se determinaron los siguientes parámetros de entrada:

- **Área de drenaje** A (ha), obtenida de análisis GIS.
- **Número de curva CN (SCS)**, asignado por uso de suelo: superficies asfaltadas CN ≈ 98; áreas verdes CN ≈ 55–70; mixto CN ≈ 68–82.
- **Tiempo de concentración Tc (h)**, calculado mediante el método de Kirpich (ecuación 2).
- **Tiempo de retardo TLag (h)**, estimado como TLag = 0.6 · Tc, conforme a la metodología SCS.

El tiempo de concentración se determinó mediante:

$$Tc = 0.0195 \cdot L^{0.77} \cdot S^{-0.385} \quad (2)$$

donde L es la longitud hidráulica máxima (m) y S la pendiente media del cauce (m·m⁻¹). El modelo HEC-HMS simuló hidrogramas de escorrentía para períodos de retorno Tr = 2, 5, 10, 25 y 100 a, utilizando precipitaciones de diseño calculadas con la ecuación (1) para cada Tr. Los resultados se contrastaron con el método racional modificado:

$$Qp = 0.278 \cdot C \cdot I \cdot A \quad (3)$$

donde Qp es el caudal pico (L·s⁻¹), C el coeficiente de escorrentía adimensional, I la intensidad de diseño (mm·h⁻¹) para la duración igual a Tc, y A el área de la cuenca (ha). El factor 0.278 corresponde a la conversión de unidades en sistema SI (1 mm·h⁻¹·ha = 2.78 × 10⁻³ m³·s⁻¹ = 2.78 L·s⁻¹).

C. Selección del Sitio Piloto

Las microcuencas se priorizaron mediante una matriz multicriterio que ponderó: (1) grado de impermeabilización superficial; (2) densidad de área techada disponible para captación; (3) conectividad hidráulica hacia el punto de almacenamiento propuesto; y (4) vulnerabilidad ante eventos de inundación. El suelo urbano principal del casco urbano de Nilo resultó prioritario, conformando una cuenca piloto de ≈ 2.05 ha.



D. Predimensionamiento del Sistema Piloto

El sistema hídrico piloto comprende cuatro componentes integrados: (1) área de captación (cubiertas impermeables), (2) sistema de conducción (tubería), (3) tanque de almacenamiento, y (4) dispositivo de descarga controlada. Las dimensiones se determinaron así:

- **Área de captación:** ~2 000 m² de cubiertas impermeables urbanas (techos y pavimentos), equivalente a una manzana tipo de 100 m × 20 m.
- **Tubería de conducción:** PVC corrugado DN 200 mm, pendiente hidráulica i = 1 % (0.01 m·m⁻¹), coeficiente de Manning n = 0.012, velocidad de flujo v ≈ 0.6–0.8 m·s⁻¹, cumpliendo la condición de autolimpieza establecida en el RAS 0330/2017 (v_min = 0.6 m·s⁻¹).
- **Tanque de almacenamiento:** Prisma rectangular 5 m × 5 m × 2.4 m (V = 60 m³), construido en concreto reforzado impermeabilizado con geomembrana HDPE. Dimensionado para retener el volumen de escorrentía de diseño Q_{10} y proveer una autonomía de 4–6 semanas.
- **Vertedero de excedentes:** Orificio de salida Ø 76.2 mm (3"), capaz de evacuar ≥ 10 L·s⁻¹ cuando el tanque supera la cota de rebose.

El balance hídrico mensual se estimó comparando la oferta pluvial captada (función de la precipitación mensual y el coeficiente de escorrentía ponderado) contra la demanda local de uso no potable, estimada en ≈ 400 m³·mes⁻¹ para riego de zonas verdes comunes y limpieza de espacios públicos, conforme a dotaciones mínimas del RAS para población urbana de ≈ 3 000 habitantes.



III. RESULTADOS

A. Parámetros Hidrológicos de Subcuencas

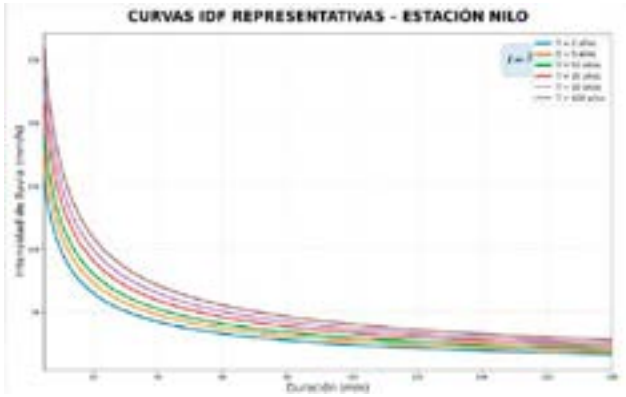
La Tabla I consolida los parámetros hidrológicos de tres subcuencas representativas. Los valores de CN se encuentran en el rango 68–82, consistentes con el grado de urbanización de cada subcuenca. Los tiempos de concentración son reducidos (Tc < 0.30 h), propios de cuencas urbanas de pequeña escala con alta pendiente.

TABLA I. MATRIZ HIDROLÓGICA DE SUBCUENCAS MUNICIPIO DE NILO, CUNDINAMARCA

Subcuenca	Área (ha)	Uso (%)	CN (SCS)	Tc (h)	TLag (h)	Qp,10 (L·s⁻¹)	V10 (m³)
Urbana 1 (Pagüey)	0.85	65 urbano	82	0.08	0.03	4.8	23.5
Urbana 2 (Pagüey)	1.20	50 urbano	75	0.12	0.04	5.0	25.7
Mixta rural 3	3.40	30 agrícola	68	0.30	0.10	6.3	33.2

[a] Valores calculados mediante el método de Kirpich (ecuación 2). Q p,10: caudal pico para Tr = 10 a; V10: volumen de escorrentía generado.

B. Curvas IDF y Caudales de Diseño



Las curvas IDF adoptadas (IDEAM/regionales) arrojaron intensidades representativas de $I_2(10\ a) \approx 78\ mm \cdot h^{-1}$ y $I_{15}(10\ a) \approx 52\ mm \cdot h^{-1}$ para duraciones de 2 min y 15 min, respectivamente, con Tr = 10 a. Aplicando la ecuación (3) para la subcuenca Urbana 2 (A = 1.20 ha, C = 0.80, I = 52 $mm \cdot h^{-1}$, Tr = 10 a):

$$Q\{p,10\} = 0.278 \times 0.80 \times 52 \times 1.20 \approx 5.5\ L \cdot s^{-1} \quad (4)$$

El modelo HEC-HMS produjo $Q\{p,10\} = 5.0\ L \cdot s^{-1}$ para la misma subcuenca, indicando una discrepancia relativa del 9.1 %, dentro del margen de aceptación para estudios de prediseño (±15 %). Esta concordancia valida los parámetros del modelo. Los caudales pico para Tr = 2, 5, 25 y 100 a se reportan.

C. Volumen Aprovechable Anual

Integrando el hidrograma de diseño mediante aproximación triangular (ecuación 5) con duración efectiva D ≈ 0.2 h y factor de forma α = 0.3, el volumen por evento para Tr = 10 a resulta:

$$V\{evento\} = Qp \cdot D \cdot \alpha = 5.5 \times 10^{-3}\ m^3 \cdot s^{-1} \times 720\ s \times 0.3 \approx 1.19\ m^3 \quad (5)$$

Considerando la distribución mensual de precipitaciones del municipio (regime bimodal: períodos lluviosos en marzo-mayo y octubre-noviembre) y el coeficiente de aprovechamiento del 30–35 % de la escorrentía total generada sobre la cuenca piloto de 2.05 ha, el volumen aprovechable anual estimado es de 600–700 $m^3 \cdot a^{-1}$. El evento de Tr = 100 a genera un volumen de escorrentía de ≈ 80 m^3, justificando el dimensionamiento del tanque de 60 m^3 como receptor de la fracción almacenable.

D. Indicadores de Desempeño del Sistema

- **Reducción de caudal pico (Qp):** El tanque de 60 m³ lamina el hidrograma de entrada, reduciendo el caudal pico de 5.5 L·s⁻¹ (sin sistema) a ≈ 3.6 L·s⁻¹ (con tanque), equivalente a una reducción del 34.5 % para Tr = 10 a.
- **Volumen captado anual:** ≈ 700 m³·a⁻¹, correspondiente al 80 % de la lluvia útil sobre el área de captación de 2 000 m².
- **Autonomía hídrica:** El tanque de 60 m³ provee ≈ 1.5 meses de autonomía respecto a la demanda estimada de 400 m³·mes⁻¹ de uso no potable.
- **Cobertura de demanda:** En promedio anual, el sistema cubre el 100 % de la demanda hídrica no potable proyectada durante la temporada seca.
- **Capacidad de conducción:** La tubería DN 200 mm con pendiente i = 1 % presenta capacidad hidráulica Qcap ≈ 8.2 L·s⁻¹ > Q{p,10} = 5.5 L·s⁻¹, garantizando flujo libre en condiciones de diseño.



IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos son coherentes con los reportados en estudios de CAAL en climas tropicales secos de América Latina, donde el coeficiente de aprovechamiento del 30–35 % resulta típico para sistemas de captación en techo sin filtración avanzada. La precipitación media de 1 292 mm·a⁻¹ ubica a Nilo en el límite superior del BST (700–2 000 mm·a⁻¹), lo que representa una condición favorable respecto a municipios con mayor déficit hídrico.

La discrepancia del 9.1 % entre el método racional y HEC-HMS para la subcuenca Urbana 2 es atribuible a la linealización implícita del método racional, que sobreestima el caudal pico en cuencas con CN heterogéneo. Para el prediseño, se adopta conservadoramente el valor más alto (Q{p,10} = 5.5 L·s⁻¹) como caudal de diseño de la tubería de conducción.

El enfoque SUDS adoptado es escalable: para duplicar la capacidad de almacenamiento bastaría incrementar las dimensiones del tanque a 5 m × 5 m × 4.8 m (V = 120 m³) sin modificar el trazado de conducción. Se recomienda complementar el sistema con monitoreo pluviométrico local (pluviógrafo de resolución 0.2 mm) y análisis de calidad fisicoquímica del agua captada para determinar su aptitud para riego de alimentos.

Una limitación del presente estudio es la ausencia de datos pluviográficos propios de Nilo, lo que obligó a adoptar curvas IDF regionales. La incertidumbre asociada se estima en ±15 % para las intensidades de corta duración, lo que no afecta la validez del prediseño pero deberá reducirse en la fase de diseño definitivo mediante instalación de al menos una estación pluviográfica local.

V. CONCLUSIONES

Se presenta el predimensionamiento de un sistema piloto de captación y aprovechamiento de aguas lluvias para el municipio de Nilo, Cundinamarca, con los siguientes hallazgos principales:

- **Viabilidad hídrica:** La precipitación media de 1 292 mm·a⁻¹ y la disponibilidad de 2 000 m² de superficies impermeables en el casco urbano generan un potencial aprovechable de 600–700 m³·a⁻¹, suficiente para cubrir la demanda hídrica no potable proyectada.
- **Impacto hidráulico:** El sistema propuesto reduce el caudal pico en 34.5 % (Tr = 10 a), contribuyendo a la mitigación del riesgo de inundación local en un ecosistema BST frágil.
- **Conformidad normativa:** El diseño hidráulico (tubería DN 200 mm, i = 1 %, n = 0.012; tanque de 60 m³) cumple los criterios del RAS 0330/2017 en términos de velocidades mínimas de autolimpieza y volúmenes de almacenamiento.
- **Replicabilidad:** La metodología es directamente aplicable a otras microcuencas del municipio y a municipios con régimen BST similares en la región del Alto Magdalena, ajustando A, CN e IDF según los datos locales disponibles.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por el suministro de registros históricos de precipitación, y al Semillero de Investigación de Aguas de la Universidad Piloto de Colombia, Seccional Alto Magdalena, por el apoyo académico e institucional al presente estudio.

VII. REFERENCIAS

[1] J. A. Espinal-Carrera y E. Montenegro-Handal, "Formaciones vegetales de Colombia," IGAC, Bogotá, 1963.

[2] B. S. Thomas y A. C. Ballard, "Rainwater harvesting and urban sustainability: a review," Resources, Conservation and Recycling, vol. 129, pp. 1–15, 2018.

[3] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, Resolución 0330 de 2017. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico — RAS, Bogotá, 2017. [En línea]. Disponible en: https://normas.cra.gov.co

[4] A. Pacheco-Montes y C. L. Giraldo-Restrepo, "Captación pluvial en climas semiáridos tropicales: experiencias en el departamento de Córdoba, Colombia," Ingeniería e Investigación, vol. 38, n.° 2, pp. 45–53, 2018.

[5] L. Flores-Aguilar et al., "Performance of rooftop rainwater harvesting systems in tropical dry climates," Water, vol. 12, n.° 4, art. 987, 2020.

[6] US Army Corps of Engineers, HEC-HMS Hydrologic Modeling System: User's Manual, versión 4.11. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center, 2023.

[7] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), "Atlas Climatológico de Colombia," IDEAM, Bogotá, 2015. [En línea]. Disponible en: http://atlas.ideam.gov.co

[8] V. T. Chow, D. R. Maidment y L. W. Mays, Hidrología Aplicada. Bogotá: McGraw-Hill, 1994.

Diseño de mortero con residuos reciclados para reducir el sobrecalentamiento en parques de Girardot, Cundinamarca

1st Carlos Julián Sánchez Torres
Cundinamarca
Universidad Piloto de Colombia
Seccional Alto del Magadalena
Girardot, Colombia
carlos-sanchez9@upc.edu.co

2nd Juan Manuel Triana Pachon
Cundinamarca
Universidad Piloto de Colombia
Seccional Alto del Magadalena
Girardot, Colombia
juan-triana8@upc.edu.co

3rd Mauricio Andrés Rivear Soto
Cundinamarca
Universidad Piloto de Colombia
Seccional Alto del Magadalena
Girardot, Colombia
mauricio-rivera@unipiloto.edu.co

Resumen— El incremento de temperaturas superficiales en espacios públicos urbanos constituye una problemática asociada al efecto de acumulación térmica presente en superficies de concreto expuestas a radiación solar, especialmente en municipios de clima cálido como Girardot, Cundinamarca. Esta situación puede afectar las condiciones de confort térmico y limitar el uso de parques recreativos durante determinadas horas del día. En este contexto, la presente investigación propone el diseño de un mortero elaborado con residuos plásticos y vidrio reciclado, orientado a disminuir el sobrecalentamiento superficial en placas de contrapiso de concreto ubicadas en espacios recreativos del municipio.

La investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, integrando procedimientos cuantitativos relacionados con medición térmica, simulación computacional y análisis experimental, junto con componentes cualitativos orientados a la interpretación de condiciones urbanas y habitabilidad del espacio público. La metodología contempla un diagnóstico térmico del Parque Principal Simón Bolívar de Girardot, el diseño y elaboración del mortero, ensayos experimentales controlados y simulaciones mediante software especializado como ENVI-met, AutoCAD, SketchUp y Microsoft Excel.

Se espera que los resultados permitan identificar el comportamiento térmico del material propuesto y determinar su posible contribución a la reducción de temperaturas superficiales en superficies de concreto expuestas al sol. Asimismo, el estudio busca aportar conocimiento técnico sobre el uso de materiales reciclados en aplicaciones constructivas sostenibles, alineándose con estrategias orientadas al confort térmico urbano y aprovechamiento de residuos sólidos.

Palabras clave— confort térmico, mortero reciclado, residuos plásticos, vidrio reciclado, sobrecalentamiento superficial

I. Introducción

Las altas temperaturas presentes en municipios de clima cálido generan efectos significativos sobre el comportamiento térmico de superficies urbanas expuestas a radiación solar. En el municipio de Girardot, Cundinamarca, las placas de contrapiso de concreto ubicadas en parques recreativos presentan procesos de acumulación de calor que pueden influir negativamente sobre las condiciones de permanencia y confort térmico de la población usuaria.

El concreto convencional, debido a sus propiedades físicas y elevada exposición solar, puede alcanzar temperaturas superficiales elevadas durante gran parte del día, generando espacios menos confortables para actividades recreativas y de integración social. Esta problemática adquiere mayor relevancia en espacios públicos de alta afluencia, donde la permanencia prolongada de usuarios depende, en parte, de las condiciones ambientales del entorno.

Frente a esta situación, la incorporación de materiales reciclados dentro de mezclas de cemento representa una alternativa potencial para contribuir al mejoramiento de propiedades térmicas superficiales y, simultáneamente, fomentar estrategias de sostenibilidad ambiental. En particular, el aprovechamiento de residuos plásticos y vidrio reciclado dentro de morteros podría favorecer mecanismos de reducción térmica y valorización de residuos con potencial de reincorporación productiva.

La presente investigación se articula con el ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles, al promover estrategias orientadas a mejorar condiciones de habitabilidad en espacios públicos urbanos, así como con el ODS 13: Acción por el Clima, mediante la generación de alternativas de adaptación térmica y sostenibilidad. Asimismo, se relaciona con el ODS 3: Salud y Bienestar, debido a su interés por favorecer espacios recreativos potencialmente más confortables para la población.

En este contexto, el objetivo principal consiste en diseñar un mortero elaborado con residuos plásticos y vidrio reciclado para disminuir el sobrecalentamiento superficial en placas de contrapiso de concreto en parques recreativos del municipio de Girardot, Cundinamarca.

II. Objetivos

Objetivo general

Diseñar un mortero elaborado con residuos plásticos y vidrio reciclado para disminuir el sobrecalentamiento superficial en placas de contrapiso de concreto en parques recreativos del municipio de Girardot, Cundinamarca.

Objetivos específicos

- Identificar las condiciones térmicas presentes en placas de contrapiso de concreto ubicadas en parques recreativos del municipio de Girardot.
- Diseñar un mortero mediante la incorporación de residuos plásticos y vidrio reciclado, evaluando su proceso de elaboración y aplicación experimental.
- Analizar el comportamiento térmico del mortero diseñado mediante ensayos experimentales, mediciones de temperatura superficial y simulaciones computacionales.
- Comparar el desempeño térmico entre superficies convencionales de concreto y superficies intervenidas con el mortero propuesto, determinando su posible contribución a la reducción del sobrecalentamiento superficial.

III. Antecedentes y Marco Teòrico

Diversas investigaciones han analizado el comportamiento térmico de materiales constructivos alternativos mediante la incorporación de residuos reciclados dentro de mezclas en cementos. Estudios recientes evidencian que ciertos materiales reciclados pueden modificar propiedades asociadas a transferencia térmica, absorción de calor y comportamiento superficial de estructuras expuestas a radiación solar (Li, Zhao, Chen, & Fu, 2025).

El confort térmico urbano constituye un componente relevante dentro de la planificación y diseño de espacios públicos, debido a su influencia sobre la permanencia de usuarios y percepción ambiental del entorno. En zonas de clima cálido, la elevada exposición solar puede favorecer la formación de superficies con altas temperaturas, reduciendo la funcionalidad de áreas recreativas durante horarios críticos (Riham Nady & Riham, 2022).

En relación con materiales de construcción sostenibles, el uso de residuos plásticos y vidrio reciclado ha sido estudiado desde perspectivas relacionadas con sostenibilidad, reducción de residuos y desempeño físico de mezclas de cemento. Aunque buena parte de investigaciones se ha orientado al análisis mecánico de estos materiales, aún existe la necesidad de profundizar en estudios relacionados con comportamiento térmico aplicado a espacios urbanos recreativos (The Snell Group Our Knowledge. Your Advantage).

Desde una perspectiva ambiental, la reutilización de residuos sólidos dentro de procesos constructivos se articula con principios de economía circular, promoviendo el aprovechamiento de materiales potencialmente reutilizables y reduciendo impactos asociados a disposición final de residuos (Ricalde, 2023).

IV. Metodologia

La investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, integrando procedimientos cuantitativos y cualitativos. Según Ortero Ortega, este enfoque permite complementar mediciones objetivas con procesos interpretativos orientados a comprender integralmente el fenómeno estudiado.

El estudio presenta un alcance descriptivo, experimental y aplicado. Es descriptivo debido a que caracteriza condiciones térmicas presentes en superficies de concreto ubicadas en espacios recreativos; experimental porque contempla el diseño y evaluación de un mortero modificado mediante incorporación de residuos reciclados; y aplicado debido a su interés por formular una alternativa potencialmente utilizable en espacios públicos urbanos.

La investigación se delimita al Parque Principal Simón Bolívar del municipio de Girardot, seleccionado por sus características climáticas y exposición constante a radiación solar. El proyecto contempla el diseño de mezcla, elaboración del mortero, aplicación experimental y evaluación térmica del material propuesto.

La metodología se organiza en cinco fases: 1) diagnóstico térmico del área de estudio mediante registro de temperaturas superficiales y variables ambientales.

En esta fase se hará un diagnóstico térmico en el parque Parque Simón Bolívar. Primero, se realizará una visita al lugar para identificar las zonas donde hay mayor exposición al sol y presencia de placas de concreto.

Después, se medirán variables como la temperatura superficial de las placas usando un termómetro infrarrojo, además de la temperatura ambiente y la humedad relativa con ayuda de un termohigrómetro. Estas mediciones se tomarán en horarios donde la radiación solar sea más alta, para conocer las condiciones de mayor calentamiento.

También se hará un registro fotográfico del área y se aplicarán encuestas cortas a las personas que frecuentan el parque, con el fin de conocer cómo perciben el confort térmico del lugar. Finalmente, toda la información recolectada será organizada y analizada para establecer una base sobre el comportamiento térmico actual de la zona.

2) diseño y elaboración del mortero incorporando residuos plásticos y vidrio reciclado.

En esta fase se diseñará el mortero llamado TERMOPARK, el cual busca mejorar las condiciones térmicas del recubrimiento. Para comenzar, se realizará una revisión bibliográfica sobre el uso de materiales reciclados en morteros y su influencia en las propiedades térmicas.

Luego, se seleccionarán los materiales que harán parte de la mezcla, entre ellos cemento, agregados, residuos plásticos y vidrio reciclado, definiendo las cantidades necesarias de cada uno. Posteriormente, se prepararán diferentes dosificaciones para evaluar cuál presenta un mejor comportamiento.

Además, las muestras de mortero serán elaboradas en laboratorio bajo condiciones controladas. Estas se prepararán en moldes específicos para facilitar su análisis posterior y mantener uniformidad en las dimensiones y condiciones iniciales.

3) evaluación térmica experimental mediante exposición controlada.

En esta etapa se evaluará el comportamiento térmico del mortero diseñado mediante pruebas en laboratorio. Para ello, las muestras serán expuestas a fuentes de calor que simulen la radiación solar y así poder observar su respuesta térmica.

Se medirá la temperatura superficial del mortero y se comparará con una muestra de concreto convencional sin recubrimiento, utilizando instrumentos adecuados para las mediciones. Las pruebas se realizarán en diferentes intervalos de tiempo para analizar cómo cambia la temperatura en cada material.

Finalmente, los datos obtenidos serán organizados y analizados para identificar diferencias entre las muestras y determinar qué tan efectivo es el mortero para disminuir el sobrecalentamiento.

4) modelación y simulación micro climática empleando ENVI-met, AutoCAD y SketchUp.

Primero, se elaborará un modelo digital del parque a partir de las dimensiones y características físicas del lugar, incluyendo zonas verdes, superficies de concreto, senderos y elementos urbanos presentes en el área de estudio. Para ello, se utilizarán AutoCAD y SketchUp con el fin de representar de manera más precisa las condiciones reales del entorno.

Posteriormente, la información obtenida será integrada en ENVI-met para desarrollar simulaciones relacionadas con variables microclimáticas como temperatura superficial, temperatura del aire y comportamiento térmico de los materiales. Estas simulaciones permitirán analizar cómo influye el mortero propuesto en las condiciones térmicas del espacio.

5) análisis comparativo de resultados mediante Microsoft Excel.

se evaluará el comportamiento térmico del mortero en condiciones reales dentro del área de estudio. Para ello, el recubrimiento diseñado será aplicado sobre una sección de placa de concreto existente en el parque Parque Simón Bolívar.

Posteriormente, se realizarán mediciones de temperatura superficial tanto en la zona intervenida como en una zona de control sin recubrimiento, manteniendo las mismas condiciones ambientales. Estas mediciones se llevarán a cabo en diferentes momentos del día, especialmente en horarios de mayor radiación solar, con el fin de obtener resultados más representativos.

Después, la información recolectada será organizada y analizada mediante Microsoft Excel, utilizando tablas y gráficas comparativas que permitan observar las diferencias entre ambas superficies.

Entre las variables consideradas se encuentran temperatura superficial, composición del mortero, temperatura ambiente, radiación solar y humedad relativa, permitiendo establecer relaciones asociadas al comportamiento térmico del material propuesto.

V. Resultados Esperados

Se espera obtener un mortero con incorporación de residuos plásticos y vidrio reciclado capaz de presentar un comportamiento térmico diferencial frente al concreto convencional, favoreciendo una reducción parcial del sobrecalentamiento superficial en condiciones de exposición solar.

Asimismo, se espera que la investigación permita establecer parámetros comparativos relacionados con acumulación térmica, absorción de calor y desempeño superficial del material diseñado, fortaleciendo el conocimiento técnico asociado a soluciones constructivas sostenibles.

Desde una perspectiva urbana, los resultados podrían contribuir a la formulación de estrategias orientadas al mejoramiento de condiciones de confort térmico en parques recreativos, promoviendo espacios potencialmente más habitables y funcionales para la comunidad.

VI. Conclusiones

La investigación plantea una alternativa orientada a enfrentar problemáticas asociadas al sobrecalentamiento superficial en espacios públicos urbanos de clima cálido, mediante el aprovechamiento de residuos plásticos y vidrio reciclado dentro de un mortero aplicado sobre placas de contrapiso de concreto.

El enfoque metodológico propuesto permitirá evaluar experimentalmente el comportamiento térmico del material diseñado mediante mediciones controladas y simulaciones computacionales, fortaleciendo la confiabilidad técnica de los resultados.

Finalmente, el estudio busca aportar conocimiento relacionado con materiales sostenibles y confort térmico urbano, promoviendo soluciones potencialmente aplicables al mejoramiento de espacios recreativos en contextos climáticos similares al municipio de Girardot.

Referencias

[1] Djukic, A., Djekic, J., Vukmirovic, M., Djekic, P., & Dinic Brankovic, M. (15 de Enero de 2018). Thermal comfort of pedestrian spaces and the influence of pavement materials on warming up during summer. Recuperado el 28 de Abril de 2026, de Thermal comfort of pedestrian spaces and the influence of pavement materials on warming up during summer: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817314639

[2] EPA United States Environmental Protection Agency. (19 de Diciembre de 2025). Uso de pavimentos refrigerantes para reducir las islas de calor. Recuperado el 29 de Abril de 2026, de Uso de pavimentos refrigerantes para reducir las islas de calor: https://www.epa.gov/heatislands/using-cool-pavements-reduce-heat-islands

[3] EPA United States Environmental Protection Agency. (11 de Febrero de 2026). Heat Island Effect. Recuperado el 29 de Abril de 2026, de Heat Island Effect: https://www.epa.gov/heatislands

[4] Guardiola, J. (18 de Mayo de 2021). Los microclimas urbanos. Recuperado el 29 de Abril de 2026, de Revista Manni Group: https://blog.mannigroup.com/es-es/los-microclimas-urbanos

[5] Iberdrola. (2024). Las islas de calor urbanas y sus efectos adversos para sus habitantes. Recuperado el 29 de Abril de 2026, de Isla de calor: https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/isla-de-calor

[6] Karam, G., Chaial, M., Grados, A., Hendel, M., & Royon, L. (31 de Julio de 2024). Thermal and microclimatic behavior of OASIS schoolyard paving materials. Recuperado el 28 de Abril de 2026, de Thermal and

microclimatic behavior of OASIS schoolyard paving materials: https://arxiv.org/abs/2408.08317

[7] Li, J., Zhao, Z., Chen, H., & Fu, Z. (2025). Study on the microclimate and thermal comfort of urban parks under arid climate conditions: A case study of Shihezi City. Recuperado el 28 de Abril de 2026, de Study on the microclimate and thermal comfort of urban parks under arid climate conditions: A case study of Shihezi City: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X25004563?utm_source=chatgpt.com

[8] Ortero Ortega, A. (Agosto de 2018). ENFOQUES DE INVESTIGACIÓN. Recuperado el 29 de Abril de 2026, de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/326905435_ENFOQUES_DE_INVESTIGACION

[9] Región de Murcia. (s.f.). CONFORT TÉRMICO. Recuperado el 28 de Abril de 2026, de Definición de Confort térmico: https://issl.carm.es/wp-content/uploads/fd-124.pdf

[10] Ricalde, L. (13 de Julio de 2023). Construcción con materiales reciclados: Una visión general. Recuperado el 29 de Abril de 2026, de KONSTRUEDU.COM: https://konstruedu.com/es/blog/construccion-con-materiales-reciclados-una-vision-general#:~:text=La%20construcci%C3%B3n%20con%20materiales%20reciclados%20tiene%20muchos%20beneficios%2C%20como%20la,en%20la%20industria%20de%20reciclaje.

[11] Riham Nady, F., & Riham, R. (2022). Evaluation of thermal comfort and urban heat island through cool paving materials using ENVI-Met. Recuperado el 28 de Abril de 2026, de Evaluation of thermal comfort and urban heat island through cool paving materials using ENVI-Met: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447921003749

[12] Rosso Alvarez, J., Jiménez Caldera, J., Campo Daza, G., Hernández Sabié, R., & Caballero Calvo, A. (24 de Abril de 2025). Integrating Objective and Subjective Thermal Comfort Assessments in Urban Park Design: A Case Study of Monteria, Colombia. Recuperado el 28 de Abril de 2026, de Integrating Objective and Subjective Thermal Comfort Assessments in Urban Park Design: A Case Study of Monteria, Colombia: https://www.mdpi.com/2413-8851/9/5/139

[13] ScienceDirect. (2017). Albedo. Recuperado el 29 de Abril de 2026, de Albedo: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/albedo

[14] The Snell Group Our Knowledge. Your Advantage. (s.f.). Consideraciones de la Temperatura Superficial. Recuperado el 29 de Abril de 2026, de Consideraciones de la Temperatura Superficial: https://www.thesnellgroup.com/sites/default/files/2021-06/consideraciones-de-la-temperatura-superficial.pdf

[15] Thermtest. (2 de Julio de 2025). Conductividad térmica. Recuperado el 29 de Abril de 2026, de Conductividad térmica: https://thermtest.com/what-is-thermal-conductivity

[16] Weather Spark. (28 de Abril de 2026). Weather Spark. Recuperado el 28 de Abril de 2026, de El clima y el tiempo promedio en todo el año en Girardot City: https://es.weatherspark.com/y/23366/Clima-promedio-en-Girardot-City-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o#google_vignette

A Digital Twin Framework with Hybrid CC–UKF Algorithm for Accurate State-of-Charge Estimation in Lithium-Ion Batteries

Luisa F. Cruz
Electronics Department
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
luisafcruz@javeriana.edu.co

Iván D. Gómez
Electronics Department
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
iv.gomez@javeriana.edu.co

Luis G. Marín
Electronics Department
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
luis_marinc@javeriana.edu.co

Luis F. Melchior
Electronics Department
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
lmelchior@javeriana.edu.co

José Vuelvas
Electronics Department
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
vuelvasj@javeriana.edu.co

Abstract*—Accurate real-time State-of-Charge (SoC) estimation remains a critical challenge for lithium-ion battery management systems used in microgrids and distributed energy applications. This work presents an experimental digital twin framework for lithium-ion battery characterization and SoC estimation based on a hybrid Coulomb Counting–Unscented Kalman Filter (CC–UKF) approach. An automated charge-discharge test bench integrating an Arduino-based sensing platform, programmable instrumentation, and MATLAB supervisory control was developed to acquire voltage, current, and temperature datasets under multiple cycling conditions. Experimental data were used to parameterize a first-order Thevenin Equivalent Circuit Model (ECM) and to characterize the nonlinear OCV-SoC relationship through polynomial regression analysis. The resulting ECM was integrated into a digital twin capable of reproducing charge, discharge, and rest operation while generating synthetic datasets for observer validation. Experimental results demonstrated that the proposed ECM successfully reproduced the dominant voltage dynamics of the battery during dynamic operation, while the hybrid CC-UKF estimator significantly improved SoC tracking stability compared to standalone Coulomb Counting. The proposed estimator achieved an RMSE of 0.0567 during discharge operation and 0.0994 during charge operation, highlighting the increased complexity of voltage-based SoC estimation under charging conditions. In addition, the digital twin provided a stable virtual environment for long-duration cycling and synthetic dataset generation without requiring destructive experimental testing. The proposed framework constitutes a computationally efficient and hardware-compatible solution for real-time battery monitoring and future battery management system development.

***Index Terms*—Lithium-ion batteries, Digital twin, Coulomb Counting, Unscented Kalman Filter, State of Charge, Battery Management System.**

I. Introduction

Lithium-ion batteries have consolidated as the dominant electrochemical energy storage technology in modern power systems, driven by their high energy density, low self-discharge rate, and decreasing cost per kilowatt-hour. Their role has expanded significantly beyond portable electronics into large-scale deployments such as electric vehicles, uninterruptible power supplies, and, most critically, microgrids and distributed energy systems. In the context of microgrids—autonomous or grid-connected electrical networks that integrate renewable generation sources such as photovoltaic panels and wind turbines with energy storage units—lithium-ion batteries serve as the primary buffer between intermittent generation and variable demand, making them a cornerstone of the Energy Management System (EMS), the supervisory control layer responsible for dispatching power flows, maintaining voltage and frequency stability, and ensuring supply continuity.

The operational efficiency of an EMS is inherently coupled to the accuracy with which the state of the battery storage units can be characterized in real time. Among the key battery state variables, the State of Charge (SoC), defined as the ratio of remaining usable capacity to total nominal capacity, is arguably the most critical for moment-to-moment energy dispatch decisions. Equally important, though considerably harder to estimate, is the State of Health (SoH), which quantifies the degree of irreversible electrochemical degradation accumulated over the battery's operational life and directly determines how much of the nominal capacity and power capability remains available to the EMS. Accurate and reliable SoC and SoH estimates enable the EMS to maximize utilization of available storage capacity, prevent operation beyond safe electrochemical limits, and extend the operational lifespan of the battery pack. The development of robust, computationally efficient estimation methodologies for these state variables is therefore not merely an algorithmic challenge but a fundamental requirement for the safe and

economically viable deployment of battery-backed microgrids.

Despite the centrality of this problem, deploying high-fidelity estimation algorithms on the resource-constrained embedded hardware that governs real battery management systems remains an open challenge, one that motivates the present work. This paper presents a digital twin-based framework for lithium-ion battery characterization and SoC estimation. The framework couples a physics-based Equivalent Circuit Model (ECM) parameterized from systematic experimental cycling with a hybrid estimation algorithm that fuses Coulomb Counting with an Unscented Kalman Filter (UKF), deployed on a hardware platform built around an Arduino microcontroller, precision instrumentation, and a MATLAB supervisory environment. The digital twin serves simultaneously as the plant model for the estimator and as a virtual validation environment that reduces the need for destructive physical cycling during algorithm development.

The remainder of this paper is organized as follows: Section II reviews relevant prior work; Section III states the problem formally; Section IV describes the experimental hardware platform and cycling methodology; Section V presents the digital twin and ECM parameterization; Section VI details the CC-UKF estimation algorithm; and Section VII reports experimental results and validation.

II. Related Work

The estimation of SoC and SoH in lithium-ion batteries has been an active research field for over two decades, and the literature reflects a clear evolutionary trajectory from simple empirical methods toward increasingly sophisticated model-based and data-driven approaches. The most widely deployed technique in production battery management systems remains Coulomb Counting (CC), owing to its trivial computational footprint. Despite its ubiquity, CC is well understood to be an open-loop estimator whose accuracy degrades monotonically with time due to five compounding error sources: uncertainty in the initial SoC, sensor noise and offset in the current transducer, integration approximation error under rapidly varying loads, capacity uncertainty arising from temperature and aging effects, and timing oscillator drift in the microcontroller [1]. This limitation is particularly acute in long-duration microgrid discharge profiles where periodic re-initialization is operationally impractical.

To address this drift while preserving computational tractability, model-based observer approaches have been widely studied. The Extended Kalman Filter (EKF), applied to a first- or second-order Thévenin Equivalent Circuit Model, was among the first closed-loop estimators to demonstrate practical real-time SoC tracking, with hardware implementations confirming errors within 2% under HPPC test profiles [2]. The EKF, however, relies on linearization through Jacobian computation, which introduces approximation errors under the strong nonlinearities exhibited by lithium-ion ECMs at high C-rate transients or low SoC levels. The Unscented Kalman Filter (UKF) circumvents this limitation by propagating a deterministic set of sigma points through the nonlinear model, achieving second-order accuracy without Jacobian evaluation [3]. The OCV-based approach offers high accuracy under equilibrium conditions but is fundamentally incompatible with real-time operation, requiring extended rest periods that interrupt normal system operation [**?**]. Hybrid methods that fuse CC with a Kalman-type voltage-feedback correction—precisely the approach adopted here—have been shown to effectively bound the long-term estimation error [4].

The joint estimation of SoC and SoH has received growing attention, as a degraded cell's nominal capacity must itself be tracked dynamically to preserve long-term accuracy. Advanced formulations based on fractional-order ECMs and adaptive multi-innovations UKF variants have demonstrated strong co-estimation performance [5], though their computational demands exceed the capabilities of the low-cost embedded hardware targeted in the present work.

Parallel to algorithmic development, the digital twin has emerged as a powerful paradigm for battery management (a high-fidelity virtual replica of the physical system that enables offline parameter identification and algorithm validation without consuming cell cycle life). Hybrid digital twin models integrating ECMs with data-driven components have been proposed to improve state estimation under aging [6], and dedicated frameworks for microgrid battery sizing have demonstrated the value of virtual testing at the system design stage [7]. Data-driven digital twin approaches coupled with deep learning estimators achieve state-of-the-art accuracy but require large training datasets and substantial offline computation, limiting their generalization across cell chemistries and aging stages. The approach adopted here deliberately occupies a different point in the accuracy-complexity trade-off: a physics-based ECM digital twin parameterized from experimental HPPC cycling data, coupled with a UKF estimator whose computational footprint is compatible with real-time embedded execution, providing a transparent and reproducible framework that complements the emerging data-driven literature [8].

III. Problem Statement

Despite decades of research, accurate real-time SoC estimation in embedded environments remains an open problem, primarily due to three compounding limitations inherent to existing approaches. The most widely deployed technique is Coulomb Counting, which updates the SoC estimate by integrating the measured current over time:

$$\mathrm{SoC}(t) = \mathrm{SoC}(t_0) - \frac{\eta}{Q_n} \int_{t_0}^{t} i(\tau)\, \mathrm{d}\tau \tag{1}$$

where Q_n is the nominal capacity and η is the Coulombic efficiency. Coulomb counting methods suffer from current measurement noise corrupting sensors, integration approximation error under rapidly varying loads, uncertainty in battery capacity that varies with temperature and aging, and timing oscillator drift—all of which accumulate unboundedly over time. In long-duration discharge profiles typical of microgrid

applications, this drift renders the CC estimate unreliable without periodic re-initialization, a condition that is operationally impractical. Higher-fidelity alternatives, such as electrochemical impedance spectroscopy-based models or physics-based porous electrode methods, offer substantially improved accuracy but involve either offline characterization that interrupts normal operation or computationally intensive solvers that are incompatible with resource-constrained embedded hardware. Model-based observers such as the EKF offer a middle ground but suffer from Jacobian-induced linearization errors under the strong nonlinearities exhibited by lithium-ion ECMs at high C-rates and low SoC levels. Finally, the experimental parameter space required to fully characterize a battery (spanning C-rates, temperatures, aging stages, and rest periods) is too large to be explored exhaustively through physical cycling alone, given that each electrochemical cycle irreversibly ages the cell and dedicated test equipment must be allocated for extended periods.

The consequences of insufficient estimation fidelity are measurable at both the device and system levels. At the cell level, inaccurate SoC estimates allow operation outside the safe electrochemical window: overcharge induces lithium plating and dendrite formation, accelerating capacity fade and creating thermal runaway hazards, while deep discharge causes irreversible cathode degradation and copper current collector dissolution. At the grid level, overestimation of available energy causes supply deficits that destabilize bus voltage and frequency in islanded microgrids, while underestimation leads to premature curtailment of renewable generation and unnecessary activation of backup resources.

This work addresses these gaps through the design, hardware implementation, and experimental validation of a hybrid CC-UKF SoC estimation framework deployed on an embedded real-time platform. The CC stage provides a computationally inexpensive state projection in the prediction step, while the UKF correction stage continuously compensates for current sensor drift and model uncertainty using the measured terminal voltage as the observable output, effectively bounding the long-term estimation error that afflicts pure integration. To support algorithm parameterization and reduce the reliance on destructive physical cycling, a controlled charge-discharge test bench was constructed and used to build a digital twin of the battery under test. This virtual model, parameterized through systematic HPPC-type cycling profiles of varying C-rates and rest periods, provides the plant model required by the UKF and serves as the ground-truth reference for offline validation of the estimator before embedded deployment.

IV. Methodology

A. Experimental Hardware Platform

1) General Architecture: The test bench follows a two-path topology that separates the charge and discharge circuits while sharing a common sensing and supervisory layer. As shown in Fig 1, the platform comprises three functional subsystems: a power path, a sensor layer, and a digital control and communication layer.

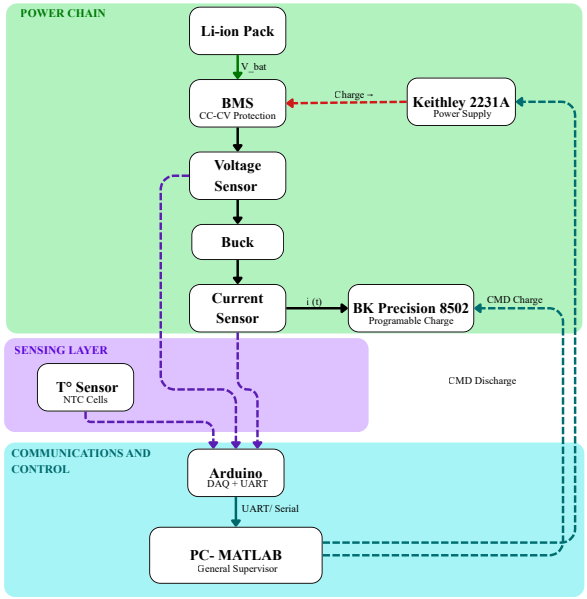


Fig. 1. Hardware Block Diagram

2) Power Path: The battery pack is connected to a BMS that enforces cell-level protection and a CC-CV charge profile. The terminal voltage is sensed directly at the BMS output terminals to capture the true dynamic response of the cell. A synchronous buck converter placed downstream acts as a current-limiting safety barrier, followed by a Hall-effect current sensor that provides the instantaneous discharge current $i(t)$ required by both the Coulomb Counting integrator and the UKF process model.

The battery pack under test consists of a 3S2P configuration of lithium-ion 18650 cells, each rated at $3.6V$ nominal voltage and $2600mAh$ nominal capacity. The resulting pack provides a nominal voltage of $10.8V$ and an overall capacity of $5200mAh$.

To simplify the electrical integration and improve signal reliability, a custom-designed PCB was developed to interconnect the sensing stage, protection circuitry, BMS, current sensor, and external instrumentation. As can be seen in Figure 2, the PCB centralizes all power and signal routing while reducing wiring complexity and measurement noise.



Fig. 2. Custom-designed PCB for system integration.

a) Discharge path: The BK Precision 8502 programmable electronic load is connected to the current sensor output and dissipates the energy extracted from the cell. It supports CC, CV, CP, and CR modes, and accepts digitally programmed multi-segment discharge profiles.

b) Charge path: A Keithley 2231A-30-3 precision power supply, connected directly to the BMS input terminals, provides the charge current. Both instruments are operated exclusively under MATLAB supervision: during the charge phase the BK Precision is set to high-impedance mode while the Keithley follows the commanded set points, and vice versa during discharge. An interlocked switching sequence with a configurable rest period between phases ensures that charge and discharge paths are never simultaneously active.

3) Sensor Layer: Voltage, current, and cell-surface temperature signals are digitized by an Arduino microcontroller, which timestamps and serializes each frame for transmission to the host via UART. Temperature monitoring serves a dual role: it provides the thermal correction required by the ECM used in the UKF, and acts as an independent safety interlock that triggers a rest period if the surface temperature exceeds a configurable threshold.

4) Supervisory Control: A MATLAB application on the host computer performs data acquisition, cycle supervision, and offline estimation. At each sampling instant it reads the sensor frame, evaluates the phase-transition criteria, and issues set-point commands to the Keithley or the BK Precision accordingly. The complete time-series dataset (voltage, current, and temperature) sampled at 1 Hz is used to parameterize the battery ECM that constitutes the digital twin and to generate the reference SoC trajectories for CC-UKF estimation error evaluation.

B. Charge and Discharge Cycling Protocol

The experimental characterization of the battery was conducted through three successive cycling phases of increasing complexity. This progressive structure follows established battery characterization methodologies commonly used for Equivalent Circuit Model (ECM) parameterization and State-of-Charge (SoC) estimation. Simple constant-current cycles provide baseline capacity measurements and initial OCV–SoC mapping, while multi-step current profiles with controlled rest periods—functionally analogous to the Hybrid Pulse Power Characterization (HPPC) methodology widely adopted in the literature [9], [10]— excite the electrochemical dynamics required to identify the transient (e.g., RC polarization) parameters of the ECM.

1) Phase I: Constant-Current Cycling: The first characterization stage consisted of complete charge and discharge cycles performed under constant-current (CC) conditions. The charging stage followed the standard CC-CV profile enforced by the BMS, while discharge was performed at a fixed current until the lower cutoff voltage was reached. These experiments served two primary objectives:

a) Determination of the usable battery capacity under near-ideal operating conditions.
b) Extraction of the quasi-static open-circuit voltage versus state-of-charge (OCV-SoC) relationship required by the ECM and the UKF measurement model.

The constant-current discharge profile also provided a stable baseline for subsequent comparison against the dynamic stepped-current profiles employed in later phases.

2) Phase II: Stepped-Current Cycling with Short Relaxation Periods: The second phase introduced a stepped-amplitude current profile for both charge and discharge operation. Each cycle consisted of alternating constant-current segments separated by short open-circuit rest intervals. The sequence applied during each experiment is summarized below:

a) Apply a current of $500\,mA$ for $5\,min$.
b) Open-circuit rest for $1\,min$.
c) Apply a current of $1\,A$ for $5\,min$.
d) Open-circuit rest for $1\,min$.
e) Repeat the sequence until the corresponding cutoff condition was reached.

The relaxation intervals allow partial dissipation of electrochemical polarization, enabling the terminal voltage to approach the open-circuit condition. These voltage recovery transients are essential for identifying the dynamic RC behavior of the ECM.

The alternating amplitudes also excite the battery at multiple operating points within a single cycle, enriching the identification dataset.

3) Phase III: Stepped-Current Cycling with Extended Rest and Ramp-Up Profile: The third phase retained the stepped-current structure of Phase II with two modifications. First, relaxation intervals were extended from 1 min to 5 min, allowing the terminal voltage to approach electrochemical equilibrium more closely and improving OCV measurement accuracy. Second, a soft-start ramp gradually increased the current from zero to the target amplitude at each segment onset, reducing instantaneous overpotential and mitigating high-frequency transients outside the bandwidth of the first-order ECM. The resulting dataset provided richer transient signatures particularly suited for polarization parameter identification [8], [9].

4) Dataset Summary: Table I summarizes the three characterization phases implemented during the experimental campaign.

TABLE I
SUMMARY OF EXPERIMENTAL CYCLING PHASES

Phase	Profile	Rest Time	Purpose
I	Const. current (CC-CV)	None	Capacity & OCV baseline
II	Stepped 500 mA / 1 A	1 min	Transient ECM excitation
III	Stepped + soft-start ramp	5 min	Enhanced ECM identification

The complete experimental dataset consisted of time-stamped voltage, current, and temperature measurements sampled at $1\,Hz$. These data were subsequently employed for ECM parameterization, digital twin construction, and validation of the hybrid Coulomb Counting–Unscented Kalman Filter SoC estimation framework.

C. Circuital Model Characterization

The experimental datasets obtained from the cycling procedures constitute the basis for the parameterization of the battery Equivalent Circuit Model (ECM), which is later employed both as the core of the digital twin and as the process model of the Unscented Kalman Filter (UKF).

Among the variables involved in battery modeling, the relationship between open-circuit voltage (V_{oc}) and state of charge (SoC) is one of the most important, since the internal battery voltage cannot be directly measured during operation under load conditions. Consequently, the OCV-SoC relationship must be experimentally characterized under quasi-equilibrium conditions.

1) OCV-SOC Curve Characterization: To characterize the OCV-SoC relationship, the current was interrupted at selected intervals and the battery was allowed to rest until partial electrochemical equilibrium was reached, allowing extraction of experimental V_{oc} points at known SoC levels. Separate datasets were obtained for charge and discharge operation; the discharge characterization was selected as the primary reference due to its higher stability and consistency during ECM identification and UKF implementation.

To obtain an analytical representation of the OCV-SoC relationship, polynomial regressions from first- to fifth-order were evaluated and compared. The fitting procedure considered both approximation accuracy and numerical stability, seeking a compromise between model fidelity and computational simplicity suitable for embedded implementation.

The resulting relationship is represented by the general polynomial expression:

$$V_{oc}(k) = a_n SoC^n(k) + a_{n-1} SoC^{n-1}(k) + \cdots + a_1 SoC(k) + a_0 \tag{2}$$

where a_i are the polynomial coefficients obtained through least-squares fitting.

Although higher-order polynomials yielded lower RMSE values in some cases, the final selected model was not necessarily the one with the minimum fitting error. Instead, the selected equation was chosen considering its global stability, smoothness, and suitability for integration into the ECM and the UKF framework.

The final discharge OCV-SoC relationship employed throughout the remainder of this work is expressed as:

$$\begin{aligned} V_{oc}(SoC) = & 16.4800\, SoC^3 - 35.0493\, SoC^2 \\ & + 27.6924\, SoC + 2.8081 \end{aligned} \tag{3}$$

This relationship constitutes the nonlinear voltage mapping used both by the ECM and by the UKF measurement model.

2) Thevenin Equivalent Circuit Model: Once the OCV-SoC relationship was defined, it was integrated into a first-order Thevenin equivalent circuit model.

The model consists of an ohmic resistance R_{int} connected in series with an RC polarization network represented by R_0 and C_0, as shown in Figure 3. The model captures both the instantaneous voltage drop caused by internal resistance and the slower transient dynamics associated with electrochemical polarization.

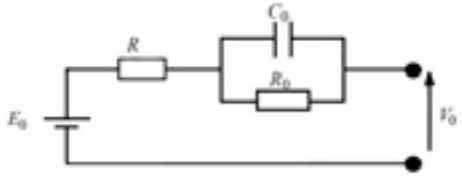


Fig. 3. First-order Thevenin equivalent circuit model used for battery characterization and digital twin implementation.

The discrete-time formulation employed in this work is given by:

$$\begin{aligned} V_k = & V_{oc,k} + (V_{k-1} - V_{oc,k-1})\, e^{-\frac{T_s}{R_0 C_0}} \\ & - \left[R_0 - (R_0 + R_{int}) e^{-\frac{T_s}{R_0 C_0}}\right] I_{k-1} - R_{int} I_k \end{aligned} \tag{4}$$

where R_{int} represents the instantaneous ohmic resistance and R_0 and C_0 describe the transient polarization dynamics of the battery.

3) Parameter Identification: The parameters of the Thevenin model were identified through an optimization-based fitting process in which the error between the experimental terminal voltage and the model output was minimized.

Separate ECM parameterizations were performed for charge and discharge operation due to the asymmetry observed in the battery dynamic response. However, the discharge ECM was selected as the primary process model for the UKF implementation and the digital twin framework because it provided improved numerical stability and more consistent behavior.

The optimization minimized the RMSE between measured and simulated terminal voltage under dynamic current profiles.

D. Digital Twin Implementation

The parameterized Thevenin ECM was employed as the foundation of the battery digital twin. The digital twin acts as a virtual representation of the physical battery system, reproducing its dynamic electrical behavior under charge, discharge, and rest conditions.

The implemented framework combines the ECM with a state-machine-based supervisory structure that governs the operational transitions between charge, discharge, and open-circuit relaxation states, as illustrated in Figure 4.

The digital twin continuously updates the battery voltage, current, state of charge, and cycle count as a function of the selected operating profile.

The implementation supports charge, discharge, open-circuit rest, pulsed current profiles, and continuous long-duration virtual cycling.

The resulting framework generates synthetic datasets containing voltage, current, SOC, and cycle-number information, which are automatically stored in external files for subsequent analysis and estimator validation.

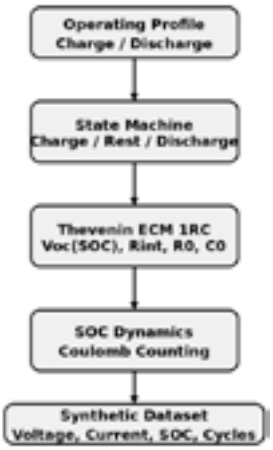


Fig. 4. Digital twin architecture combining the ECM, state machine, and SOC dynamics.

Once parameterized, the digital twin serves three functions: it generates synthetic datasets for estimator training and validation, enables long-duration virtual cycling without degrading the physical pack, and provides a controlled environment to evaluate estimator sensitivity to initialization errors and parameter uncertainty before hardware deployment.

E. State-of-Charge Estimation

The proposed SoC estimation framework combines Coulomb Counting (CC) with an Unscented Kalman Filter (UKF), forming a hybrid estimator that benefits from the simplicity of current integration while compensating for long-term drift through voltage-feedback correction.

1) Coulomb Counting: The initial SoC estimation was obtained using the Coulomb Counting method, which estimates the battery charge level by integrating the measured current over time:

$$SOC_k = SOC_{k-1} - \frac{\eta T_s}{Q_n} I_k \tag{5}$$

where Q_n is the nominal battery capacity, I_k is the measured current, T_s is the sampling period, and η is the Coulombic efficiency.

Although computationally efficient and simple to implement in real-time embedded systems, Coulomb Counting accumulates error over time due to sensor noise, current offset, integration drift, and uncertainty in the actual battery capacity.

2) Unscented Kalman Filter: To compensate for the long-term drift inherent to Coulomb Counting, an Unscented Kalman Filter (UKF) was implemented as the correction stage of the estimator.

The UKF uses the ECM as the nonlinear process model and continuously corrects the predicted SoC using the measured terminal voltage as the observable output.

Unlike the Extended Kalman Filter (EKF), the UKF avoids explicit Jacobian linearization by propagating a deterministic set of sigma points through the nonlinear system equations.

The state vector employed in this work is defined as:

$$x_k = \begin{bmatrix} SoC_k \\ V_{RC,k} \end{bmatrix} \tag{6}$$

where SoC_k represents the battery state of charge and $V_{RC,k}$ represents the polarization voltage of the RC network.

At each sampling instant, the UKF performs sigma-point generation, nonlinear state prediction, measurement prediction, covariance update, and state correction. The discharge OCV-SoC relationship was employed as the nonlinear voltage mapping of the UKF measurement model due to its superior stability during experimental validation.

The complete framework was validated against both experimental and synthetic datasets, allowing direct comparison of CC and UKF performance under real and virtual conditions. The per-sample execution time of the UKF on the host platform was measured below $2\,\mathrm{ms}$, confirming its suitability for real-time embedded deployment at $1\,\mathrm{Hz}$ sampling rates.

V. Simulations and Results

A. Experimental Cycling Data and Cycle Profile Analysis

The experimental characterization of the battery pack was carried out across the three cycling phases described in Section IV, and the resulting voltage, current, and temperature time series constitute the primary dataset used both for digital twin parameterization and for validation of the CC-UKF estimator.

Before presenting the estimation results, this section analyzes representative cycles from the raw acquisition data to illustrate the qualitative differences between the constant-current and stepped-current discharge profiles.

A note on the dual-signal representation: all plots show two signals per channel, labeled *Arduino* and *BK*. The Arduino signal reflects true battery terminal measurements, while the BK readback reports the instrument's internal set point. Since the BK was operated as a controlled sink adjusted until the Arduino-sensed current reached the target value, its readback is systematically higher due to resistive drops across cabling and the buck converter. This offset is by design, not a measurement error.

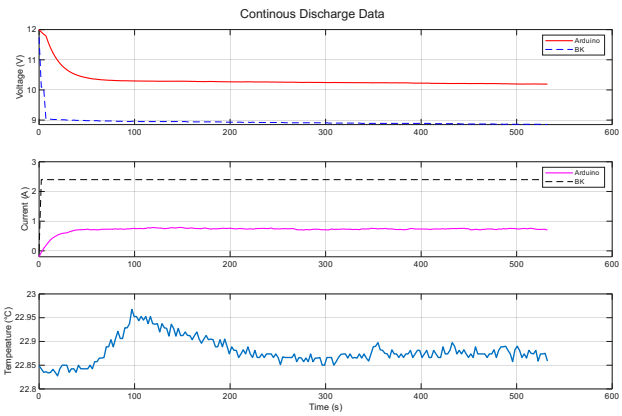


Fig. 5. Continuous Discharge Data Example

1) Phase I: Constant-Current Discharge: Fig. 5 presents the voltage, current, and temperature profiles recorded during a representative constant-current discharge of Phase I. The voltage trace exhibits the characteristic discharge curve of a lithium-ion pack: a sharp initial drop driven by the ohmic resistance of the pack, followed by a long quasi-linear plateau in which the terminal voltage decays slowly until the cutoff condition is reached. This plateau region is electrochemically significant because it corresponds to the nearly flat portion of the OCV-SoC curve of the lithium-ion chemistry, providing limited voltage observability for the UKF during this phase. Its accurate reproduction by the digital twin ECM is therefore critical for maintaining estimation accuracy throughout the discharge. The current panel confirms the steady-state operation of the regulation algorithm: after a brief convergence transient at cycle onset, the Arduino-measured current stabilizes at the target value and remains constant for the duration of the cycle, validating the compensation mechanism. The thermal response follows the expected moderate-rate pattern, with a small temperature rise driven by Joule heating at the onset of discharge followed by a gradual return toward ambient, confirming quasi-isothermal operation and validating the isothermal assumption used in the ECM parameterization for this phase.

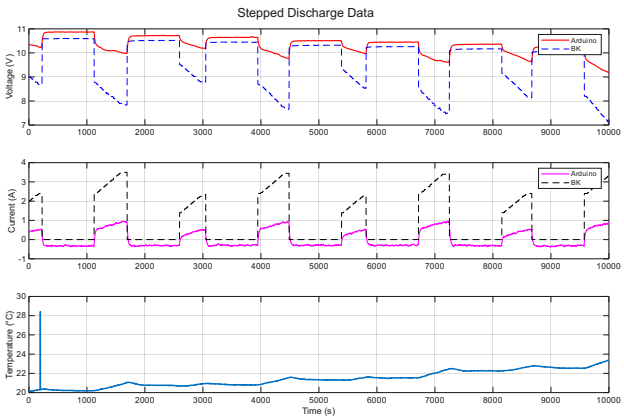


Fig. 6. Stepped Discharge Data Example.

2) Phase III: Stepped-Current Discharge with Extended Rest Periods: Fig. 6 presents the profiles recorded during a representative stepped discharge of Phase III, which spans several hours due to the extended rest periods inserted between each current segment. The voltage trace immediately reveals the diagnostic signature of the HPPC-type profile: a repeated pattern in which the terminal voltage drops during each active discharge segment and partially recovers toward the open-circuit value during each rest interval. These relaxation transients are the key electrochemical fingerprint from which the polarization resistance and capacitance of the Thévenin ECM are identified. The overall envelope of the local voltage minima decreases monotonically across the cycle, tracing the discharge trajectory of the pack and providing the OCV-SoC mapping required by the UKF observation model. The current panel exhibits the stepped amplitude structure clearly, with the soft-start ramp at each segment onset visible in both channels and the Arduino-measured current correctly reading zero during every rest interval, confirming that open-circuit conditions are fully established at the battery terminals. The thermal response is considerably richer than in Phase I: the alternation between active heating during discharge segments and partial cooling during rest periods produces a cyclic thermal oscillation whose amplitude is substantially larger than the monotonic rise observed under constant current. This richer thermal excitation makes the Phase III dataset considerably more valuable for temperature-dependent ECM parameterization, as it provides the thermal dynamics required to identify the coupling between internal resistance and temperature that the UKF must account for under variable operating conditions.

Taken together, the two datasets validate the platform's ability to impose and accurately record two fundamentally different electrochemical excitation regimes. The constant-current profile provides clean, monotonic data for capacity determination and initial OCV-SoC mapping, while the stepped profile delivers the rich dynamical content required for full ECM parameterization. Both datasets are representative of the broader collection of cycles acquired across all three phases, and the Arduino-sensed signals constitute the authoritative measurement records used as inputs to the digital twin and the CC-UKF estimator in the following sections.

B. OCV-SoC Characterization Results

The OCV-SoC characterization procedure yielded a set of experimental open-circuit voltage points extracted during the relaxation intervals described in Section IV. These points were used to construct the nonlinear voltage mapping required by both the ECM and the UKF measurement model.

Figure 7 presents the experimental OCV-SoC points together with the polynomial fitting curves evaluated during the regression analysis.

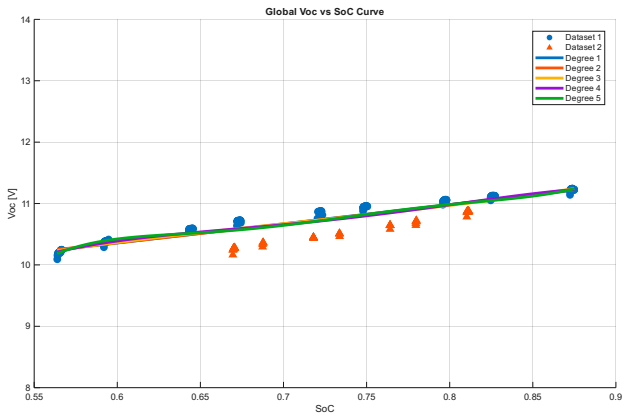


Fig. 7. Experimental OCV-SoC points and polynomial fitting comparison for different regression orders.

To evaluate the trade-off between fitting accuracy and numerical stability, polynomial regressions from first- to fifth-order were compared using the Root Mean Square Error

(RMSE) metric. Table II summarizes the resulting fitting errors.

TABLE II
POLYNOMIAL REGRESSION COMPARISON FOR OCV-SOC FITTING

Polynomial Order	RMSE [V]
1	0.136977
2	0.136911
3	0.136398
4	0.135537
5	0.134119

Although higher-order polynomial models yielded lower RMSE values, the final selected equation was not necessarily the one with the minimum fitting error. Instead, a third-order polynomial model was chosen considering its global smoothness, numerical stability, and compatibility with the ECM and UKF implementations. In practice, higher-order regressions exhibited oscillatory behavior outside the fitting region, which negatively affected the stability of the observer during dynamic operation.

The final discharge OCV–SoC relationship, based on the selected third-order model, demonstrated stable behavior throughout the operating range and was therefore adopted as the reference nonlinear voltage mapping for the remainder of this work.

C. Equivalent Circuit Model Validation

The Thevenin ECM parameters were identified independently for charge and discharge operation through optimization-based fitting against experimental voltage measurements.

Figure 8 compares the experimental terminal voltage with the simulated ECM response obtained during dynamic discharge operation.

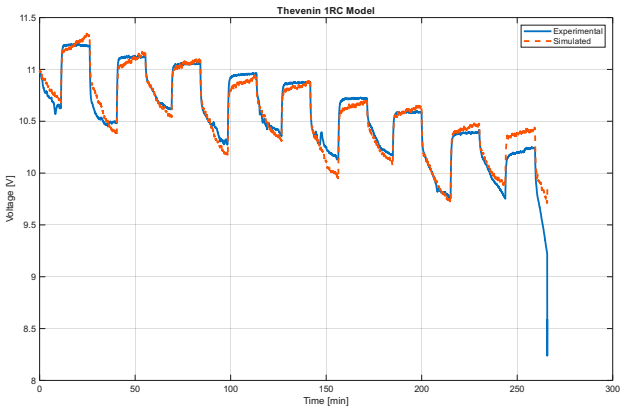


Fig. 8. Experimental terminal voltage versus ECM simulated response during dynamic discharge operation.

The model successfully reproduced the global voltage dynamics of the battery, including the transient relaxation behavior caused by the stepped-current excitation profiles. Although high-frequency transients associated with instrumentation and switching effects were not fully captured by the first-order ECM, the overall voltage trajectory was accurately represented.

Table III summarizes the identified parameters for both charge and discharge operation.

TABLE III
IDENTIFIED ECM PARAMETERS

Mode	R_{int}	R_0	C_0
Charge	0.09998944	0.09999722	4000
Discharge	0.50523032	0.55510210	5380.22

The discharge model shows larger resistance values, reflecting stronger polarization during energy extraction, while the charge model yields smaller resistances and a smoother transient response. The discharge ECM was selected as the primary process model due to its superior numerical stability.

D. State-of-Charge Estimation Results

The performance of the proposed hybrid Coulomb Counting–Unscented Kalman Filter estimator was evaluated using both experimental discharge datasets and synthetic datasets generated by the digital twin.

1) Experimental Discharge Validation: Figure 9 compares the SoC trajectories obtained using basic Coulomb Counting, corrected Coulomb Counting, and the proposed UKF-based estimator during a representative experimental discharge cycle.

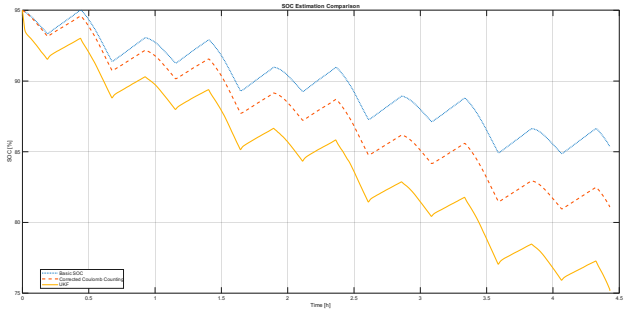


Fig. 9. Experimental terminal voltage versus UKF-reconstructed voltage during discharge operation.

As observed in Fig. 9, the UKF-based estimator follows the general discharge trend while providing a smoother and dynamically corrected SoC trajectory using voltage feedback from the ECM model. In contrast, standalone Coulomb Counting relies exclusively on current integration and is therefore more sensitive to cumulative drift caused by sensor offset and measurement uncertainty over long-duration operation.

Figure 10 compares the experimental terminal voltage against the voltage reconstructed by the UKF observer during the same discharge cycle.

The close agreement between the experimental voltage and the UKF-estimated voltage shown in Fig. 10 confirms that the observer successfully captures the dominant battery dynamics through the ECM-based correction stage.

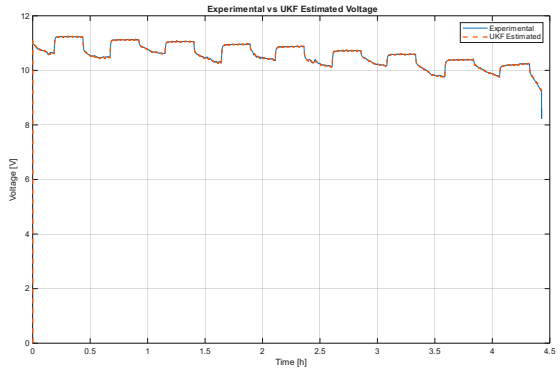


Fig. 10. Comparison between Coulomb Counting and UKF Voltage estimation during experimental discharge operation.

2) Experimental Charge Validation: The same estimator was subsequently evaluated during experimental charge operation. In contrast to the discharge case, the UKF exhibited increased sensitivity under charging conditions due to the stronger nonlinearities and polarization effects associated with the charging process, as well as the asymmetry between the charge and discharge OCV-SoC characteristics.

Although the observer remained capable of tracking the global SoC trend, larger oscillations and temporary overestimations were observed during charge operation, indicating the increased complexity of voltage-based state estimation in this operating regime.

Table IV summarizes the RMSE obtained by the hybrid CC–UKF estimator under both discharge and charge operating conditions.

TABLE IV
RMSE COMPARISON: STANDALONE CC VS. HYBRID CC–UKF

Method	Discharge RMSE	Charge RMSE
Coulomb Counting	0.1823	0.1341
CC + UKF	0.0567	0.0994

The results confirm that the CC–UKF hybrid reduces the discharge RMSE by approximately 69% relative to standalone Coulomb Counting, and by 26% during charge operation, where stronger electrochemical nonlinearities limit the correction capability of the voltage-feedback stage.

3) Digital Twin Observer Validation: Finally, the UKF was evaluated using synthetic datasets generated by the digital twin framework.

Figure 11 compares the real virtual SoC trajectory generated by the digital twin against the corresponding UKF estimation.

The estimator exhibited stable convergence toward the virtual reference trajectory and remained robust under noisy synthetic measurements, confirming the digital twin as a suitable environment for observer validation without requiring continuous experimental cycling.

VI. CONCLUSIONS

The proposed experimental platform successfully enabled the characterization of lithium-ion battery dynamics under multiple cycling conditions, providing reliable datasets for ECM parameterization and observer validation. The first-order Thevenin ECM reproduced the dominant voltage dynamics of the battery with sufficient accuracy while maintaining low computational complexity suitable for embedded implementation. The hybrid CC-UKF estimator improved SoC estimation stability during discharge compared to standalone Coulomb Counting, with an RMSE of 0.0567 versus 0.0994 under charging conditions, where stronger nonlinearities increase estimation difficulty. The digital twin framework enabled virtual long-duration cycling and synthetic dataset generation, reducing destructive experimental testing and providing a reusable environment for future observer development.

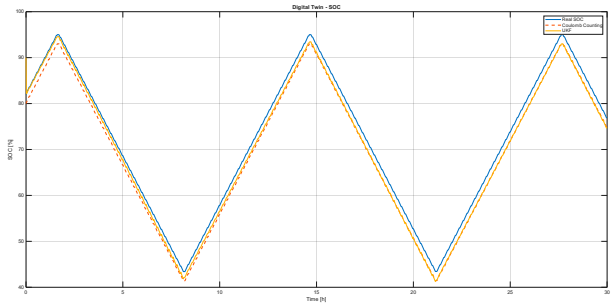


Fig. 11. UKF validation using synthetic datasets generated by the digital twin.

REFERENCES

[1] K. Movassagh, S. A. Raihan, B. Balasingam, and K. Pattipati, "A critical look at Coulomb counting towards improving the Kalman filter based state of charge tracking algorithms in rechargeable batteries," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021.

[2] G. Sugumaran and V. Indragandhi, "Hardware implementation of EKF-based SOC estimate for lithium-ion batteries in electric vehicle applications," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025.

[3] O. A. Ahmed *et al.*, "On equivalent circuit model-based state-of-charge estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles," *IEEE Access*, 2025.

[4] I. Baccouche, S. Jemmali, A. Mlayah, B. Manai, and N. E. Ben Amara, "Implementation of an improved Coulomb-counting algorithm based on a piecewise SOC-OCV relationship for SOC estimation of Li-Ion battery," *arXiv preprint*, 2018. arXiv:1803.10654.

[5] Z. Huang *et al.*, "Joint estimation of SOC and SOH for lithium-ion batteries based on an adaptive multi-innovations unscented H-infinity filter with fractional-order equivalent circuit model," *Scientific Reports*, vol. 15, 2025.

[6] K. Zhao, Y. Liu, Y. Zhou, *et al.*, "Digital twin-supported battery state estimation based on TCN-LSTM neural networks and transfer learning," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 567–579, 2025.

[7] S. Nyamathulla and C. Dhanamjayulu, "Battery energy storage capacity estimation for microgrids using digital twin concept," *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4540, 2023.

[8] S. Li, S. Pischinger, C. He, L. Lü, and M. Görgen, "Experimental data-driven parameter identification and state of charge estimation for a Li-ion battery equivalent circuit model," *Energies*, vol. 11, no. 5, p. 1033, 2018.

[9] J. Sun and J. Kainz, "Optimization of hybrid pulse power characterization profile for equivalent circuit model parameter identification of Li-ion battery based on Taguchi method," *Journal of Energy Storage*, vol. 70, p. 108034, 2023.

[10] Neware Technology, "Testing principles and parameter configuration for Hybrid Pulse Power Characterization (HPPC)." https://www.neware.net/news/testing-principles-and-parameter-configuration-for-hybrid-pulse-power-characteri/230/135.html, 2025.

Guía Metodológica Conceptual para el Desarrollo de un Emulador: Un Enfoque Práctico Basado en el Hardware de la Game Boy

Nicolás Osorio Bustos, Ing.(c)
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
nicolas.osoriob@uqvirtual.edu.co

Santiago Andrés Navarro Ortiz, Ing.(c)
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
santiagoa.navarroo@uqvirtual.edu.co

Luis Manuel Osorio Medina, Ing.(c)
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
luism.osoriom@uqvirtual.edu.co

Luis Eduardo Sepúlveda Rodríguez, PhD
Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
lesepulveda@uniquindio.edu.co

***Resumen*— La emulación de sistemas informáticos es una herramienta fundamental para la preservación digital y el estudio de la arquitectura de computadores. Aunque se han implementado diversos proyectos de software destinados a replicar con precisión el funcionamiento de hardware y plataformas obsoletas, aún persisten dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de esta temática dada su alta complejidad. En este contexto, y a partir de la experiencia de los autores en el desarrollo de emuladores y programación de bajo nivel, se identificó la carencia de una metodología estandarizada, lo que ocasiona que la construcción de estos sistemas dependa casi exclusivamente de información informal y fragmentada en foros. Esta situación crea barreras de entrada, dificulta la transferencia de conocimiento y compromete la fidelidad técnica. Para abordar esta problemática en la educación en ingeniería, este trabajo propone la construcción de una guía conceptual y metodológica estructurada para el desarrollo de emuladores, tomando el hardware de la Game Boy como caso de referencia por su viabilidad didáctica. El documento especifica los elementos de diseño orientados a la emulación, formaliza la arquitectura del sistema y determina un plan de validación. Esta guía proporciona un marco de referencia replicable para otros sistemas, ampliando las posibilidades de investigación y enseñanza en el campo de la emulación e infraestructura computacional.**

Keywords*— *Arquitectura computacional, Emulación, Game Boy, Guía, Metodología.

I. Introducción

La preservación del patrimonio digital se ha convertido en un desafío crítico para bibliotecas, archivos y centros de investigación. Paralelamente, la emulación se ha consolidado como una tecnología indispensable en la industria moderna; un ejemplo de ello es el entorno Rosetta de Apple, diseñado para ejecutar software de arquitectura x86 en procesadores ARM64 de la serie M.

Entre las estrategias disponibles, la emulación destaca como la técnica que garantiza mayor fidelidad funcional al permitir que software histórico se ejecute sobre hardware moderno sin alterar su comportamiento original [1]. A diferencia de la migración de formatos, la emulación preserva la experiencia completa del sistema: gráficos, temporización, interacción y comportamiento del procesador [2].

Sin embargo, el campo de desarrollo de emuladores enfrenta un problema: la ausencia de metodologías estandarizadas. El conocimiento técnico se encuentra fragmentado en foros como Reddit o GitHub, documentación de comunidades no oficiales y repositorios individuales. Esta dispersión genera tres consecuencias directas: (i) altas barreras de entrada para nuevos desarrolladores, (ii) errores sistemáticos en la interpretación de especificaciones de hardware, y (iii) emuladores con fidelidad técnica inconsistente [3].

La consola Game Boy de Nintendo, lanzada en 1989, representa un caso de estudio idóneo para abordar esta problemática. Su arquitectura, basada en el procesador *Sharp LR35902*, derivado del Intel 8080 y el Zilog Z80, es suficientemente compleja para ilustrar los principios fundamentales de la emulación sin la complejidad de plataformas modernas [4]. Además, cuenta con documentación técnica abierta y una comunidad activa que la convierte en referente pedagógico ampliamente adoptado [5].

El presente trabajo propone una guía metodológica conceptual para el desarrollo de emuladores, tomando el

hardware de la Game Boy como caso de estudio. El aporte central no es la implementación de un emulador completo per se, sino la construcción de un recurso estructurado, y técnicamente confiable que organice el flujo de conocimiento necesario para desarrollar emuladores sin importar el sistema, explicando y abstrayendo los conceptos generales necesarios para desarrollar cualquier emulador, reduciendo las barreras de entrada e incrementando la fidelidad de los proyectos resultantes.

El resto del trabajo se estructura de la siguiente manera: la Sección II expone el estado del arte relacionado con la emulación, la preservación digital y los enfoques pedagógicos actuales. La Sección III establece el marco conceptual, detallando los fundamentos teóricos y la arquitectura de hardware de la consola Game Boy. En la Sección IV se describe la metodología de cinco fases propuesta para el diseño, desarrollo y validación de la guía. Posteriormente, la Sección V presenta los resultados preliminares obtenidos en la etapa de caracterización documental. Finalmente, la Sección VI recoge las conclusiones, la viabilidad del proyecto y el impacto esperado de la investigación.

II. Estado del Arte

A. *Emulación y Preservación Digital*

La emulación como estrategia de preservación digital ha sido documentada extensamente. Kaltman et al. [1] la definen como la implementación de una máquina virtual en un sistema anfitrión cuya ISA difiere del sistema emulado, de modo que ninguna instrucción de la máquina virtual se ejecuta directamente en el hardware anfitrión. Van Vlijmen y Van der Windt [2] reportaron resultados del proyecto Dioscuri de la Biblioteca Nacional de los Países Bajos, el cual fue el primer emulador modular para preservación digital, evidenciando la viabilidad técnica de la emulación como herramienta institucional.

Cardoso et al. [6] distinguen con precisión entre emulación y virtualización: mientras la virtualización opera cuando la máquina virtual comparte la ISA con el sistema anfitrión, la emulación abarca además los casos en que es necesaria la traducción completa de instrucciones. Esta distinción es relevante metodológicamente porque determina el nivel de abstracción y complejidad requerida en la implementación.

B. *Emuladores: Proyectos de Referencia*

El ecosistema de emuladores es uno de los más maduros en la comunidad de la preservación digital. Proyectos de código abierto como *BGB*[7], *SameBoy*[8] y *mGBA*[9] han alcanzado niveles de precisión de ciclo que los convierten en referentes técnicos de facto. *Gekkio* [5] documenta de forma exhaustiva el comportamiento del hardware original en su Game Boy Complete Technical Reference, describiendo el ciclo de bus, el comportamiento de la PPU (*Pixel Processing Unit*) y los modos de direccionamiento de memoria con nivel de detalle suficiente para implementaciones de alta fidelidad.

Desde el ámbito académico, el trabajo *Battery-Free* Game Boy [10] demuestra la viabilidad de implementar un emulador de Game Boy sobre hardware de muy bajo consumo, validando la portabilidad de la arquitectura emulada. Más recientemente, el Game Boy Learning Environment [4] introduce una suite de aprendizaje por refuerzo basada en juegos de Game Boy, evidenciando el potencial del emulador como plataforma de investigación y educación en ciencias de la computación.

C. *Metodologías y Marcos Pedagógicos*

La enseñanza de arquitectura de computadores a través de proyectos de simulación y emulación ha mostrado resultados positivos en la motivación y comprensión de estudiantes 11]. Hernández Mota et al. [12] evaluaron el uso de juegos y simulaciones como recurso didáctico para conceptos de arquitectura, evidenciando mejoras en la comprensión de ciclos de instrucción y manejo de memoria. Sin embargo, estos trabajos se enfocan en el uso de emuladores existentes como herramienta pedagógica, y no centran su enfoque en el proceso de desarrollo de un emulador como tal.

En el campo de pruebas de emuladores, Varghese et al. [3] proponen una metodología basada en *fuzzing* para validar la corrección de emuladores de CPU, identificando comportamientos divergentes entre la implementación y el hardware real. Este trabajo es uno de los pocos que aborda sistemáticamente la validación técnica de emuladores, pero no provee de forma explícita una metodología integral para su desarrollo desde cero. La brecha identificada, un marco que articule conceptualización, diseño, implementación y validación de emuladores con criterios pedagógicos, sustenta la propuesta de este trabajo.

III. Marco Conceptual

A. *Conceptos Fundamentales*

La emulación se fundamenta en tres conceptos interrelacionados. La arquitectura del conjunto de instrucciones (ISA, por sus siglas en inglés) define el conjunto de instrucciones que el procesador puede ejecutar; es la interfaz entre el software y el hardware [6]. La máquina virtual (VM) es el software que reproduce el comportamiento de una máquina física dentro de otra, ejecutando instrucciones a través de una capa de traducción o interpretación. El sistema heredado (l*egacy system*) es aquel software y/o hardware con más de diez años de antigüedad que sigue cumpliendo su función original pero no permite expansión ni interoperabilidad con sistemas modernos [13].

El ciclo fundamental de un emulador sigue la secuencia *fetch-decode-execute*: (1) lectura de la instrucción desde memoria (*fetch*), (2) decodificación del opcode para determinar la operación a realizar (*decode*), y (3) ejecución de la operación sobre los registros y la memoria del sistema emulado (*execute*). La precisión temporal (*timing accuracy*) de este ciclo determina en gran medida la fidelidad del emulador.

B. *Arquitectura del Hardware de la Game Boy*

La Game Boy (modelo DMG-01, 1989) cuenta con una arquitectura basada en cinco componentes principales. La unidad central de procesamiento (CPU) Sharp LR35902 opera a 4.194304 MHz y es funcionalmente similar al Intel 8080, con instrucciones del Zilog Z80 [5]. Cuenta con registros de 8 bits (A, B, C, D, E, F, H, L) y registros de 16 bits compuestos (AF, BC, DE, HL), además del contador de programa (PC) y el

puntero de pila (SP). El set de instrucciones incluye 256 opcodes estándar y 256 opcodes extendidos con prefijo CB.

El subsistema de memoria utiliza un mapa de 16 bits (0x0000-0xFFFF) que incluye ROM del cartucho (0x0000-0x7FFF), VRAM (0x8000-0x9FFF), RAM externa del cartucho (0xA000-0xBFFF), RAM interna (0xC000-0xDFFF) y registros de I/O (0xFF00-0xFF7F) [5]. Por su parte, la unidad de procesamiento de imágenes (PPU) genera la imagen a 160×144 píxeles a 59.73 Hz, utilizando tiles de 8×8 píxeles organizados en fondos (background) y sprites.

Adicionalmente, el sistema incluye una unidad de procesamiento de audio (APU) capaz de manejar cuatro canales de audio, un temporizador hardware y un controlador de interrupciones, elementos que deben sincronizarse rigurosamente con los ciclos de la CPU.

TABLE I. COMPONENTES PRINCIPALES DEL HARDWARE DE LA GAME BOY

Componente	Especificación técnica	Relevancia para emulación
CPU Sharp LR35902	4.194304 MHz, ISA derivada Z80/8080	Ciclo fetch-decode-execute, flags, interrupciones
MMU / Bus de memoria	Espacio 16-bit (0x0000-0xFFFF)	Mapeo de regiones, bancos de ROM/RAM
PPU (Video)	160×144 px, 59.73 Hz, 4 tonos	Modo de renderizado, sincronización V/H-blank
APU (Audio)	4 canales, 2 tonos+onda+ruido	Generación de formas de onda, mezcla
Temporizador + I/O	Registros FF04–FF07, Joypad FF00	Precisión de ciclo, interrupciones de entrada

IV. METODOLOGÍA

El presente proyecto adopta una metodología de naturaleza aplicada, estructurada en cinco fases secuenciales que van desde la caracterización conceptual hasta la validación de la guía mediante un prototipo funcional. La Fig. 1 muestra el flujo general del proceso. Cada fase produce entregables concretos que sirven de insumo para la fase siguiente, garantizando trazabilidad y coherencia metodológica

A. Fase 1: Caracterización Conceptual y Documental

Se realiza una revisión sistemática de fuentes académicas (Web of Science, IEEE Xplore, ACM Digital Library, Scopus), documentación técnica oficial del hardware (Pan Docs [14], GB *Complete Technical Reference* [5]) y recursos comunitarios reconocidos. Los criterios de inclusión son: relevancia temática (emulación, arquitectura Game Boy, entre otros), accesibilidad y nivel de formalidad técnica. Los conceptos identificados se agrupan en categorías: (a) fundamentos de emulación, (b) componentes de hardware, (c) técnicas de implementación, y (d) marcos de validación. El resultado es una matriz de caracterización conceptual que mapea cada concepto a su fuente y relevancia para el proceso de emulación.

B. Fase 2: Caracterización de Elementos de Diseño

Se analizan diseños de referencia de emuladores de Game Boy de código abierto como *SameBoy* [8] y emuladores de plataformas de complejidad similar como Master System o NES. Para cada diseño se identifican: (1) los componentes funcionales principales y su correspondencia con el hardware real, (2) los patrones de diseño empleados, y (3) las relaciones de acoplamiento entre subsistemas. El resultado de esta fase es un modelo arquitectónico de referencia de nivel conceptual, seleccionado mediante el método de Decisión de Alternativas y Resolución (DAR, por sus siglas en inglés) del modelo *Capability Maturity Model Integration* (CMMI) [15].

C. Fase 3: Selección de Referentes Metodológicos

Se consultan marcos de referencia de ingeniería de software, como el Proceso Unificado de Rational (RUP) [16] y la norma ISO/IEC 25010 [17] para calidad de producto, así como marcos pedagógicos, incluyendo la Taxonomía de Diseño Instruccional de Bloom [18] y el modelo ADDIE [19] (Análisis, Diseño, Desarrollo, Implementación y Evaluación), para identificar los elementos estructurales más pertinentes para una guía de esta índole. El criterio de selección se enfoca en marcos que sean: verificables, escalables y comprensibles. El resultado es el esqueleto estructural de la guía: secciones, fases, actividades, productos esperados y criterios de completitud.

D. Fase 4: Diseño de la Guía Metodológica

Con los insumos de las fases anteriores se diseña la guía metodológica, organizada en módulos que corresponden a los subsistemas del hardware emulado: CPU, memoria, video (PPU) y I/O. Cada módulo especifica: conceptos clave, especificaciones técnicas de referencia, comportamientos esperados (*test cases*), patrones de diseño recomendados y criterios de validación de fidelidad. La guía incluye además un glosario, una guía de recursos y una sección de errores comunes documentados.

E. Fase 5: Validación mediante Prototipo Funcional

La guía se valida mediante la implementación de un prototipo de emulador que sigue estrictamente sus indicaciones. El plan de pruebas incluye la ejecución de ROM de prueba estandarizadas (*Blargg's test ROMs* [20], *Mooneye GB test suite* [21]) que verifican el comportamiento de la CPU y la PPU. Los resultados se comparan contra el comportamiento documentado del hardware original, cuantificando la correspondencia mediante una métrica de fidelidad por componente. El plan contempla ciclos iterativos de corrección de la guía basados en los resultados de las pruebas, cuantificando la correspondencia mediante una métrica de fidelidad por componente. Adicionalmente, el plan contempla una validación cruzada con grupos de control académicos para evaluar la viabilidad didáctica del instrumento, propiciando ciclos iterativos de mejora de la guía basados en estos resultados empíricos.

V. RESULTADOS PRELIMINARES

A la fecha de presentación de este artículo, el trabajo se encuentra en sus etapas iniciales, habiendo desarrollado una

revisión preliminar correspondiente a la Fase 1 (Caracterización Conceptual y Documental). Los hallazgos tempranos obtenidos hasta el momento se estructuran en dos ejes: el mapeo inicial de la literatura y la validación de la viabilidad técnica del proyecto.

A. *Caracterización de Fuentes*

Para la revisión preliminar se consultaron las bases de datos académicas Web of Science e IEEE Xplore con la siguiente cadena de búsqueda: ("emulator" OR "emulation") AND ("methodology" OR "guide" OR "framework" OR "pedagogy") AND ("Game Boy").

La búsqueda arrojó un corpus inicial de 625 documentos publicados hasta la fecha y sin elementos duplicados. Posteriormente, se seleccionaron los documentos más relevantes al tema de este trabajo sin tener en cuenta aquellos que tomaran la palabra "emulación" en otros dominios de investigación y se conformó un corpus final de 31 documentos distribuidos en 4 ejes principales: Game Boy y preservación digital de hardware (n=5), Metodología de emulación de CPU / procesadores (n=10), Emulación de memoria y subsistemas (n=3), Co-diseño hardware/software y metodologías de verificación (n=13).

La Tabla II resume la distribución por eje temático.

TABLE II. DISTRIBUCIÓN DE FUENTES POR TEMÁTICA

Eje temático	N.º de documentos	Porcentaje (%)
Game Boy y preservación digital de hardware	5	16 %
Metodología de emulación de CPU / procesadores	10	32%
Emulación de memoria y subsistemas	3	10 %
Co-diseño hardware/software y metodologías de verificación	13	42 %

B. *Validación de Factibilidad Técnica*

A pesar de encontrarse en una etapa de formulación, durante este proceso se han realizado verificaciones para constatar la factibilidad de la propuesta. Con este fin se ha iniciado un desarrollo exploratorio del emulador con base en la Game Boy. Este prototipo funciona como un instrumento de diagnóstico.

En primera instancia se implementaron y verificaron las 256 instrucciones del set estándar [22], abarcando operaciones aritméticas, lógicas y de carga. Asimismo, se ha estructurado el bucle principal de ejecución (*Fetch-Decode-Execute*) y también se definió el mapa de direcciones de 16 bits implementando la lógica básica para la lectura de la ROM.

Entre otros aspectos técnicos importantes, se logró leer y mostrar la información de la cabecera de varias ROM así como implementar la verificación del *checksum* para corroborar que un ROM es válida y compatible con el sistema antes de iniciar su ejecución.

VI. CONCLUSIONES

Este trabajo identifica y aborda una brecha real en el campo de la preservación digital y la arquitectura de computadores: la ausencia de un recurso metodológico estructurado que guíe el desarrollo de emuladores con criterios técnicos y pedagógicos explícitos. La consola Game Boy constituye un caso de estudio óptimo por la madurez de su ecosistema de documentación y la viabilidad de su arquitectura para fines didácticos.

Los resultados preliminares confirman la factibilidad del enfoque propuesto. La revisión preliminar de fuentes relevantes, la comprobación de la idoneidad del hardware y la validación de un diseño basado en el desacoplamiento modular representan contribuciones tempranas y verificables al estado del arte. El modelo metodológico en desarrollo, el cual articula la revisión documental, el análisis de diseños de referencia, los marcos pedagógicos y la validación técnica iterativa, sienta las bases para ser replicado en la emulación de otros sistemas heredados (*legacy systems*) de complejidad similar

El impacto esperado del proyecto opera en tres dimensiones fundamentales: académica (reducción de barreras de entrada al campo de la programación a bajo nivel), técnica (incremento de la fidelidad arquitectónica en los emuladores desarrollados) y patrimonial (contribución formal a la preservación digital). La consolidación del trabajo mediante la ejecución de las Fases 4 y 5 permitirá recabar evidencia empírica y cuantitativa sobre la viabilidad pedagógica de la guía, cerrando así el ciclo de validación del modelo propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los revisores por su tiempo, disposición y dedicación, cuyas observaciones contribuyeron a mejorar la calidad del manuscrito.

REFERENCIAS

[1] E. Kaltman, W. Schwaid-Lindner, D. Jonathan, A. Borman, A. Garnett y L. Masinter, "An Overview of Emulation as a Preservation Method," Council on Library and Information Resources, CLIR pub 194, Washington D.C., EE. UU., 2025.

[2] B. van Vlijmen y J. van der Windt, "Emulation for Digital Preservation in Practice: The Results," Int. J. Digit. Curation, vol. 3, n.º 2, pp. 11–21, 2008.

[3] A. Varghese, N. Srinivasan y R. Uhl, "A Methodology for Testing CPU Emulators," ACM Trans. Archit. Code Optim., vol. 10, n.º 4, Art. 57, dic. 2013. [En línea]. Disponible: https://dl.acm.org/doi/10.1145/2522920.2522922

[4] M. Kozlowski, J. Goodman y P. Watters, "The Game Boy Learning Environment," IEEE Access, vol. 13, 2025. [En línea]. Disponible: https://ieeexplore.ieee.org/document/11020792

[5] Gekkio, "Game Boy: Complete Technical Reference," Informe técnico de código abierto, v. 0.11.1, 2024. [En línea]. Disponible: https://gekkio.fi/files/gb-docs/gbctr.pdf

[6] J. M. P. Cardoso, T. Carvalho, J. G. F. Coutinho y W. Luk, Eds., Reconfigurable Computing: From FPGAs to Hardware/Software Codesign. Nueva York, NY, EE. UU.: Springer, 2021.

[7] BGB Emulator, "BGB - A Gameboy emulator/debugger." [En línea]. Disponible: http://bgb.bircd.org/

[8] L. Borisov, "SameBoy - A highly accurate Game Boy and Game Boy Color emulator." GitHub. [En línea]. Disponible: https://github.com/LIJI32/SameBoy

[9] J. V. L. (endrift), "mGBA - A new Game Boy Advance emulator." [En línea]. Disponible: https://mgba.io/

[10] A. de Winkel, V. Kortbeek, J. Hester y P. Pawełczak, "Battery-Free Game Boy," Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., vol. 4, n.º 3, Art. 111, sep. 2020. [En línea]. Disponible: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3411839

[11] Y. Gebremedhin y P. Bhaskaran, "Teaching Computer Architecture by Designing and Simulating Processors," PLOS ONE, vol. 19, n.º 2, Art. e0298433, feb. 2024.

[12] F. Hernández Mota et al., "Basic Concepts of Computer Architecture Through Games and Simulations," IEEE Trans. Educ., vol. 67, n.º 5, pp. 1–10, 2024.

[13] M. Kulkarni, "Legacy Systems: Understanding the Problems and Modernization Approaches," Int. J. Comput. Appl., vol. 178, n.º 39, pp. 1–5, jun. 2019.

[14] Comunidad gbdev, "Pan Docs - The single most comprehensive technical reference to Game Boy." [En línea]. Disponible: https://gbdev.io/pandocs/

[15] ISACA, "Capability Maturity Model Integration (CMMI) Version 2.0," ISACA, Schaumburg, IL, EE. UU., 2018.

[16] P. Kruchten, The Rational Unified Process: An Introduction, 3ra ed. Boston, MA, EE. UU.: Addison-Wesley Professional, 2003.

[17] ISO, "ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE)," Int. Org. Standardization, Ginebra, Suiza, 2011.

[18] B. S. Bloom, Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals. Nueva York, NY, EE. UU.: Longmans, Green, 1956.

[19] R. M. Branch, Instructional Design: The ADDIE Approach. Nueva York, NY, EE. UU.: Springer, 2009.

[20] S. Green (blargg), "Blargg's Game Boy hardware test ROMs." GitHub. [En línea]. Disponible: https://github.com/retrio/gb-test-roms

[21] G. Postma (Gekkio), "Mooneye GB - A Game Boy research project and emulator." GitHub. [En línea]. Disponible: https://github.com/Gekkio/mooneye-gb

[22] Pastraiser, "Game Boy CPU (LR35902) instruction set." [En línea]. Disponible: https://pastraiser.com/cpu/gameboy/gameboy_opcodes.html

Central de Información para la Salud en Colombia: Propuesta de Mockup de aplicación multiplataforma

Juan Pablo Monroy Montenegro
Facultad de Ingeneria, Diseño e Inovación
Politecnico Grancolombiano
Bogotá D.C
https://orcid.org/0009-0006-3422-0142

Juan Camilo Gonzalez Hurtado
Facultad de Ingeneria, Diseño e Inovación
Politecnico Grancolombiano
Bogotá D.C
https://orcid.org/0009-0002-5565-8443

Daniel Alejandro Girón Gutierréz
Facultad de Ingeneria, Diseño e Inovación
Politecnico Grancolombiano
Bogotá D.C
https://orcid.org/0009-0008-8537-8454

Milton Steven Cardenas Rodriguez
Facultad de Ingeneria, Diseño e Inovación
Politecnico Grancolombiano
Bogotá D.C-
https://orcid.org/0009-0002-3248-222X

Resumen* — *El modelo de salud en Colombia fue instaurado por la Ley 100 de 1993, se basa en un modelo de aseguramiento, el cual busca garantizar el acceso universal a los servicios de salud, el cual se conforma por dos regímenes: el régimen contributivo, que abarca las personas que trabajan o con la capacidad para pagar, y el subsidiado, que este se dirige a la población de bajos recursos y que es financiado por el estado. También en este sistema se encuentra las EPS (Entidad Promotora de Salud) las cuales se encargan de afiliar a los usuarios y gestionar los recursos, mientras que las IPS (Instituciones Prestadoras de Servicio de Salud) se encarga de la prestación de atención médica. Aunque este sistema tiene una gran cobertura a nivel nacional, enfrenta muchos desafíos relacionados a la calidad del servicio y atención al usuario, como lo es la facilidad al acceso de la información sobre el sistema de salud.

Actualmente, no existe un sistema el cual centralice la información pública sobre enfermedades, medicamentos y los procesos de atención que deben seguirse para tratarlas en Colombia. La información existe en portales oficiales como el Ministerio de Salud, el Instituto Nacional de Salud, el INVIMA y el DANE, pero es dispersa. Por esto mismo, la facilidad y accesibilidad se vuelve complicada para la mayoría de las personas que desean encontrar de una manera rápida y eficiente toda esta información, y evitar el estar mucho tiempo navegando e investigando para encontrar los datos de su interés. Esto se puede evidenciar claramente en la página oficial del ministerio de salud, donde en un apartado exclusivo se encuentran relacionados todos los aplicativos móviles que, en teoría, deberían contener toda la información pertinente para tener a la población informada en cuanto a temas de salud se refiere [1]:

Además de esto el vínculo que se encuentra entre la falta de conocimiento y la negligencia médica, pues de acuerdo con los datos presentados por [2], el desconocimiento o la falta de alfabetización en salud (entendida este contexto como la capacidad de las personas para acceder, comprender y aplicar información vinculada a su bienestar) es un factor crítico que impacta la seguridad del paciente y la eficiencia del sistema en Colombia. Esto se debe, entre muchas otras razones, a que este vacío informativo incrementa los riesgos de negligencia puesto que a menudo no se debe a un error individual, sino que se trata de resultados de procesos defectuosos que se agravan por la desinformación u asimetría de información entre el paciente y el personal de salud, algunos ejemplos de esto se detallan a continuación: Pérdida de la Capacidad de Auditoria Ciudadana, Insuficiencia de Talento Humano para Educar. Desconexión e Indiferencia Frente a Eventos Informativos, Asesoramientos y Encuestas de Opinión.

Por lo cual se propone el desarrollo de una aplicación multiplataforma materializado en primera fase en un Mockup, en la cual reúna y centralice toda la información sobre el sistema de salud colombiano, se busca generar un formato inclusivo, amigable, claro y sencillo, para que los usuarios tengan la facilidad de usar la aplicación sin importar si padece alguna discapacidad, y así pueda realizar cualquier consulta y tomar decisiones más seguras sobre su salud.

Palabras clave* — *Mockup app salud, Sistema colombiano de salud, desarrollo tecnológico

I. Introducción

Cuando se habla de salud no solo se hace referencia a uno de los derechos primordiales que tiene todo ciudadano en Colombia para mantener su calidad de vida y la de sus familiares, el cual cabe recalcar está a cargo y debe ser garantizado por el estado colombiano como un servicio público sin excepciones [3], sino que se referencia a uno de los factores clave para el desarrollo de todo un país puesto que se relacionan directamente con la productividad de la ciudadanía, el aprovechamiento de recursos e incluso el aprendizaje y escolarización de los niños [4], no por nada está establecido como uno de los primeros Objetivos de Desarrollo Sostenible y siendo las Naciones Unidas las que mencionan: “Las personas sanas son la base de unas economías sanas”[5].

Es por esto por lo que se instaura el modelo de salud en Colombia por medio de la Ley número 100 de 1993, que se basa en un modelo de aseguramiento el cual busca garantizar el acceso universal a los servicios de salud como derecho irrenunciable de la persona y la comunidad, avalando la calidad de vida acorde con la dignidad humana. Todo esto se conforma por dos regímenes: el régimen contributivo, que abarca las personas que trabajan o con la capacidad para pagar, y el subsidiado, dirigido a la población de bajos recursos y que es financiado por el estado [3]. Dentro de este mismo sistema se encuentran las EPS (Entidad Promotora de Salud), entidades que se encargan de afiliar y registrar a los usuarios, gestionar los recursos y, en general, asegurar el Plan Obligatorio de Salud (POS); las IPS (Instituciones Prestadoras de Servicio de Salud), por otro lado, son todas aquellas entidades que, independientemente de su naturaleza económica, son las encargadas de prestar la atención médica y los trámites que esta conlleve [6].

Aunque este sistema tiene una gran cobertura a nivel nacional, enfrenta muchos desafíos relacionados a la calidad del servicio y atención al usuario, uno de estos es la facilidad al acceso de la información sobre el sistema de salud, siendo bastante dispersa y compleja de encontrar para el ciudadano común.

II. Problemática

Actualmente en Colombia no existe un sistema el cual centralice la información pública sobre enfermedades, medicamentos y procesos de atención que deben seguirse para acceder a un tratamiento específico o para la resolución directa de alguna inquietud del ciudadano referente a algún proceso administrativo, todo se encuentra en los portales oficiales encargados de la comunicación de temas salubres a la población como el Ministerio de Salud, el Instituto Nacional de Salud, el INVIMA y el DANE, sin embargo, se encuentra dispersa dentro de cada una de ellas. Por esto mismo, la accesibilidad se vuelve compleja para la mayoría de las personas que desean encontrar de una manera eficiente y oportuna toda esta información. Teniendo en cuenta que el 51% de la población colombiana realiza búsquedas de síntomas y tratamientos a través de medios digitales, donde un 60% de estos resultados carecen de fundamentos científicos [7], resulta pertinente asegurar el acceso a información confiable y verídica a la ciudadanía, cumpliendo con los principios estandarizados por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) para la transformación digital en este ámbito como la interoperabilidad o la contribución a los bienes digitales con datos abiertos y oficiales [8].

Todo esto se puede evidenciar en la página oficial del Ministerio de salud de Colombia, donde en un apartado exclusivo se encuentran relacionados todos los aplicativos móviles que, en teoría, deberían contener toda la información pertinente para tener a la población informada en cuanto a temas de salud se refiere [6]. Al entrar y verificar cada uno de los aplicativos nos redirige directamente a la página de descarga, donde en primera instancia se impide la descarga por dos razones: no se encuentra el aplicativo o directamente están desactualizadas e imposibilitan la descarga.

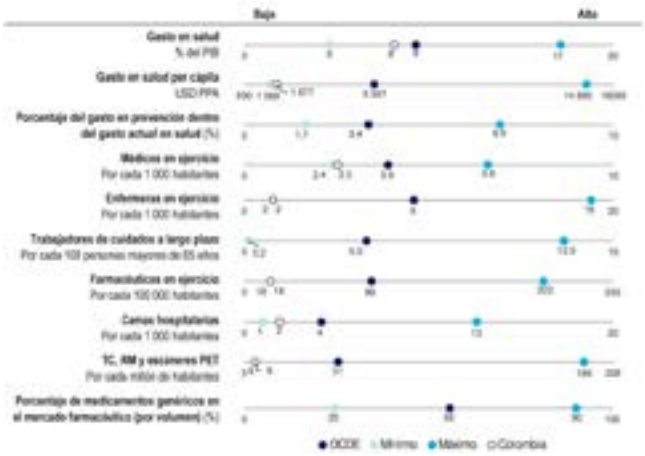
Además de esto dimensionamos el vínculo que se encuentra entre la falta de conocimiento y la negligencia médica, pues de acuerdo con los datos presentados por [7], el desconocimiento o la falta de alfabetización en salud (entendida en este contexto como la capacidad de las personas para acceder, comprender y aplicar información vinculada a su bienestar) es un factor crítico que impacta la seguridad del paciente y la eficiencia del sistema en Colombia, por ello la OMS presenta la promoción de programas de alfabetización digital, científica y en materia de salud como uno de los factores claves para combatir la desinformación relacionada con la salud pública, recurriendo a tecnologías como una app móvil para dicha tarea [9]. Esto se debe, entre muchas otras razones, a que este vacío informativo incrementa los riesgos de negligencia puesto que a menudo no se debe a un error individual, sino que se trata de resultados de procesos defectuosos que se agravan por la desinformación o asimetría de información entre el paciente y el personal de salud. En un documento informativo de la Universidad de Nebraska [10] señala que cualquier persona puede ser susceptible a estas problemáticas independientemente de su nivel demográfico o educativo, estando ligado a factores como las emociones del paciente, la desconfianza, información frecuente encontrada en la red o directamente por sistemas de creencias existentes, generando escenarios de riesgo que se detallan a continuación:

Pérdida de la Capacidad de Auditoria Ciudadana. Cuando un ciudadano no conoce los protocolos y procesos que normalmente se deben realizar para diagnosticar o tratar algún tipo de enfermedad, pierde la capacidad de supervisar la calidad de atención que recibe, por lo que se vuelve más probable desencadenar los eventos adversos que denominamos negligencia. Una clara evidencia de esto es la automedicación donde un reciente estudio de la [11] sostiene que:

Se señala que hasta el 58% de la población general y el 61% de los estudiantes universitarios recurre a la automedicación, siendo los analgésicos, los antiinflamatorios no esteroides (AINEs) y los antibióticos los fármacos de uso más frecuente. El trabajo destaca que la decisión de automedicarse responde a una interacción de factores culturales, económicos y barreras de acceso al sistema de salud, así como a la influencia de la publicidad y la información transmitida por los medios de comunicación.

Insuficiencia de Talento Humano para Educar. Colombia cuenta con apenas 1.6 enfermeras por cada 1,000 habitantes, según el estudio de la [5] (frente al promedio que instancian de 9,2) lo que claramente aumenta la carga laboral imposibilitando o retrasando drásticamente el tiempo que el personal puede dedicar para educar a la población en general, aplica igual con los médicos y farmacéuticos.

Fig 1. Estado de salud y factores de riesgo



Nota. Adaptado de [2]

Desconexión e Indiferencia Frente a Eventos Informativos, Asesoramientos y Encuestas de Opinión. Se presenta un claro desinterés frente a los intentos de entidades gubernamentales de realizar un acercamiento a la ciudadanía y buscar la disposición para presentar sus opiniones, dudas o inquietudes frente al sistema de salud. Esto es claramente evidenciable dentro del Informe de Participación Ciudadana que genera la Superintendencia Nacional de Salud, donde en el 2025 se presentaron únicamente 41.506 personas en su evento más concurrido, una cifra demasiado baja teniendo en cuenta el grupo poblacional al que va dirigido estos eventos.

Fig 2. Número de participantes en eventos



Nota. Adaptado de [12]

III. Resolución

Se generará el desarrollo de una aplicación multiplataforma, en la cual reúna y centralice toda la información sobre el sistema de salud colombiano, se busca generar un formato inclusivo, amigable, claro y sencillo, para que los usuarios tengan la facilidad de usar la aplicación sin importar si padece alguna discapacidad, y así pueda realizar cualquier consulta y tomar decisiones más seguras sobre su salud.

La aplicación generaría un gran impacto en la población colombiana, pues según [13]"Las cifras publicadas por Ministerio de Salud, a diciembre de 2024 se encontraban afiliadas al sistema de salud 52.040.205 personas, lo que representa el 98,5% de la población proyectada por el DANE.", con esta información podemos dimensionar la cantidad de población a la que puede impactar la aplicación y así resolver y facilitar el acceso a la información, los grupos de edades también nos puede ayudar a dimensionar un impacto más detallado, pues una cantidad mayor de gente joven puede inducir a un mayor conexión con la tecnología y por lo mismo un mayor uso de la aplicación, esto lo podemos corroborar según [13] "En la población afiliada, existe un núcleo amplio en los grupos de 15 a 34 años, que presentan las cifras más elevadas de afiliados", por esta información podemos darnos cuenta que tenemos una gran cantidad de público que tiene una relación más cercana a las tecnologías y por lo cual esta aplicación le facilitara el acceso a la información pública de la salud y así poder tener precauciones y tener un mejor cuidado de su salud.

Además de esto, se generarán distintas estrategias para fomentar el uso de la aplicación con fines de incentivar el aprendizaje continuo en la población relacionada anteriormente, teniendo en cuenta lo que se indica en el documento de orientaciones para el desarrollo de la Educación y Comunicación para la salud en el marco del Plan de Salud Pública de Intervenciones Colectivas– PIC [1] "Además pueden definir un proceso de capacitación con análisis de casos problemáticos, procesos de contraste de saberes propios y saberes sanitarios, diseño de murales o afiches, construcción participativa de guiones teatrales, happenings, teatro foro, escritura de cuentos, construcción colectiva de conocimiento, composición o adaptación de piezas musicales sobre temas de salud y calidad de vida, elaboración de videos, álbumes de fotografías sobre soluciones a problemáticas de salud, entre otros. En todo caso se privilegia la pedagogía de la pregunta, que permite cuestionar, pensar, imaginar otras posibilidades, otros conocimientos y que privilegie el diálogo con la comunidad."

Se indica que, según el grupo poblacional, se recomiendan distintas metodologías de enseñanza para la asimilación de conocimientos, esto nos da un enfoque inicial para el tipo de contenido que la aplicación debería manejar y así asegurar el entendimiento y absorción de la información que queremos transmitir.

Claro está que el aplicativo principal debe seguir unos lineamientos básicos para asegurar que el usuario cumpla con el objetivo principal de manera eficaz y sin complicaciones, para esto, tomamos en cuenta el conjunto de heurísticas de usabilidad orientadas a aplicaciones U-Learning recopiladas y citadas en el documento de [14], que aunque principal e inicialmente el aplicativo será enfocado a dispositivos móviles, usaremos dichos principios de usabilidad para guiar el sistema

de información a una expansión a largo plazo a distintos dispositivos y aumentar su alcance.

Según lo anterior, se presenta una vista inicial respetando varios de los principios heurísticos en cuanto a diseño se refiere, empezando por la coincidencia entre el sistema y el mundo real, puesto que empleamos términos con los que el usuario esté familiarizado y exponemos la información en un orden lógico y natural, además de respetar las consistencia y los estándares teniendo en cuenta otras aplicaciones y el contexto en el que nos encontramos manteniendo de igual forma un diseño estético y minimalista, evitando mostrar información no requerida en el contexto de uso.

En el apartado principal [Fig. 3.], se encuentra diferentes tarjetas de navegación para dirigirse a los diferentes apartados de la aplicación, también podemos encontrar una barra de navegación para hacer una búsqueda más directa que requiera el usuario, en la parte inferior de las tarjetas se encuentra un apartado con las noticias más relevantes relacionadas a la salud y su botón para la redirección, para ver todas las noticias relacionadas al sector de la salud. Como último, en la parte inferior se encuentra la barra de navegación con los apartados más relevantes.

Fig. 3. Mockup página principal del aplicativo



Nota. Mockup realizado en Figma por los autores.

Se diseñó un apartado exclusivo para guías sencillas [Fig. 4.] e instruir a las personas acerca de tareas administrativas, definiciones básicas o procesos a seguir después de tratamientos o citas con especialidades, además se encuentra información sobre las diferentes enfermedades como sus síntomas, recomendaciones, todo con el fin de evitar la desinformación y esto lleve a la automedicación de las personas, este apartado cuenta con opción de desactivar la lectura fácil en caso de tener un manejo de lenguaje más técnico en el tema.

Fig. 4. Mockup apartado de guías



Nota. Mockup realizado en Figma por los autores.

En el directorio de salud [Fig. 5.] se propone relacionar información acerca de las clínicas, hospitales, centros de salud y Entidades Prestadoras de Salud (EPS) disponibles para la atención al usuario según su ubicación con distintas opciones de filtro dependiendo de su necesidad y requerimientos en el momento, además se incorpora una barra de navegación para buscar una IPS o EPS en específico. Cada uno con su respectiva dirección, accesibilidad para persona con discapacidad, especialidades e información de interés.

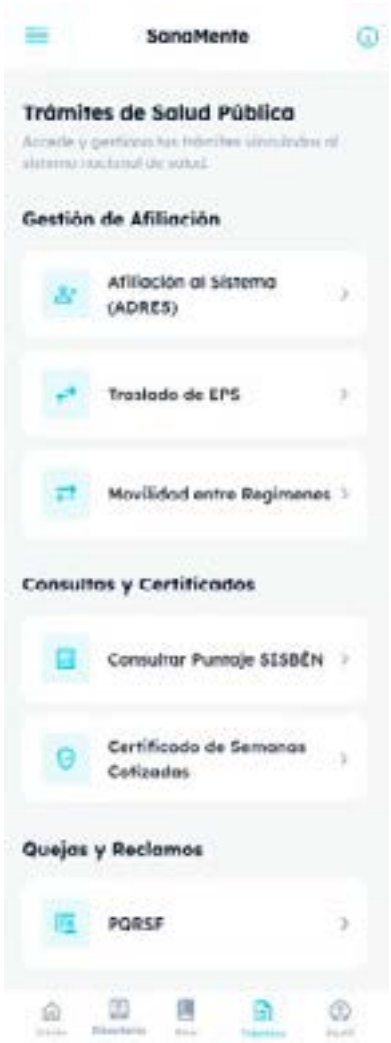
Fig.5. Apartado de Directorio de Salud



Nota. Mockup realizado en Figma por los autores.

En el apartado de trámites [Fig.6.], se encuentran diferentes categorías organizadas según el tipo de requerimiento que necesite realizar el usuario. Este espacio está diseñado para facilitar el acceso a múltiples servicios relacionados con el sistema de salud, permitiendo que las personas encuentren de manera rápida y sencilla la opción que mejor se adapte a sus necesidades. Entre los trámites disponibles se incluyen procesos relacionados con las EPS, como traslados de entidad, entre otros, hasta quejas y reclamos a las diferentes Entidades Prestadoras de Salud (EPS), o instituciones encargadas del sector de la salud en Colombia.

Fig. 6. Apartado de tramites



Nota. Mockup realizado en Figma por los autores.

Para el apartado de perfil [Fig. 7.] se propone, además de la opción para la configuración básica de la aplicación, mostrar información superficial acerca del perfil junto con un pequeño carné de afiliación del usuario, permitiendo visualizar la información básica y de la EPS del usuario. Además de las distintas guías, noticias o en general información médica de interés de cada usuario.

Cabe recalcar que es un prototipo y está sujeto a cambios, tanto a corto como a largo plazo, debido a que claramente la estructura de la aplicación se debe ajustar a las necesidades inmediatas o prioridades de información que se vayan generando y divulgando con el pasar del tiempo en el país, aparte de sugerencias y mejoras que se requieran a lo largo del tiempo.

Fig. 7. Apartado de Perfil



Nota. Mockup realizado en Figma por los autores.

Nota: Este proyecto se desarrolló en 2026 el Semillero *"Gerencia de Proyectos de Ingeniería e Iniciativas Empresariales"* del Politecnico Grancolombiano bajo la dirección de la docente Msc Ing Mónica Lizeth Sánchez Arévalo PhD (c) mlizsanchez@poligran.edu.co monicalizethsanchezarevalo@gmail.com

REFERENCES

[1] Ministerio de Salud y Protección Social, "Ministerio de Salud y Protección Social." [Online]. Available: https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Aplicativos-Moviles.aspx. [Accessed: May 5, 2026].

[2] OECD, Panorama de la salud 2025: Colombia, Nov. 13, 2025. [Online]. Available: https://www.oecd.org/es/publications/panorama-de-la-salud-2025_5345f1bd-es/colombia_69cc7719-es.html

[3] Congreso de la República de Colombia, Constitución Política de Colombia, 1991. [Online]. Available: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991_pr001.html

[4] Sinergias ONG, "Alianzas estratégicas para la salud y el desarrollo social," 2025. [Online]. Available: https://www.sinergiasong.org/post/salud-un-factor-de-desarrollo-humano

[5] Naciones Unidas, "Salud y bienestar," 2015. [Online]. Available: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/

[6] Alcaldía de Bogotá, "¿Cuál es la diferencia entre una IPS y una EPS?," Feb. 18, 2021. [Online]. Available: https://bogota.gov.co/mi-ciudad/salud/cual-es-la-diferencia-entre-una-ips-y-una-eps

[7] A. Aljure, "El cáncer representa una de cada seis búsquedas sobre enfermedades en Colombia," Feb. 19, 2025. [Online]. Available: https://llyc.global/noticias/el-cancer-representa-una-de-cada-seis-busquedas-sobre-enfermedades-en-colombia/

[8] Organización Panamericana de la Salud, "8 principios para la transformación digital del sector salud." [Online]. Available: https://www.paho.org/es/sistemas-informacion-salud-digital/8-principios-para-transformacion-digital-sector-salud. [Accessed: May 5, 2026].

[9] Organización Mundial de la Salud, "Desinformación y salud pública," Feb. 6, 2024. [Online]. Available: https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/disinformation-and-public-health

[10] K. Cawcutt, "Understanding Health Misinformation: Why It Spreads, Who It Harms, and What We Can Do About It," Dec. 16, 2025. [Online]. Available: https://blog.unmc.edu/infectious-disease/2025/12/16/understanding-health-misinformation-why-it-spreads-who-it-harms-and-what-we-can-do-about-it/

[11] Universidad Cooperativa de Colombia, "Automedicación en Colombia una problemática de salud pública que acarrea implicaciones legales," Sept. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.ucc.edu.co/actualidad-ucc/noticias/Paginas/automedicacion-en-colombia-una-problematica-de-salud-publica-que-acarrea-implicaciones-legales.aspx

[12] Superintendencia Nacional de Salud, Informe Participación Ciudadana en la Gestión de la Superintendencia Nacional de Salud 2025, Sept. 18, 2025. [Online]. Available: https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/planeacion/InformesGestion/ZZ-InformePCG2025.pdf

[13] Así Vamos en Salud, "Cobertura de afiliación," Apr. 9, 2025. [Online]. Available: https://www.asivamosensalud.org/publicaciones/noticias-especializadas/cobertura-de-afiliacion-9042025

[14] F. Brito and R. Cabeza, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Mar. 5, 2026. [Online]. Available: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-5500/UCE5732_01.pdf

Diseño de una Metodología Basada en AMEF para la Gestión y Mitigación de Riesgos en Solicitudes de Renovación de Registro Calificado en Programas de Pregrado en la Universidad del Magdalena

Kelly Marcela Viana Maldonado
Semillero de Investigación Estadística y Métodos Cuantitativos
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
kviana@unimagdalena.edu.co

Karol Valentina Álvarez Tobón
Semillero de Investigación Estadística y Métodos Cuantitativos
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
kvalvarez@unimagdalena.edu.co

Álvaro Antonio Villar Montero
Semillero de Investigación Estadística y Métodos Cuantitativos
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
aavillar@unimagdalena.edu.co

María Isabel Fernández Pinto
Programa de Ingeniería Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
mfernandezpi@unimagdalena.edu.co

Zaine Lorena Manjarres Morrón
Programa de Ingeniería Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
zmanjarres@unimagdalena.edu.co

Rick Keevin Acosta Vega
Programa de Ingeniería Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
racosta@unimagdalena.edu.co

Abstract. **El mejoramiento de la calidad en la educación superior se ha convertido en un eje estratégico para las instituciones, especialmente en procesos críticos como la renovación del registro calificado, donde intervienen múltiples factores que pueden afectar el cumplimiento de los estándares exigidos. En este contexto, la identificación y gestión de riesgos adquiere un papel fundamental, dado que la presencia de fallas en las etapas de autoevaluación puede comprometer la calidad del proceso y sus resultados. A pesar de la relevancia de estas problemáticas, en el contexto colombiano aún es limitado el uso de herramientas sistemáticas que permitan analizar y prevenir dichos riesgos, lo que evidencia la necesidad de aplicar metodologías estructuradas como el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF), ampliamente utilizado en otros sectores para la mejora de la calidad.**

En respuesta a esta necesidad, la investigación adopta un enfoque metodológico mixto, integrando técnicas cuantitativas y cualitativas para la recolección y análisis de la información. Se desarrollaron encuestas dirigidas a los directores de programas de pregrado presencial, con el fin de caracterizar el proceso actual de autoevaluación. El estudio se contextualiza en un diseño descriptivo y analítico, al documentar y examinar las actividades existentes y, a su vez, plantear una mejora del proceso. A partir de la información recolectada, se implementa la metodología AMEF para identificar los modos de fallo, sus causas y efectos. Con base en los datos recolectados y estructurados bajo el enfoque SIPOC y PHVA, se evaluaron los modos de fallo mediante los criterios de severidad, ocurrencia y detección, permitiendo establecer niveles de criticidad a través del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Este procedimiento facilitó la identificación de patrones de riesgo y la concentración de fallas en etapas específicas del proceso, evidenciando debilidades principalmente en la planeación, recolección y análisis de información, lo que permitió orientar la priorización de acciones de mejora.

Con el desarrollo del AMEF se identificaron 28 modos de fallo, de los cuales 89% corresponde a riesgos asociados a la gestión realizada en Direcciones de Programa. El Nivel de Probabilidad del Riesgo calculado para los modos de fallo determinó que 13 modos presentan un riesgo de falla muy alto, representando el 48% de los posibles errores que pueden ser cometidos en el proceso; 3 clasifican en riesgo de falla alto, 6 en riesgo de falla moderada y 5 en riesgo de falla bajo. A su vez, se identificaron 27 posibles efectos negativos, 38 causas potenciales y 29 acciones correctivas, que proporcionan un insumo para la mejora del proceso a través de la guía metodológica.

El estudio evidencia la aplicabilidad del AMEF como herramienta para la identificación, priorización y mitigación de riesgos en el proceso analizado, de modo que constituye una base estructurada para la toma de decisiones mediante el diseño de una guía metodológica orientada a la mejora y fortalecimiento de la gestión de Dirección de Programa.

Palabras clave—AMEF, Decreto 1330, Ingeniería y Registro Calificado

I. Introducción

La calidad en la educación superior se ha convertido en un pilar fundamental para las instituciones, especialmente en procesos críticos como la renovación del Registro Calificado, donde se garantiza el cumplimiento de condiciones mínimas exigidas para la oferta de diferentes programas académicos. Este proceso, además de ser un requisito normativo, representa una oportunidad para evaluar, mejorar y fortalecer la gestión académica y administrativa de las universidades.

Sin embargo, al momento de la práctica, gestionar el proceso de autoevaluación con fines de renovación del registro calificado puede mostrar e identificar desafíos que incluyen la falta de estandarización, debilidades en la planeación,

deficiencias en la recolección y en el análisis de información, así como errores en la articulación de los equipos responsables. Todas estas dificultades incrementan la probabilidad de fallos que afectan la calidad del proceso y, por ende, comprometer los resultados esperados ante los organismos reguladores.

A pesar de la importancia de este proceso, en el contexto colombiano, el uso de herramientas sistemáticas para identificar, analizar y priorizar los riesgos asociados a la autoevaluación es bastante limitado. En este sentido, metodologías como el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF), que son ampliamente utilizadas en sectores industriales para la gestión de riesgos y la mejora de la calidad, ofrecen una alternativa para su aplicación en el ámbito educativo.

En respuesta a esta necesidad, la presente investigación tiene como objetivo analizar el proceso de autoevaluación con fines de renovar el registro calificado en los programas de pregrado presencial de la Universidad del Magdalena, mediante la identificación de modos de fallo, sus causas y efectos, utilizando la metodología AMEF. A partir de este análisis, se busca diseñar una propuesta metodológica que permita estandarizar el proceso, reducir los riesgos de no conformidad y fortalecer la gestión de las Direcciones de Programa.

De esta manera, el estudio no solo aporta un diagnóstico estructurado de las fallas presentes en el proceso, sino que también proporciona una base para la toma de decisiones orientadas a la mejora continua en la educación superior.

II. Estado del Arte

La metodología Análisis de Modos y Efecto de Fallas (AMEF) tiene como propósito la identificación, evaluación y gestión de riesgos en los procesos, por ello, se consolida como una técnica de mejora de la calidad establecida en el campo de la ingeniería que ha sido ampliamente adoptada en otras áreas como la medicina, la industria química y automotriz. En la educación superior y la investigación, el AMEF ha permitido evaluar los riesgos y mejorar la calidad de los servicios educativos y estrategias institucionales.

(Zulfiqar, et al., 2024) desarrollaron el AMEF en su estudio para la gestión de la calidad en instituciones de educación superior minimizando el riesgo de la administración educativa. (Takalo, et al, 2013) empleó el Análisis de Modos y Efecto de Fallas para evaluar la calidad de los servicios educativos en la Universidad Vali-e-Asr de Rafsanian. Su estudio superó las limitaciones del método tradicional al incorporar un modelo difuso que asigna pesos diferentes a los factores de riesgo, proporcionando una evaluación más precisa de los fallos; los resultaros señalaron la falta de preparación de los estudiantes frente al mercado laboral como uno de los fallos más significativos, debido a la ineficiencia de los cursos teóricos y prácticos ofrecidos por la universidad.

Por su parte, la Universidad de Cartagena implementó el AMEF con el objetivo de minimizar los riesgos de incumplir los requisitos necesarios para que estudiantes pudieran acceder a los programas de movilidad e intercambios internacionales (Fontalvo & González, 2020).

Mientras que la Universidad de Antioquia empleó el AMEF como herramienta para el análisis de los factores asociados a la deserción de estudiantes de programas de educación superior, obteniendo como resultado el panorama de riesgos y frecuencia con que estos se presentan en la etapa temprana de la trayectoria académica de los estudiantes (Montoya, et al., 2017).

En este contexto, el método seleccionado para la investigación es analítico y descriptivo, dado que documenta, detalla y describe lo que se realiza actualmente; por último, es de diseño, puesto que plantea una nueva técnica para la solicitud de renovación de registro calificado en los programas de pregrado presencial de la Universidad del Magdalena.

III. Materiales y Metodología

La investigación aborda un enfoque mixto, al emplear variables cuantitativas y cualitativas con el objetivo de analizar el proceso de Registro Calificado en los programas de pregrado presencial en la Universidad del Magdalena. Por tanto, bajo este enfoque, el estudio es analítico dado que documenta y caracteriza el proceso actual, y propositivo aplicado dado que propone una metodología orientada a la estandarización del proceso.

La recolección de datos se efectuó mediante encuestas de diferentes actores responsables de ejecutar el proceso de autoevaluación de programas, lo que permitió la identificación de factores que influyen en las solicitudes de renovación de Registro Calificado en programas de pregrados. Con base en la información obtenida se elaboró un flujograma del proceso, siguiendo el modelo de gestión de calidad PHVA y la metodología SIPOC, a partir de lo establecido en el Procedimiento de Renovación de Registro Calificado (AC-P03) del Sistema de Gestión Integral Institucional. El flujograma resultante comprende 18 actividades que constituyen el proceso.

Con base en el flujograma, se desarrolló la metodología AMEF, que permitió identificar los modos de fallo potenciales de cada actividad, sus efectos sobre el proceso y sus causas. A través de los criterios de severidad, ocurrencia y detección, se obtuvo el Número de Prioridad de Riesgo (NRP), que clasifica el nivel de criticidad de cada fallo y orienta la priorización de las acciones correctivas. De este modo, se cuantificaron y ponderaron los riesgos detectados, con el fin de identificar potenciales fallas del proceso.

TABLE I. ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTO DE FALLAS

Rango	Clasificación
301 - 1000	Riesgo de falla muy alto
201 - 300	Riesgo de falla alto
101 - 200	Riesgo de falla moderado
1 - 100	Riesgo de falla bajo

Fuente: (Plata, 2021)

TABLE II. ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTO DE FALLAS

No.	AMEF				NPR
	Actividad	*Modo de fallo*	*Efecto potencial*	*Causa potencial*	
1	Recibir recordatorio de vencimiento de Registro Calificado.	No recibir la notificación	No contar con el tiempo suficiente para el proceso de autoevaluación	Problemas de comunicación interna	96
				Oficina OAC no redacta/ envía alerta sobre vencimiento de registro calificado.	
		No recordar las fechas de vencimiento del RC.		No contar con un programa de alertas.	24
2	Recibir sensibilización sobre proceso de renovación de Registro Calificado.	No cumplir con los objetivos de la sensibilización.	Falta de compromiso en el desarrollo del proceso de autoevaluación.	No se explicó bien el proceso de autoevaluación con fines de renovación de RC bajo el Decreto 1330	
				No hubo profundización en la explicación del Decreto.	
				Falta de conocimiento de la implementación del Decreto por parte de la OAC.	
3	Conformar el equipo de autoevaluación.	No conformar un buen equipo de autoevaluación.	Generar desorganización en el proceso de autoevaluación.	No se tuvo en cuenta las cargas académicas de los docentes.	144
				Los contratistas y funcionarios que hacen parte del equipo tienen una alta carga laboral.	
				Las personas que conforman el equipo no tienen experiencia en procesos de autoevaluación.	
4	Elaborar cronograma de trabajo y definir responsabilidades del equipo. .	Elaborar un cronograma que no esté acorde a los lineamientos del Decreto.	Mal desarrollo de las actividades	Mala planeación	810
				Desconocimiento de los lineamientos del Decreto.	
		Responsabilidades mal asignadas	. Actividades mal ejecutadas.	No se identificaron correctamente los perfiles del equipo de autoevaluación	72
5	Contextualizar y orientar al equipo.	El equipo no entiende el contexto del proceso o no está alineado con los objetivos.	Bajo desempeño del equipo.	Desconocimiento de los lineamientos del Decreto.	288
			Mal entendimiento de los requisitos del proceso.	Comunicación ineficaz durante la orientación	
				Falta de información clara	
6	Realizar lectura, entendimiento y apropiación de los lineamientos a evaluar	Inadecuada comprensión de los lineamientos	Condiciones de calidad mal autoevaluadas	Falta de capacitación.	320
				Falta de experiencia en la interpretación de los lineamientos	
				Documentos de referencia confusos	
7	Definir la información que se necesita para dar respuesta a la condición de calidad	Información mal definida	El informe de autoevaluación no responde adecuadamente al cumplimiento de las condiciones de calidad	Falta de coordinación en el equipo de autoevaluación	144
		Información incompleta para las condiciones de calidad	El informe de autoevaluación no tiene la información completa	Desconocimiento de los requisitos	144

No.	AMEF				
	Actividad	*Modo de fallo*	*Efecto potencial*	*Causa potencial*	*NPR*
8	Recolectar la información: Enviar solicitudes de requerimientos de información a las distintas dependencias de la Institución. Elaborar encuesta de percepción. Desarrollar grupos focales	Información recolectada incompleta o errónea	El informe final no cumple con los estándares de calidad	Errores en la recolección de datos	800
		Demora en la respuesta de las dependencias	Retraso en el proceso de recolección de información	Falta de seguimiento a las solicitudes	700
		Información insuficiente		Falta de claridad en los requerimientos	400
		Encuesta mal diseñada o sesgada	Resultados de percepción inexactos o no representativos	Falta de experiencia en la creación de encuestas	490
				No tener en cuenta a todos los grupos de interés	
		Falta de participación activa en los grupos focales	Información parcial o limitada sobre las percepciones y necesidades de los participante	Selección inadecuada de participantes	240
				Falta de moderación efectiva	
9	Consolidar y analizar la información	Incorrecta consolidación de la información o análisis insuficiente	Informe final con conclusiones erróneas	Errores en la interpretación de datos	480
				Falta de unificación de criterios cuando se registra la información en condiciones de calidad diferentes	
10	Revisión documental de currículos similares	Desarrollar de forma incompleta la revisión de los currículos	Perdida de oportunidades de mejora	Revisión superficial de los planes de estudio	63
			Obtener un nuevo plan de estudio que no responda a las necesidades	Falta de acceso de currículos actualizados	

No.	AMEF				
	Actividad	*Modo de fallo*	*Efecto potencial*	*Causa potencial*	*NPR*
			actuales del sector y poco competitivo		
11	Redacción del Informe de Autoevaluación por condición asignada	Errores de redacción en el informe	Informe final inconsistente o mal estructurado, lo cual puede afectar la evaluación por parte de la entidad externa	Desconocimiento de los requerimientos de cada condición de calidad	420
				Mala interpretación de la información	
				Redacción inadecuada por parte del equipo	
12	Revisar cada condición y consolidar el documento. Nota: Hacer los ajustes pertinentes y volver a la actividad dondese generó la necesidad de modificación	Inconsistencias en la revisión de cada condición	Devolución del documento por no responder a los requerimientos de la condición	Errores en la consolidación de los datos	441
			Revisión incorrecta de los descrito en cada condición	Mala interpretación de los lineamientos del Decreto 1330	
		No se realizan las actualizaciones solicitadas en el documento consolidado	Devolución del documento por no acatar las correcciones	Falta de comunicación o claridad sobre los cambios o ajustes necesarios.	441
13	Identificar cuáles son las evidencias para mostrar, y consolidarlas	Evidencias incompletas o no adecuadas para respaldar el proceso	Deficiencia en la justificación del cumplimiento de las condiciones de calidad, lo que puede llevar a observaciones por parte del evaluador	Falta de claridad en los criterios para elegir las evidencias	480
				Errores en la recopilación	

No.	AMEF				
	Actividad	*Modo de fallo*	*Efecto potencial*	*Causa potencial*	*NPR*
14	Enviar el documento a la OAC para su revisión y realizar ajustes en caso de ser necesario	Documentación incompleta	Retraso del proceso por solicitud de ajustes o adiciones al documento por parte de la OAC.	Falta de retroalimentación clara	180
		Envío del documento con errores no detectados en la revisión		Revisión insuficiente antes del envío	
15	Presentar el proceso de autoevaluación ante el concejo de facultad	Presentación incompleta o poca claridad del proceso de autoevaluación	Falta de aprobación o de retroalimentación adecuada por parte del concejo de facultad	Falta de preparación	252
				Poca de claridad en la estructura de la presentación	
16	Presentar y sustentar proceso de autoevaluación ante el Consejo Académico	Inconsistencias o falta de evidencia durante la sustentación del proceso	Solicitud de modificaciones o rechazo del proceso de autoevaluación	Documentación insuficiente	180
				Falta de preparación para la sustentación	
				No se evidencia un buen proceso de autoevaluación	
17	Diligenciar plantilla en formato SACES	Errores en la carga o diligenciamiento incorrecto del formato SACES	Rechazo o demora en la validación del trámite ante el Ministerio	Falta de conocimiento del formato o errores en la carga de información	90
18	Realizar radicación del documento ante el Ministerio de Educación Nacional (MEN).	Documento radicado fuera del plazo	Retrasos en el proceso de renovación.	Fallos en la programación del envío	378
				No realizar el envío de la plantilla a tiempo.	
		Errores en el trámite de radicación en el SACES	Rechazo del trámite	Mala realización del cargue de la información	378
				Desconocimiento de los requisitos para la radicación	

IV. Resultados

La aplicación del AMEF al proceso de Renovación del Registro Calificado permitió identificar 28 modos de fallo, de los cuales el 89% son atribuidos a riesgos que pueden ocurrir desde la gestión realizada en las Direcciones de Programa, exceptuando los modos: no recibir la notificación, no cumplir con los objetivos de la sensibilización y errores en el trámite de radicación en el SACES, dado que se son actividades correspondientes a otra dependencia.

En cuanto a la clasificación por nivel de riesgo, 13 modos de fallo (48%) se posicionan en la categoría de riesgo muy alto, lo que implica que requieren acciones de manera inmediata. Tres modos presentan riesgo alto, seis a riesgo moderado y cinco a riesgo de falla bajo.

Los modos de fallo con el NRP más alto se centran en las actividades de: Elaboración del cronograma de trabajo, Recolección de información en las dependencias institucionales, Consolidación y análisis de la información. Estas actividades presentan alta severidad y ocurrencia, por lo que resultan críticas.

Por su parte, el análisis evidenció 27 efectos negativos que se pueden generar, 38 causas potenciales y 29 acciones correctivas. Estos análisis demuestran la necesidad del diseño de una metodología estandarizada que minimice los riesgos de no conformidad del proceso y sirva de guía a las Direcciones de Programa.

V. Conclusiones y Discusión

Se evidencia que el proceso de autoevaluación con fines de renovación del Registro Calificado presenta múltiples puntos críticos que pueden afectar el cumplimiento de las condiciones de calidad exigidas. La aplicación de la metodología AMEF permitió no solo identificar de manera estructurada los modos de fallo, sus causas y efectos, sino, además, priorizar aquellos riesgos que requieren una intervención inmediata, especialmente en actividades relacionadas con la planeación, la recolección y el análisis de la información.

Los resultados obtenidos reflejan que gran parte de los riesgos se originan en la gestión de las Direcciones de Programa, lo que evidencia la necesidad de fortalecer la organización del equipo, la claridad en los lineamientos y la estandarización de las actividades. Asimismo, se resalta la importancia de implementar acciones correctivas orientadas al control, la formación y el rediseño del proceso, teniendo en cuenta la alta proporción de fallos clasificados como de riesgo muy alto.

El estudio aporta una base metodológica que facilita la toma de decisiones y promueve la mejora continua, al ofrecer una guía estructurada para la identificación y gestión de riesgos. Además, demuestra la pertinencia de adaptar herramientas propias de la ingeniería, como el AMEF, al contexto educativo, debido a que su aplicación permite prevenir, corregir y ajustar procesos relacionados con la gestión de la calidad y la renovación del Registro Calificado en las instituciones de educación superior.

La propuesta planteada se constituye como una herramienta que puede facilitar la optimización del proceso de renovación del registro calificado, promoviendo una gestión más eficiente y alineada con los requerimientos establecidos, debido a que la

estandarización del proceso contribuye a la prevención de resultados no deseados.

VI. REFERENCIAS

[1] Barrios Fernández, N., Rodríguez Aguirre, N., & Tristá Pérez, B. (2019). El aseguramiento de la calidad y el factor humano en las instituciones de educación superior de América Latina. Revista Cubana de Educación Superior.

[2] Boylan, F. (2011). Introducing the Failure Mode Effects Reflective Analysis Technique for the Field of Higher Education and Research. Paper presented at the EDULEARN 11 International Conference on Education and New Learning Technologies, Barcelona, July 4th-6th, 2011. Recuperado de https://eprints.teachingandlearning.ie/id/eprint/1807

[3] Carlos Alonso-Torres (2014) Orientaciones para implementar una gestión basada en procesos. versión On-line ISSN 1815-5936. Ing. Ind. vol.35 no.2 La Habana Mayo.-ago. 2014

[4] Chuah, P. and Lim, P. (2018), "Applying quality tools to improve student retention supporting process: a case study from WOU", Asian Association of Open Universities Journal, Vol. 13 No. 1, pp. 60-72. https://doi.org/10.1108/AAOUJ-01-2018-0003 55

[5] Congreso de Colombia 1992. (s.f.). Obtenido de https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-86437_Archivo_pdf.pdf

[6] Cronbach, L.J (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika 16, pp 297–334. https://doi.org/10.1007/BF02310555

[7] Decreto 088 del 2000. (s.f.). Obtenido de https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles104863_archivo_pdf.pdf

[8] Decreto 1075 de 2015. Ministerio de Educación. (s.f.). Obtenido de

[9] https://www.mineducacion.gov.co/portal/normativa/Decretos/351080:Decreto-No-1075 del-26-de-mayo-de-2015

[10] Decreto 1330 de 2019. (s.f.). Obtenido de https://www.mineducacion.gov.co/portal/ejestematicos/Normas-sobre-Educacion-Superior/387348:Decreto-1330-de-julio-25-de-2019

[11] Decreto 2566 de 2003 del Ministerio de Educación Nacional. (s.f.). Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9964

[12] Fontalvo Herrera, T. J., & González Nieto, Y. (2021). Enfoque sistémico convergente de la calidad aplicado a un programa académico de una Institución de Educación Superior. Investigación e Innovación en Ingenierías, 9(1), 61-77

[13] Guerra, R., Acosta, D., Davila, N., Correa, N., & Maria, V. (2022). Certificación de sistemas de gestión y acreditación de la calidad en la educación superior. Revista Iberoamericana de Educación, 67-84.

[14] Ley 1188 de 2008. Congreso de la República. (s.f.). Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30009

[15] Ley 30 de diciembre 28 de 1992. Congreso de Colombia. (s.f.). Obtenido de https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-86437_Archivo_pdf.pdf

[16] Ley 749 de julio 19 de 2002. Congreso de Colombia. (s.f.). Obtenido de https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-86432_Archivo_pdf.pdf

[17] MEN. (1 de Julio de 2020). Ministerio de Educación Nacional. Obtenido de chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-399567_recurso_1.pdf

[18] Ministerio de educación. (s.f.). Obtenido de https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles 86437_Archivo_pdf.pdf

[19] Montoya Salazar, L. F., Arias Vergara, J. A., Guerrero Zapatac, L. M., & Usuga Mancod, O. C. (2017). Análisis de la deserción temprana en las seccionales de la Universidad de Antioquia – Colombia a partir de control estadístico de procesos. Revista Internacional de Investigación en Adicciones, Tecnología y Sociedad, 9(1), 45-59. Recuperado de https://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/3005

[20] Pons Murguía, Ramón Ángel; Bermúdez Villa, Yanko; Villa González, Eulalia María; Martínez, José Luis. Metodología para la gestión de la calidad de los procesos en instituciones de educación superior. Sistemas & Telemática, vol. 11, núm. 26, julio-septiembre, 2013, pp. 47-58. Universidad ICESI. Cali, Colombia

[21] Resolución 2888 de 2007. (s.f.). Obtenido de https://www.mineducacion.gov.co/portal/ejestematicos/Normas-sobre-Educacion-para-el-Trabajo/130244:Decreto-2888-de-Julio-31 de 56 2007#:~:text=Por%20el%20cual%20se%20reglamenta,y%20se%20dictan%20otras%20 disposicione.

[22] Spichak I., Kucheryavenko S., Polevoy I., Stenyushkina S., Nazarova A. (2020). Implementation of Risk Management in the Quality Management System of an Educational Organization, International Journal of Management, 11 (6); pp. 1196-1204

[23] Takalo, S. K., Abadi, A. R. N. S., Vesal, S. M., Mirzaei, A., & Nawaser, K. (2013). Fuzzy Failure Analysis: A New Approach to Service Quality Analysis in Higher Education Institutions (Case Study: Vali-e-asr University of Rafsanjan-Iran). International Education Studies, 6(9), 93-106.

[24] Zulfiqar, M., Bhat, S., Sony, M., Salentijn, W., Swarnakar, V., Antony, J., Cudney, E.A., Furterer, S., McDermott, O., Jayaraman, R. and Foster, M. (2024), "Unveiling the potential of FMEA in higher education: pathway to improved risk management and quality", The TQM Journal, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. https://doi.org/10.1108/TQM-01 2024-0017

Influencia del riesgo percibido en la intención de compra de productos circulares: un estudio exploratorio en el Eje Cafetero, Colombia

1st Valentina Laclé
Facultad de Ciencias Empresariales
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
valentina.lacle@utp.edu.co

2nd Miguel A. Gomez
Facultad de Ciencias Empresariales
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
miguel.gomez1@utp.edu.co

3rd Diego A. Velásquez
Facultad de Ciencias Empresariales
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
diego.velasquez@utp.edu.co

4th Andres F. Garcia
Facultad de Ciencias Empresariales
Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia
https://orcid.org/0000-0003-4850-3144

***Resumen*—La crisis ambiental contemporánea requiere una transición estructural que transforme el modelo de consumo lineal hacia la economía circular (CE), con el objetivo de optimizar el flujo de materiales y minimizar la generación de residuos [1]. Sin embargo, para garantizar la viabilidad a largo plazo de estos modelos, los esfuerzos normativos y productivos resultan insuficientes; es imperativo integrar el papel activo de los consumidores [2]. La modificación de los hábitos de compra y posconsumo no solo impacta la sostenibilidad global, sino que constituye el factor determinante para que las cadenas de suministro de ciclo cerrado alcancen su máximo valor potencial [3].**

No obstante, la literatura empírica ha evidenciado que la aceptación de los productos circulares aún presenta limitaciones significativas, persistiendo cierto escepticismo en los consumidores [4]. En particular, la intención de compra se ve influenciada negativamente por el riesgo percibido [3], un constructo que actúa como una barrera fundamental frente a la incertidumbre y la probabilidad de enfrentar consecuencias desfavorables asociadas a la adquisición de estos bienes [5].

El objetivo de esta investigación es analizar cómo los diversos tipos de riesgo percibido influyen en la intención de compra de productos circulares en los consumidores del Eje Cafetero colombiano. La metodología se basa en un estudio cuantitativo exploratorio con una muestra de 385 personas seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico por bola de nieve. Como instrumento de recolección de datos se utiliza una encuesta estructurada a través de la plataforma Google Forms, compuesta por 35 preguntas en escala tipo Likert de cinco puntos, que miden las variables de riesgo funcional, financiero, físico, social, psicológico y de conveniencia, frente a la intención de compra de productos circulares. El análisis de datos se realizó con el software R, empleando los paquetes psych, factoextra, cluster, car y broom. Los resultados preliminares indican que el riesgo financiero y el riesgo funcional son los factores estudiados que más influyen en la intención de compra de artículos basados en economía circular, mientras que los riesgos psicosociales se presentan como la variable menos influyente. El estudio concluye que el riesgo psicológico, social y de conveniencia no tuvieron un efecto estadístico significativo, mientras que el riesgo financiero y funcional presentaron una relación significativa y positiva, lo cual es contraintuitivo respecto a lo postulado por Wang & Hazen [3] y Khan et al. [2].

***Palabras Clave*—Economía circular, Riesgo percibido, Comportamiento del consumidor.**

I. Introducción

La transición del paradigma de ciclo cerrado (producción lineal) "Tomar-Hacer-Desechar" hacia la economía circular (EC), presenta un desafío enfocado en la optimización del flujo de la cadena de suministro, la reestructuración de sistemas de bucle cerrado y la optimización de recursos [1]. Operativamente, el modelo de economía circular busca alargar la vida útil de los productos con base en sus respectivos valores residuales, principios básicos de reacondicionamiento y de remanufactura, disminuyendo en gran medida el consumo de materias primas vírgenes y de energía [3].

No obstante, la viabilidad de estos modelos no depende exclusivamente de los avances tecnológicos o de la reestructuración de los sistemas productivos. La literatura reciente ha evidenciado que el consumidor desempeña un papel determinante dentro del cierre del ciclo circular, debido a que la adopción efectiva de productos circulares constituye el mecanismo que valida operativamente estos sistemas [2].

En este contexto, la intención de compra emerge como una variable crítica para comprender el éxito o fracaso de la economía circular. Sin embargo, la transición desde una actitud favorable hacia el medio ambiente hasta la acción concreta de compra enfrenta diversas barreras cognitivas y conductuales. Entre ellas, el riesgo percibido ha sido identificado como uno de los factores más influyentes en la resistencia del consumidor frente a los productos circulares [3]. Dicho riesgo se relaciona con la incertidumbre sobre el desempeño, la calidad, la conveniencia, la seguridad o el valor económico de los productos reciclados o remanufacturados, persistiendo cierto escepticismo en los consumidores [4].

Bajo esta premisa, este estudio pone en práctica una evaluación del riesgo multidimensional que integra las dimensiones funcionales, financieras, psicológicas y físicas [5]. Estas dimensiones cumplen el papel inhibidor del comportamiento pro-ambiental y la intención de compra de productos circulares en consumidores del Eje Cafetero colombiano. Esto responde a la necesidad de caracterizar la permeabilidad de modelos de economía circular en los perfiles

de consumo regional con el fin de aportar evidencia útil para el diseño de estrategias empresariales y de sostenibilidad en este contexto [6].

II. El Riesgo Percibido como Barrera Central en la Intención de Compra

Con base en la importancia del comportamiento del consumidor en la economía circular [1], y de la comprensión de los factores que conducen al consumidor a aceptar y adoptar prácticas circulares, se hace necesario profundizar en el análisis de la intención de compra circular [2]. Fundamentalmente, el riesgo percibido actúa como la barrera psicológica y estructural que distorsiona la relación entre la conciencia ambiental del individuo y su comportamiento de compra real [5].

La intención de compra de productos circulares emerge como la variable determinante en la ecuación de sostenibilidad, la cual se define técnicamente como la probabilidad subjetiva o la disposición de un individuo a adquirir bienes procesados a través de estrategias circulares en lugar de alternativas lineales [7]. La formación de esta intención es un proceso cognitivo complejo analizado predominantemente a través de la Teoría de la Conducta Planeada (TPB), que postula que el comportamiento humano está precedido por la intención, condicionada por la actitud, las normas subjetivas y el control conductual percibido [4].

En este sentido, la actitud se refiere a la valoración global del consumidor sobre la compra, influenciada por creencias sobre beneficios ambientales y valor económico [7]. Por su parte, las normas subjetivas representan la presión social de grupos de referencia para adoptar prácticas circulares, y el control conductual percibido (PBC) refleja la facilidad o dificultad percibida para adquirir estos productos, en función de factores como la disponibilidad y la transparencia de la información [7].

Por lo tanto, la intención refleja la facilidad o dificultad que encuentra el consumidor para acceder a productos remanufacturados [3]. Además, esta intención se ve disminuida cuando el riesgo funcional supera la norma personal de cuidado ambiental, explicando la persistente brecha entre los valores ambientales y el comportamiento efectivo [6]. Mientras que la conciencia impulsa una actitud positiva, el riesgo percibido introduce una disonancia que paraliza la decisión final, consolidándose como la principal barrera del comportamiento deseado [8].

A. Riesgos que influyen en la adquisición de bienes circulares

En el proceso de adquisición de bienes circulares, se presentan determinados riesgos que inhiben la integración del consumidor al ciclo económico circular [5], tales como el riesgo funcional [3], financiero [2], de conveniencia [9], el físico, social [8] y psicológico [10].

B. Riesgo funcional

El riesgo funcional, frecuentemente denominado riesgo de desempeño [1], se forma en la mente del consumidor como una incertidumbre sobre si un producto funcionará correctamente o cumplirá con el propósito para el cual fue adquirido [11]. En otras palabras, representa la percepción del consumidor sobre el equilibrio entre el beneficio percibido y el sacrificio percibido [3]. Esta percepción se origina a partir del temor a una durabilidad inferior, presencia de defectos o una vida útil más corta en comparación con un artículo nuevo [12], y se ve reforzada por la imposibilidad de inspeccionar físicamente el producto antes de la transacción [2].

Este riesgo actúa como una barrera crítica y significativa que disminuye el proceso de intención de compra del consumidor, pudiendo llevar a un rechazo total del producto por la alta percepción de desgaste previo, falla funcional, deficiencia en el rendimiento, calidad y durabilidad [12].

C. Riesgo financiero

El riesgo financiero es un aspecto del riesgo percibido que se refiere a la posibilidad de incurrir en pérdidas monetarias o experimentar consecuencias financieras desfavorables como resultado de una elección o acción [5]. Este tiene una influencia sustancial en las percepciones de riesgo de los individuos y puede afectar su disposición a participar en actividades específicas, como las compras en línea o las intenciones de inversión [5].

En este sentido, el consumidor prevé que la adquisición de productos circulares puede derivar en costes adicionales derivados del mantenimiento, reparaciones no programadas o puesta a punto, lo cual impacta de manera directa y negativa en la intención de compra [2]. Por consiguiente, esta percepción de vulnerabilidad económica impacta de manera directa y negativa en la intención de compra, consolidándose como una de las principales barreras para la adopción masiva de modelos de consumo circular [2] [5].

D. Riesgo de conveniencia

De igual forma, en la dinámica de compra de un artículo de economía circular, se introduce el riesgo de conveniencia [12]. Este factor cuantifica el esfuerzo adicional, tanto en tiempo como en gestión y costos por molestias (hassle costs), que el consumidor asume para adquirir un producto circular [9]. Los costos pueden tener dos formas adicionales en la economía colaborativa [9]. Una es el costo de molestia en términos de la incomodidad y el costo de tiempo (temor a perder tiempo cuando el producto reacondicionado no cumple con las posibilidades prometidas, o tiene que ser devuelto para mantenimiento) asociado con el proceso de reserva [12], y la otra es el riesgo percibido debido a las preocupaciones de seguridad, la barrera social de comunicación con los proveedores y otros consumidores al compartir, y la pérdida económica [9].

E. Riesgo físico

El riesgo físico es un aspecto esencial del riesgo percibido que se refiere a las preocupaciones de las personas sobre posibles daños, lesiones o peligros para la seguridad vinculados a una decisión o acción, que surge del temor a comprometer la integridad personal [5]. Este riesgo se manifiesta principalmente en tres áreas:

- Seguridad del producto: la incertidumbre sobre si un artículo (como motores o dispositivos electrónicos) cumple con los estándares necesarios para una operación segura [2].
- Riesgo sanitario/salud: en sectores como la ropa de segunda mano (SHC), el riesgo físico se expresa como el

temor a contagios, gérmenes, enfermedades de la piel o alergias derivadas del uso previo por parte de extraños [10] [14]. Esta percepción se ve agravada por la falta de transparencia en los protocolos de desinfección o la higiene de los materiales reciclados [4].

- Seguridad personal: en la economía colaborativa (como el ride-sharing), se refiere al miedo por la integridad física al interactuar con extraños o utilizar servicios menos regulados [9] [15].

F. *Riesgo social*

En el apartado conductual, se manifiesta el riesgo social, que surge de la posibilidad de que el uso de productos usados o reacondicionados derive en valoraciones desfavorables por parte del entorno social inmediato del consumidor [5] [14]. La elección de bienes circulares puede entrar en conflicto con aspectos como el estatus o la imagen externa que el comprador desea proyectar [14] [16].

No se trata del funcionamiento del producto, sino de la imagen que el consumidor proyecta al usarlo [16]. Sus componentes principales incluyen la pérdida de estatus, que se refiere al temor a que la compra sugiera una posición económica inferior o falta de éxito [10]. Por ejemplo, en el mercado de ropa de segunda mano (SHC), existe un estigma histórico que asocia estas prendas con la pobreza [2] [16]. Por otra parte, se presenta también la desaprobación social, referente a la preocupación de que amigos, familiares o círculos sociales importantes critiquen o juzguen negativamente la elección de consumo [16].

En general, una alta percepción de riesgo social genera sentimientos de vergüenza o ansiedad, lo que deteriora la actitud general hacia el producto y, en consecuencia, disminuye drásticamente la intención de compra [10] [14].

G. *Riesgo psicológico*

Ligado al concepto anterior, está el riesgo psicológico, manifestado mediante el estrés psicosocial o la disonancia cognitiva derivada de un conflicto de identidad que padece el usuario cuando el acto de consumo no está alineado con su identidad y expectativas [17]. De igual manera, se refiere a las preocupaciones del consumidor sobre las consecuencias emocionales o psicológicas negativas que podrían derivarse de una decisión de compra manifestadas como sentimientos de pavor, incertidumbre, ansiedad o preocupación [5].

III. Metodología

A. *Enfoque y diseño de la investigación*

La investigación presentada adopta un enfoque cuantitativo de corte transversal y diseño no experimental, el cual es considerado adecuado en la literatura sobre la sostenibilidad y el consumo, puesto que permite comprender diferentes fenómenos del mercado y evaluar sistemáticamente el comportamiento del consumidor frente a diferentes dinámicas de análisis [15].

B. *Recolección de datos y participantes*

El proceso de recolección de datos se llevó a cabo mediante un diseño de muestreo no probabilístico por el método de bola de nieve. Se alcanzó una participación total de 385 individuos residentes en la región del Eje Cafetero, Colombia. La muestra final estuvo conformada por 201 mujeres, 180 hombres, 2 personas no binarias y 2 que prefirieron no indicar su género.

En cuanto a la edad de los participantes, 163 tienen entre 18 y 24 años, 145 están entre los 25 y 34 años, 56 se ubican entre los 35 y 44 años, 9 tienen entre 45 y 54 años, 9 entre 55 y 64 años, y 3 tienen 65 años o más.

Sobre su nivel de escolaridad, 152 son profesionales con pregrado, 98 son técnicos o tecnólogos, 77 tienen formación de bachillerato o educación media, 53 cuentan con especialización o maestría, y 5 tienen un doctorado.

Finalmente, respecto a su ocupación principal, 167 son empleados, 136 son estudiantes, 63 son trabajadores independientes o emprendedores, 8 están desempleados, 7 son pensionados y 4 se dedican a labores del hogar.

C. *Instrumento de recolección y medición de variables*

Se utilizó un cuestionario estructurado en formato digital, diseñado a través de Google Forms, el cual, adicional al consentimiento informado y los datos generales, estuvo conformado por 35 preguntas en escala Likert de 1 a 5 puntos, estructurado en siete constructos con 5 ítems cada uno: riesgo financiero (FIN), riesgo funcional (FUN), riesgo social (SOC), riesgo físico o higiénico (HIG), riesgo psicológico (PSI), riesgo de conveniencia o tiempo (TIE) e intención de adopción (INT).

D. *Procesamiento y análisis de datos*

La consistencia interna de cada constructo se evaluó mediante el coeficiente alfa de Cronbach (α). Previo al análisis factorial, se verificó la adecuación muestral con el índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett.

Para cada constructo se calculó la puntuación promedio con sus respectivos estadísticos descriptivos y se examinó el efecto de los riesgos percibidos sobre la intención de compra. Se estimó un modelo de regresión lineal múltiple con los seis tipos de riesgo como predictores estandarizados (puntuaciones Z) y la intención de adopción como variable dependiente. Todos los análisis fueron realizados en el software R, empleando los paquetes psych, car y broom.

IV. Resultados

A. *Fiabilidad y validez del instrumento*

Los valores del alfa de Cronbach obtenidos para cada constructo fueron: riesgo financiero ($\alpha = 0.845$), riesgo funcional ($\alpha = 0.866$), riesgo social ($\alpha = 0.863$), riesgo higiénico ($\alpha = 0.811$), riesgo psicológico ($\alpha = 0.725$), riesgo de tiempo ($\alpha = 0.744$) e intención de adopción ($\alpha = 0.870$), todos superiores al umbral mínimo aceptable de 0.70, lo que evidencia una consistencia interna satisfactoria en todos los constructos. La adecuación muestral fue confirmada mediante el índice KMO = 0.909 y la prueba de Bartlett ($\chi^2 = 7925.0$, p < 0.001), validando la pertinencia del análisis factorial.

B. *Estadísticos descriptivos y correlaciones*

Como se puede evidenciar en la Tabla I, la intención de adopción registró la media más alta, seguida del riesgo funcional y el riesgo financiero. Por su parte, el riesgo social presentó la puntuación más baja, sugiriendo que los participantes no perciben la opinión de su entorno como una barrera relevante en

la adopción de productos circulares. Los coeficientes de asimetría y curtosis se mantuvieron dentro de rangos aceptables para la mayoría de los constructos, a excepción del riesgo social, que mostró asimetría positiva y curtosis elevada, indicando una distribución sesgada hacia puntuaciones bajas.

TABLE I. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS

Variable	Media	DE	Mediana	Sesgo	Curtosis
FIN	3.018	1.033	3.2	-0.248	-0.805
FUN	3.033	1.021	3.2	-0.204	-0.803
SOC	1.78	0.838	1.6	1.33	1.403
HIG	2.624	0.95	2.6	0.198	-0.761
PSI	2.344	0.86	2.2	0.517	-0.287
TIE	2.353	0.872	2.4	0.348	-0.483
INT	3.338	1.002	3.4	-0.625	-0.025

Por su parte, la matriz de correlaciones de Pearson reveló correlaciones moderadas a altas entre las dimensiones del riesgo percibido. Las asociaciones más fuertes se observaron entre riesgo financiero y funcional (r = 0.81), riesgo psicológico e higiénico (r = 0.75), y riesgo psicológico y de tiempo (r = 0.71). En contraste, la intención de adopción mostró correlaciones bajas con todas las dimensiones del riesgo, siendo las más altas con riesgo financiero (r = 0.24) y riesgo funcional (r = 0.24), y prácticamente nula con riesgo social (r = -0.08) e higiénico (r = 0.07).

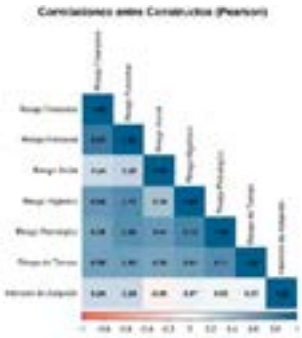


Fig. 1. Matriz de correlaciones de Pearson entre constructos.

C. *Regresión lineal múltiple*

El modelo de regresión lineal múltiple estimado para predecir la intención de adopción a partir de los seis riesgos percibidos estandarizados resultó estadísticamente significativo, explicando el 10.4% de la varianza de la variable dependiente ($R^2 = 0.104$). De los seis predictores incluidos, únicamente el riesgo funcional ($\beta = 0.28$, p < 0.01) y el riesgo financiero ($\beta = 0.19$, p < 0.05) mostraron efectos positivos y estadísticamente significativos sobre la intención de adopción. Los restantes predictores (riesgo de tiempo, psicológico, social e higiénico) no alcanzaron significancia estadística ($p \geq 0.05$). Los valores del VIF no indicaron problemas de multicolinealidad relevantes en el modelo.

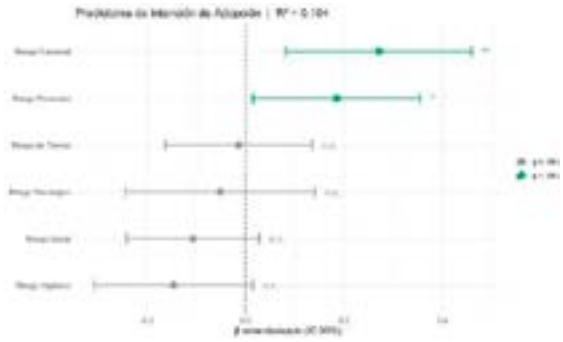


Fig. 2. Predictores estandarizados de la intención de adopción (IC 95%).

V. DISCUSIÓN Y LIMITACIONES

A. *Discusión*

El riesgo funcional ($\beta = 0.285$, p < 0.01) y el riesgo financiero ($\beta = 0.192$, p < 0.05) emergen como predictores significativos de la intención de compra de productos circulares, explicando el 10.4% de la varianza. Sin embargo, el comportamiento de estos datos indica que, contrario a lo que se planteaba inicialmente, estas variables no logran frenar la intención de compra. Este fenómeno sugiere la presencia de un mecanismo que procura la compensación en la toma de decisión, es decir que, aunque los consumidores son conscientes de las deficiencias económicas y de desempeño, hay otros factores que favorecen la compra. Estudios previos de economía circular apoyan esta dinámica, donde la motivación de ahorro, el valor percibido y el conocimiento de los productos son variables que compensan la percepción de riesgo.

Contrariamente, los riesgos psicosociales (social y psicológico) no son estadísticamente significativos ($p \geq 0.05$), sugiriendo que el estigma social sobre productos de segunda mano es mínimo en el Eje Cafetero, un hallazgo positivo para la viabilidad regional de la economía circular. La poca influencia de dichas barreras en la muestra estudiada es un acierto de gran importancia, ya que refleja la madurez del mercado y la normalización de la cultura de sostenibilidad en la percepción de los consumidores, no habituados a los mercados circulares en otros contextos, dando un panorama positivo para la acertada aceptación de estos modelos de negocio.

B. *Limitaciones y futuros estudios*

A pesar de las contribuciones de este estudio a la comprensión del comportamiento del consumidor en la economía circular, es preciso reconocer ciertas limitaciones metodológicas que abren oportunidades para futuras investigaciones. En primer lugar, la investigación adoptó un estudio transversal, lo que implica que los datos fueron recolectados en un único momento en el tiempo. Asimismo, la recolección de datos se llevó a cabo mediante un método de muestreo no probabilístico. Para mitigar estas barreras se sugieren estudios que empleen métodos longitudinales y técnicas de muestreo que permitan validar y generalizar los resultados con mayor precisión.

En segundo lugar, el coeficiente de determinación (R^2) obtenido en el análisis sugiere que una proporción considerable de la varianza es explicada por variables ajenas a las evaluadas

en esta investigación. Se recomienda en investigaciones futuras ampliar el marco teórico e incluir constructos adicionales.

C. Conclusiones

El presente estudio exploratorio tuvo como propósito fundamental analizar la influencia que ejerce el riesgo percibido sobre la intención de compra de productos circulares en el contexto del Eje Cafetero.

Al evaluar las diferentes dimensiones del riesgo, los resultados empíricos revelaron una dinámica particular y contraintuitiva frente a la teoría clásica del comportamiento del consumidor. Se identificó que el riesgo funcional y el riesgo financiero emergen como los predictores más significativos, al evidenciar una relación directa (positiva) con la intención de compra. En este sentido, una mayor conciencia o percepción de la incertidumbre técnica y económica del producto no inhibe el deseo de compra, sino que coexistió con una alta disposición a adquirirlo.

El modelo explica solo el 10.4% de la varianza, indicando que otros factores (marca, contexto, disponibilidad) son relevantes. Futuras investigaciones deben: (a) incluir variables mediadoras/moderadoras, (b) validar intención versus comportamiento de compra real, y (c) expandir geográficamente. No obstante, la identificación del riesgo funcional como predictor principal proporciona una brújula clara para intervenciones inmediatas.

En síntesis, la economía circular es viable en el Eje Cafetero si se aborda la incertidumbre técnica y económica del consumidor. El riesgo percibido no es un obstáculo insuperable, sino una barrera cognitiva que empresas y gobiernos pueden mitigar sistemáticamente mediante información, garantías y regulación. La crisis ambiental requiere transiciones rápidas; este estudio proporciona evidencia de dónde enfocarse para lograrlas.

Referencias

[1] N. J. Dewasiri, R. Singh, A. Najeeb, y M. S. H. Rathnasiri, “Exploring enablers and challenges in building smart circular economies through industry 4.0 technologies in South Asia,“ Discov. Sustain., vol. 7, art. 220, 2026. doi: 10.1007/s43621-026-02614-1.

[2] S. A. R. Khan, M. Tabish, y Z. Yu, “The decision analysis of consumer purchasing for refurbished products,“ Waste Manage. Res., vol. 43, no. 10, pp. 1577–1593, 2025. doi: 10.1177/0734242X251328890.

[3] Y. Wang y B. T. Hazen, “Consumer product knowledge and intention to purchase remanufactured products,“ Int. J. Prod. Econ., vol. 181, pp. 460–469, 2016. doi: 10.1016/j.ijpe.2015.08.031.

[4] J. Jisha et al., “Modelling consumer intent for purchase recycled products: a pathway to future sustainability,“ Waste Manage. Bull., vol. 4, pp. 1–18, 2026. doi: 10.1016/j.wmb.2026.100280.

[5] N. M. Shahren, M. Ayob, y S. N. Omar, “The influence of perceived risk on the performance of the entrepreneur,“ Inf. Manage. Bus. Rev., vol. 16, no. 3, pp. 328–338, sep. 2024. doi: 10.22610/imbr.v16i3(I).3864.

[6] P. Yanti et al., “Customer-driven socio-environmental sustainability in fashion: the role of green word-of-mouth and perceived product value,“ Glob. J. Environ. Sci. Manage., vol. 12, no. 1, pp. 191–206, 2026. doi: 10.22034/gjesm.2026.01.11.

[7] N. D. Nguyen, “Purchase intention for circular products among Vietnamese consumers: the impact of perceived factors,“ Adv. Consum. Res., vol. 2, no. 5, pp. 2869–2876, nov. 2025. [En línea]. Disponible: https://acr-journal.com/article/download/pdf/2020/.

[8] K. Slaton, “Company-controlled vs. seller-controlled resale platforms: consumer trust, risk, and purchase intention in circular fashion,“ Sustainability, vol. 17, no. 21, art. 9847, 2025. doi: 10.3390/su17219847.

[9] X. Xu, S. Zeng, y Y. He, “The impact of information disclosure on consumer purchase behavior on sharing economy platform Airbnb,“ Int. J. Prod. Econ., vol. 231, art. 107846, 2021. doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107846.

[10] K. Y. Koay, C. W. Cheah, y H. S. Lom, “Does perceived risk influence the intention to purchase second-hand clothing? A multigroup analysis of SHC consumers versus non-SHC consumers,“ J. Prod. Brand Manage., vol. 32, no. 4, pp. 530–543, 2023. doi: 10.1108/JPBM-11-2021-3721.

[11] N. A. Mobarak, N. A. Amin, A. Abdel-Mohssen, A. Sharif, Y. T. Halim, y K. Brickman, “Second glance: exploring consumer shifts to thrift shopping and perception of second-hand fashion,“ Futur. Bus. J., vol. 11, art. 88, 2025. doi: 10.1186/s43093-025-00481-2.

[12] E. van Weelden, R. Mugge, y C. Bakker, “Paving the way towards circular consumption: exploring consumer acceptance of refurbished mobile phones in the Dutch market,“ J. Clean. Prod., vol. 113, pp. 743–754, 2016. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.065.

[13] U. Sanyal y V. Kamala, “Integration of circular economy principles in consumer behaviour for sustainable laptops,“ en Proc. 5th Indian Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manag., Vellore, India, nov. 2025. doi: 10.46254/IN05.20250103.

[14] K. Y. Koay, M. L. Cheung, H. S. Lom, y W. K. S. Leung, “Perceived risk and second-hand clothing consumption: a moderated-moderation model,“ J. Fashion Mark. Manage., vol. 28, no. 2, pp. 240–253, 2024. doi: 10.1108/JFMM-01-2023-0001.

[15] Ó. Anaya, “The moderating effect of perceived risk on consumer behavior in the sharing economy: a perspective from a developing country,“ Multidiscip. Sci. J., vol. 8, no. 2, art. 2026062, 2026. doi: 10.31893/multiscience.2026062.

[16] E. Hur, “Rebirth fashion: secondhand clothing consumption values and perceived risks,“ J. Clean. Prod., vol. 273, art. 122951, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122951.

[17] C. Lang, “Perceived risks and enjoyment of access-based consumption: identifying barriers and motivations to fashion renting,“ Fashion Text., vol. 5, no. 1, art. 23, 2018. doi: 10.1186/s40691-018-0139-z.

Análisis y control de un convertidor Dual Active Bridge para el intercambio de energía entre microrredes en corriente continua.

1er Brayan Roberto Pimiento Palacios
Ingeniería electrónica
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia
brpimientop@udistrital.edu.co,

2do Leidy Johana Sánchez Suárez
Ingeniería electrónica
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia
ljsanchezs@udistrital.edu.co, ,

3er Nelson Leonardo Díaz Aldana
Ingeniería electrónica
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia
nldiaza@udistrital.edu.co,

***Resumen*—El convertidor de Puente Activo Dual (Dual Active Bridge, DAB) es una topología aislada compuesta por dos puentes completos interconectados mediante un transformador de alta frecuencia. Este elemento no solo garantiza el aislamiento galvánico, sino que también facilita la adaptación de tensión entre buses de distinta magnitud. Esta característica permite la interconexión y el flujo bidireccional y eficiente de potencia entre microrredes de corriente continua con diferentes niveles de tensión. Este trabajo se enfoca en el desarrollo de un modelo para la validación mediante simulación Hardware-in-the-Loop (HIL) de un convertidor DAB no resonante que habilita el flujo bidireccional de potencia entre dos redes de corriente continua. Para el control del flujo de potencia, se propone un esquema de control lineal adaptativo que ajusta sus ganancias de acuerdo con diferentes regiones de operación, las cuales fueron sintonizadas mediante un proceso de identificación del sistema realizado fuera de línea. Los resultados demuestran una operación efectiva del convertidor DAB para el intercambio de energía entre sistemas de corriente continua.**

***Palabras clave*—Dual Active Bridge, Microrredes DC, Hardware in the Loop.**

I. Introducción

El Dual Active Bridge (DAB) es un convertidor DC-DC bidireccional de alta frecuencia y aislado, ampliamente utilizado en sistemas de almacenamiento de energía, redes inteligentes, vehículos eléctricos y en aplicaciones de energía renovable. Su capacidad de transferencia bidireccional de energía, junto con la posibilidad de conmutación suave, lo convierte en una solución ideal para la integración de fuentes de energía distribuida y sistemas de carga de alta eficiencia [1]. El DAB tiene como objetivo permitir una transferencia de potencia controlada entre dos buses de corriente continua (DC) mientras proporciona aislamiento galvánico a través de un transformador de alta frecuencia (HF) [2] [3]. Este tipo de convertidores pueden ser resonantes o no resonantes, su principal diferencia radica en que los resonantes hacen uso de inductores y condensadores para lograr una conmutación suave que, como consecuencia, reduce las pérdidas en los transistores durante la conmutación y aumenta la eficiencia del sistema [2].

Es posible controlar la dirección y cantidad de potencia transferida mediante la modulación por cambio de fase (PSM), que ajusta el desfase entre las señales de los puentes H de entrada y salida. Este cambio de fase determina la potencia transferida a través del transformador HF y permite controlar la dirección del flujo de energía [4]. Esta característica, sumada a la etapa de aislamiento provista por el transformador de alta frecuencia, lo convierte en un candidato ideal para la integración de redes de corriente continua, permitiendo un flujo bidireccional de potencia incluso entre redes heterogéneas con diferentes niveles de tensión en sus buses de DC. Por esta razón, los convertidores DAB suelen ser una de las soluciones preferidas para la interconexión de microrredes en corriente continua, favoreciendo la integración de fuentes de energía renovable como generación fotovoltaica, pequeños aerogeneradores y sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías [5], [6].

La implementación práctica de convertidores DAB dentro de microrredes DC y sistemas de interconexión energética exige el desarrollo de estrategias de control robustas capaces de garantizar estabilidad, regulación del flujo bidireccional de potencia y operación segura bajo diferentes condiciones de carga y generación. Sin embargo, debido a la dinámica rápida impuesta por la conmutación en alta frecuencia, la interacción entre los puentes activos, el transformador de alta frecuencia y los sistemas de almacenamiento o generación conectados, el diseño y ajuste de estos controladores resulta altamente complejo. Además, la validación directa sobre prototipos físicos puede implicar altos costos, riesgos operativos y tiempos prolongados de desarrollo [7]. En este escenario, la simulación en tiempo real se convierte en una herramienta fundamental durante la etapa de diseño y validación, ya que permite analizar el comportamiento dinámico del convertidor, evaluar estrategias de modulación y control, y verificar condiciones de operación antes de su implementación experimental. Particularmente, los esquemas Hardware-in-the-Loop (HIL) ofrecen una plataforma altamente efectiva para emular el comportamiento real del sistema de potencia y acelerar el proceso

de desarrollo tecnológico de convertidores DAB aplicados a microrredes y sistemas energéticos avanzados.

En este contexto, el entorno de OPAL-RT mediante su herramienta RT-LAB permite ejecutar simulaciones en tiempo real a partir de modelos de gran escala, aprovechando el procesamiento paralelo y distribuido para cumplir con los requerimientos de tiempo propios de aplicaciones HIL. Esta herramienta proporciona una interfaz interactiva para configurar y gestionar las funciones del simulador, y permite vincularse con MATLAB/Simulink para usar los modelos disponibles de Simulink e interactuar con el mundo real [8].

Adicionalmente, el eHS (Electric Hardware Solver) es un solucionador eléctrico genérico y reprogramable que utiliza tecnología FPGA, lo que le permite ejecutar cálculos a muy alta velocidad y con gran precisión en la simulación de sistemas eléctricos, especialmente aquellos que involucran electrónica de potencia. El eHS proporciona una interfaz que permite incorporar modelos en tiempo real provenientes de diversas herramientas de simulación como Simscape Power Systems, Simulink Toolbox, PSIM, PLECS Blockset o Multisim, facilitando así la integración de diferentes entornos de modelado dentro de una misma plataforma. Gracias a esta combinación entre OPAL-RT, RT-LAB y eHS, es posible implementar simulaciones en tiempo real altamente fieles, en las cuales el sistema simulado interactúa con dispositivos físicos, permitiendo evaluar su desempeño en condiciones cercanas a la operación en la vida real.

El trabajo que se presenta en este documento se centra principalmente en diseñar e implementar un entorno de simulación en tiempo real para un convertidor Dual Active Bridge (DAB) que permita el intercambio de energía entre dos microrredes de corriente continua. En la sección II se realiza una explicación de cómo funciona el sistema y sus principales características. La sección II-B presenta el análisis matemático del sistema para obtener sus ecuaciones más relevantes y facilitar el entendimiento del comportamiento del convertidor. La sección III caracteriza el sistema por medio de una herramienta de identificación de MATLAB, con la cual se obtienen modelos lineales que permiten el diseño de controladores lineales. Finalmente, la sección IV muestra los resultados experimentales de la simulación en tiempo real para validar su funcionamiento.

II. Funcionamiento del DAB no resonante

Esta sección aborda el diseño del DAB desde un enfoque clásico, el cual es el más común debido a su simplicidad estructural y eficacia en muchas aplicaciones [9].

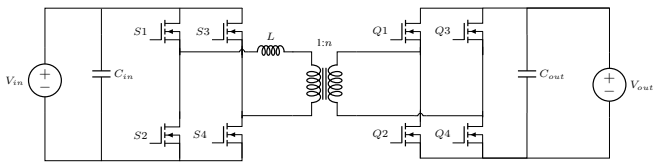


Figura 1. Esquema DAB no resonante. Autoría propia.

El modelo mostrado en la Fig. 1 utiliza una inductancia de acoplamiento en el transformador para facilitar la transferencia de energía. Su control suele ser mediante cambio de fase, aunque a niveles de carga elevados puede presentar mayor pérdida por circulación de corriente. Por otro lado, esta topología es adecuada para aplicaciones de alta potencia donde la eficiencia en el rango medio a alto de potencia es clave [2].

II-A. Estructura y Funcionamiento del Convertidor DAB

El DAB se compone de dos puentes H de dos niveles (cada uno con cuatro interruptores semiconductores, que pueden ser MOSFETs o IGBTs) y un transformador de alta frecuencia; el funcionamiento básico del DAB incluye las siguientes etapas:

1. Conversión DC-AC en el lado primario: El puente H primario convierte la tensión de entrada DC en una señal AC de alta frecuencia.
2. Transferencia de energía a través del transformador HF: La señal AC generada pasa a través de un transformador de alta frecuencia que proporciona aislamiento galvánico y permite ajustar los niveles de tensión por medio de la relación de transformación.
3. Reconversión de AC a DC en el lado secundario: En el lado secundario del transformador, el segundo puente H reconvierte la señal AC a una señal DC, ajustando la tensión de salida de acuerdo con los requisitos de carga o almacenamiento.

La Fig. 2 presenta un esquema que indica el funcionamiento por etapas de un convertidor DAB:



Figura 2. Esquema por etapas del convertidor DAB [3].

Adicionalmente, la cantidad y dirección de potencia se controlan por medio de la modulación por cambio de fase (PSM), que ajusta el desfase entre las señales de los puentes H de entrada y salida. Este cambio de fase determina la potencia transferida a través del transformador HF y permite controlar la dirección del flujo de energía, como se muestra en la Fig. 3.

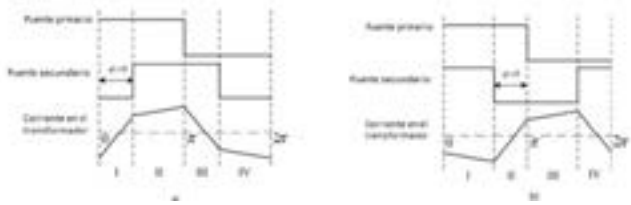


Figura 3. Esquema de modulación por cambio de fase en un DAB [2].

II-B. Modulación SPS (Single Phase Shift)

Una de las técnicas de control es la modulación monofásica (SPS); esta es una de las técnicas más empleadas en los

convertidores Dual Active Bridge (DAB). El método se basa en generar un desfase entre las señales de conmutación de los dos puentes con un ciclo de trabajo del 50 %, lo que permite regular la dirección y magnitud de la potencia transferida. Su principal ventaja radica en su simplicidad, alta dinámica y facilidad de implementación. Sin embargo, presenta limitaciones como la imposibilidad de mantener conmutación (ZVS) en todo el rango operativo y la aparición de corrientes circulantes elevadas cuando la relación de transformación no es unitaria, lo que incrementa las pérdidas y disminuye la eficiencia global del sistema [10].

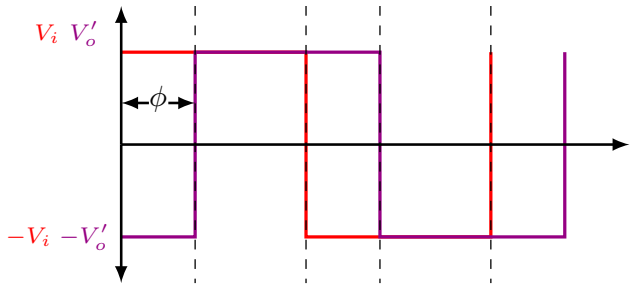


Figura 4. Esquema de modulación SPS. Autoría propia.

II-C. Dinámica DAB no resonante

Teniendo en cuenta la técnica de modulación que se presenta en la Fig. 4, es posible analizar el comportamiento dinámico del DAB usando como punto de referencia el inductor, como se muestra en la Fig. 5.

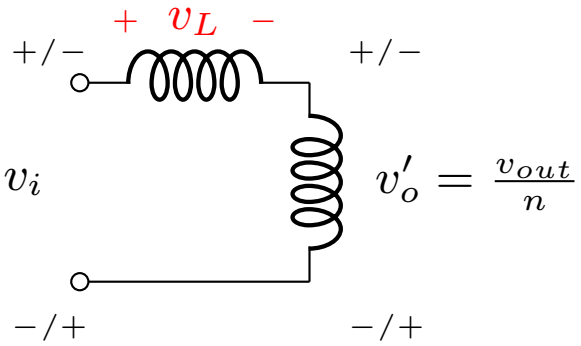


Figura 5. Modelo simplificado devanado primario. Autoría propia.

Usando como referencia el modelo simplificado, se puede ilustrar el comportamiento dinámico en el inductor obteniendo las formas de onda de voltaje y corriente en este elemento, como se ilustra a continuación en la Fig. 6.

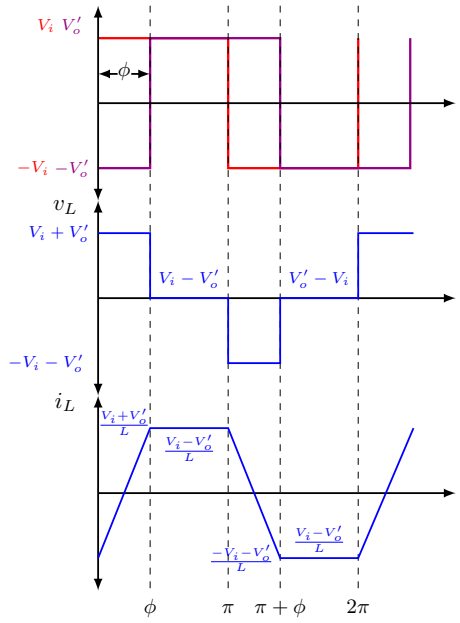


Figura 6. Dinámica en el inductor. Autoría propia.

Partiendo de la dinámica mostrada en la Fig. 6, las ecuaciones que rigen la dinámica del DAB se presentan a continuación:

$$i_L(\theta) = \begin{cases} \frac{v_i+v_o'}{\omega L}\theta + i_L(0), & 0 < \theta \leq \phi \\ \frac{v_i-v_o'}{\omega L}(\theta-\phi) + i_L(\phi), & \phi < \theta \leq \pi \\ \frac{-(v_i+v_o')}{\omega L}(\theta-\pi), & \pi < \theta \leq \pi+\phi \\ \frac{-(v_i-v_o')}{\omega L}(\theta-\pi-\phi), & \pi < \phi \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \tag{1}$$

Considerando que $i(\pi) = -i(0)$, se puede obtener el siguiente sistema de ecuaciones: evaluando $\theta = \pi$ y $\theta = \phi$

$$\begin{aligned} i(\pi) &= \frac{v_i - v_o'}{\omega L}(\pi - \phi) + i(\phi) \\ i(\phi) &= \frac{v_i + v_o'}{\omega L}\phi + i_L(0) \\ i(\pi) &= -i(0) \end{aligned} \tag{2}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones mostrado en (2) se obtiene como resultado:

$$\begin{aligned} i(0) &= \frac{-2v_o\phi - v_i\pi + v_o\pi}{2\omega L} \\ i(\phi) &= \frac{2v_i\phi - v_i\pi + v_o'\pi}{2\omega L} \end{aligned} \tag{3}$$

Adicionalmente, la potencia de salida se define como:

$$P_o = V_i \cdot I_i \tag{4}$$

Evaluando la potencia en el intervalo $0 \leq \phi \leq \pi$ se obtiene:

$$
\begin{aligned}
P_o &= \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} v_i(\theta) i_L(\theta) d\theta \\
&= \frac{v_i}{\pi}\int_0^{\pi} i_L(\theta) d\theta \\
&= \frac{v_i}{\pi}\left[\int_0^{\phi} \frac{v_i - v'_o}{\omega L}\theta + i(0) d\theta + \int_{\phi}^{\pi} \frac{v_i - v'_o}{\omega L}(\theta - \phi) + i(\phi) d\theta\right]
\end{aligned} \tag{5}
$$

En consecuencia, la potencia de salida es el resultado de la integral planteada en (5):

$$
P_o = \frac{v_i}{\pi}\left[\frac{2v'_o\pi\phi - 2v'_o\phi^2}{2\omega L}\right] = \frac{v_i v'_o \phi(\pi - \phi)}{\pi\omega L} \tag{6}
$$

Teniendo en cuenta que $P = v_i \cdot i_i = v'_o \cdot i'_o$

$$
\begin{aligned}
v'_o \cdot i'_o &= \frac{v_i v'_o \phi(\pi - \phi)}{\pi\omega L} \\
i'_o &= \frac{v_i \phi(\pi - \phi)}{\pi\omega L} \\
i_o &= \frac{v_i}{n\pi\omega L}\phi(\pi - \phi)
\end{aligned} \tag{7}
$$

En la ecuación (7) se evidencia que la corriente de salida I_o tiene un comportamiento no lineal de segundo orden respecto al desfase ϕ, que tiene un máximo teórico que ocurre en $\phi = \frac{\pi}{2}$. Sin embargo, dado que la región de operación se encuentra en el rango $\frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \frac{3\pi}{2}$, la fase que produce la máxima transferencia de potencia dentro de esta zona se presenta en los extremos $\phi = \frac{\pi}{2}$ y $\phi = \frac{3\pi}{2}$.

III. Modelado y Control

Inicialmente, se toma un modelo existente en la literatura y se caracteriza en lazo abierto para obtener un modelo matemático equivalente por medio de la herramienta de MATLAB System Identification Toolbox. Para la caracterización del sistema mostrada en la Fig. 7, se hizo uso de una señal de entrada tipo rampa con la finalidad de evitar cambios abruptos en la respuesta del sistema. En la Tabla I se muestran los parámetros del DAB con los cuales se realizó la identificación del sistema.

TABLA I
Parámetros de simulación del DAB.

Indicador	Valor
V_{in}	400 Vdc
V_{out}	800 Vdc
L	40 μH
n	1 : 1,6
C_i	750 μF
C_o	750 μF
R_{on} S1-4	0,81 Ω
R_{off} S1-4	100 kΩ
R_{on} Q1-4	0,085 Ω
R_{off} Q1-4	100 kΩ

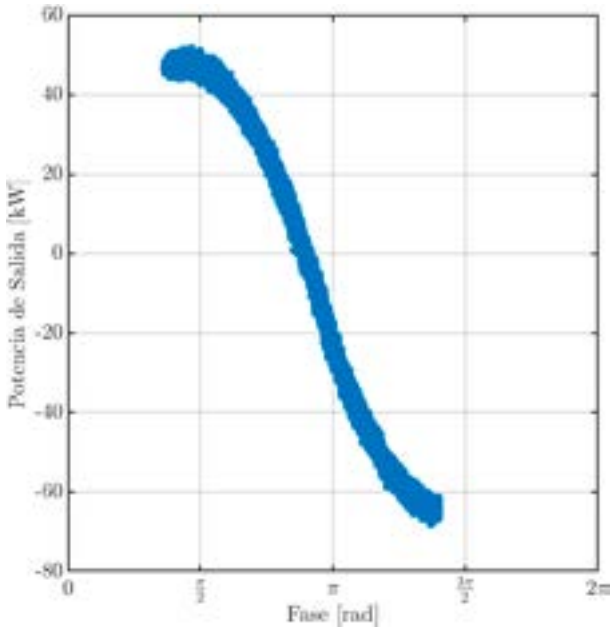


Figura 7. Identificación DAB en lazo abierto.

Una vez obtenida la caracterización del sistema, se realiza el diseño de un control de corriente en lazo cerrado considerando diferentes regiones de operación, ya que, al ser un sistema no lineal, uno de los controles posibles se basa en un control adaptativo. Se opta por un control de corriente, ya que en ambos extremos del DAB se asumen fuentes de tensión constantes; teniendo presente que la potencia se define como $P = VI$ se tendría un control de potencia indirectamente. Las funciones de transferencia de corriente que rigen la respuesta del DAB son:

$$
\begin{aligned}
&\frac{-1{,}1685 \times 10^4 (s + 0{,}0026)}{(s + 0{,}0015)(s + 48{,}0218)}, \quad 35 \text{ A} < I_o \leq 60 \text{ A} \\
&\frac{-3{,}9109 \times 10^5 (s + 0{,}0837)}{(s + 0{,}0837)(s + 763{,}3652)}, \quad 0 \text{ A} \leq I_o \leq 35 \text{ A} \\
&\frac{-1{,}8917 \times 10^5 (s - 7{,}7202 \times 10^{-4})}{s(s + 354{,}6772)}, \quad -80 \text{ A} \leq I_o \leq -30 \text{ A} \\
&\frac{-1{,}9906 \times 10^5 (s + 0{,}0013)}{(s + 0{,}0013)(s + 357{,}2622)}, \quad -30 \text{ A} < I_o < 0 \text{ A}
\end{aligned} \tag{8}
$$

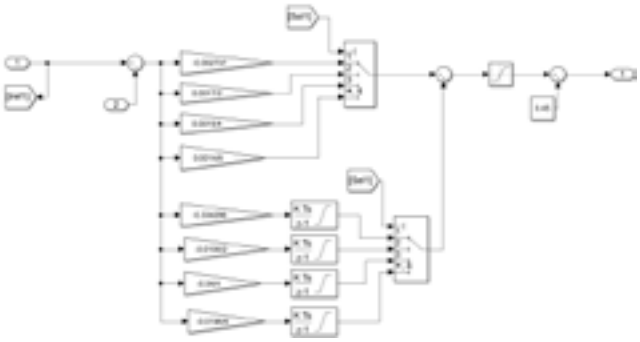
En todos los intervalos de control se optó por un controlador PI que tuviera como criterios de diseño un sobreimpulso $\leq 7\,\%$ y un tiempo de estado estacionario $t_{ss} \leq 0{,}1$ s. Los parámetros fueron seleccionados según la documentación consultada, Por otro lado, la ubicación del polo deseado al ser un sistema de segundo orden se encuentra en:

$$
P_d = -\zeta * \omega_n + j * \omega_n * \sqrt{1 - \zeta^2} \tag{9}
$$

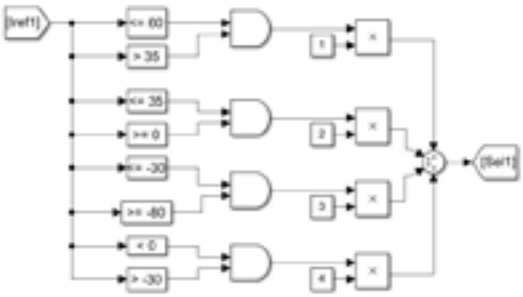
En la ecuación (9) se sabe que $\zeta = 0{,}64$ y $\omega_n = 62{,}5$, por lo tanto, el polo deseado para el sistema es $P_d = -40 + j48{,}0234$. Este polo deseado fue usado en todos los tramos para realizar el diseño del controlador por medio de la técnica LGR. Como resultado del diseño se obtuvieron las siguientes constantes:

$$\begin{aligned} kp &= -0{,}002737 \quad ki = -0{,}334296, \quad 35\ \text{A} < I_o \leq 60\ \text{A} \\ kp &= \ \ 0{,}0017 \quad\ ki = -0{,}01, \quad\ \ 0\ \text{A} \leq I_o \leq 35\ \text{A} \\ kp &= \ \ 0{,}0015 \quad\ ki = -0{,}04, \quad\ \ -80\ \text{A} \leq I_o \leq -30\ \text{A} \\ kp &= \ \ 0{,}0014 \quad\ ki = -0{,}0196, \quad -30\ \text{A} < I_o < 0\ \text{A} \end{aligned} \tag{10}$$

A continuación, se presenta el controlador diseñado, además del selector de ganancia, como resultado del diseño planteado.



(a) Controlador



(b) Selector de controlador

Figura 8. Control adaptativo de corriente.

IV. Simulación HIL

El modelo se implementa en la plataforma de simulación OPAL-RT usando un solver electromagnético en tiempo real basado en FPGA (eHS), lo que permite evaluar el comportamiento dinámico del convertidor bajo condiciones de operación cercanas a la realidad. En el modelo, los interruptores se parametrizaron de acuerdo a valores de transistores comerciales, y adicionalmente se implementó un control que permite gestionar el flujo de potencia de forma bidireccional, haciendo uso de la conmutación de las constantes de control para lograr ajustarse a las características no lineales del DAB. A continuación se muestran los resultados del control de potencia, además de las señales de transmisión de potencia bidireccional entre los puentes H.

El modelo de simulación implementado en eHS se muestra en la Fig. 9. Este modelo se implementó en la FPGA Kintex-7, la cual permite simular el convertidor DAB con tiempos de muestreo de $235ns$, lo que permite una aproximación dinámica muy cercana a la de un convertidor real.

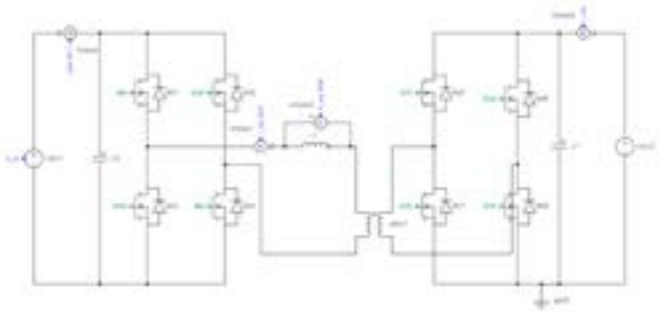


Figura 9. Modelo DAB implementado en eHS.

En la Fig. 10 se puede evidenciar el seguimiento a la señal de referencia de potencia de salida, comprobando un error de estado estacionario $e_{ss} = 0$, gracias al polo ubicado en el origen que ofrece el integrador. En todos los casos, la fase es la acción de control y está limitada entre $\frac{\pi}{2}$ y $\frac{3\pi}{2}$, ya que fue la zona de identificación y se caracteriza por ser la zona de mayor eficiencia, además de estar entre los puntos de máxima transferencia de potencia. Respecto al comportamiento transitorio del control, se muestran dos tiempos de estado estacionario diferentes; esto es consecuencia de haber tenido que escalar algunas constantes del controlador, ya que saturaban la acción de control, lo cual aumentó el tiempo de establecimiento de algunas zonas de respuesta del sistema, que se encuentra en el rango de $0{,}1\ \text{s} \leq t_{ss} \leq 1\ \text{s}$.

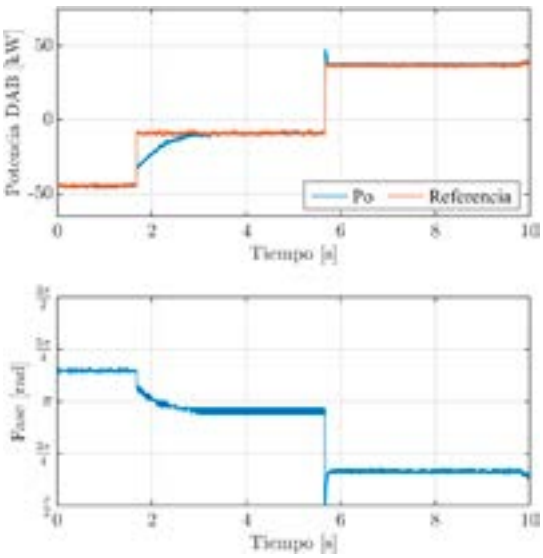


Figura 10. Validación del funcionamiento del control del DAB.

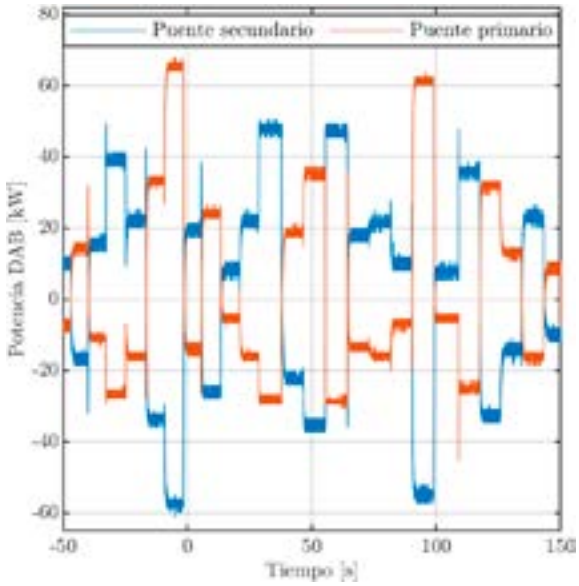


Figura 11. Transmisión de potencia entre devanados.

De la misma forma, también se puede obtener la gráfica de la transferencia de potencia entre los puentes, la cual se muestra en la Fig. 11, donde es posible constatar la característica de bidireccionalidad que ofrece este tipo de sistemas. Respecto a las pérdidas, estas son menores al 10 %. A lo anterior se añade que, como puntos máximos de transferencia de potencia están en el orden de 60 kW, en estos puntos, se evidencia una eficiencia del 93,75 %, sin embargo, hay tramos con pérdidas de más del 10 % y con una eficiencia del 62,5 %.

En la Tabla II se muestra el resumen de los resultados obtenidos.

TABLA II
RESUMEN DE INDICADORES DE DESEMPEÑO DEL CONVERTIDOR DAB EN SIMULACIÓN HIL.

Indicador	Valor
Error en estado estacionario	$e_{ss} = 0$
Potencia máxima transferida	≈ 60 kW
Máxima eficiencia	93,75 %
Eficiencia mínima observada	62,5 %
Rango de fase (acción de control)	$[\pi/2,\ 3\pi/2]$

Con los resultados obtenidos en la simulación HIL, se valida el correcto funcionamiento del esquema de control propuesto, demostrando un $e_{ss} = 0$ y una operación bidireccional de potencia eficiente dentro de los rangos de diseño establecidos.

V. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales del sistema obtenidos por medio de la simulación en tiempo real implementada en el OPAL-RT demuestran la bidireccionalidad de potencia entre las microrredes DC interconectadas, permitiéndoles el intercambio de potencia según las necesidades establecidas. Se observa que el control SPS gobierna el nivel de potencia transferida, logrando transiciones suaves y tiempos de establecimiento reducidos ante cambios drásticos en la potencia de flujo. Además, se comprueba que el comportamiento dinámico registrado valida la capacidad de la plataforma para emular escenarios de operación realistas. También fue posible evidenciar las limitaciones de OPAL, por ejemplo, la frecuencia de conmutación utilizada para las señales de control.

Es importante resaltar que la conmutación de las constantes de control que resulta del selector de ganancias, el cual depende de los rangos de operación establecidos, demostró ser una estrategia efectiva para el manejo de la no linealidad característica del DAB; esto logró tener un error de estado estacionario nulo en todos los puntos de operación establecidos.

Por último, como trabajo futuro, se propone la implementación del sistema a nivel de hardware para validar su funcionamiento fuera del entorno de simulación, así como la implementación y comparación con otras técnicas de modulación, como EPS, DPS y TPS, buscando mejorar la eficiencia en los rangos de potencia donde la eficiencia fue menor.

REFERENCIAS

[1] S. Cinik, F. Zhao, G. D. Falco, and X. Wang, "Efficiency and cost optimization of dual active bridge converter for 350kw dc fast chargers," *arXiv preprint arXiv:2404.14557*, 2024.

[2] S. R. Meraz, "Análisis y simulación del convertidor dab dc-dc," Master's thesis, Universidad Politécnica de Sinaloa, 2015.

[3] K. Bathala, D. Kishan, and N. Harischandrappa, "High frequency isolated bidirectional dual active bridge dc-dc converters and its application to distributed energy systems: an overview," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 2023.

[4] X. Li, X. Zhang, F. Lin, C. Sun, and K. Mao, "Artificial-intelligence-based hybrid extended phase shift modulation for the dual active bridge converter with full zvs range and optimal efficiency," *arXiv preprint arXiv:2308.00381*, 2023.

[5] M. N. Tasnim, T. Ahmed, S. Ahmad, and G. Shafiullah, "Infrastructure of interconnected microgrids: A review," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 12, p. 100955, 2025. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671125000622

[6] A. Ordono, E. Unamuno, J. A. Barrena, and J. Paniagua, "Interlinking converters and their contribution to primary regulation: a review," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 111, pp. 44–57, 2019. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061518333477

[7] O. TECHNOLOGIES. Powering real-time simulation. Consultado el 27 de octubre de 2024. [Online]. Available: https://www.opal-rt.com/hardware-in-the-loop/

[8] ——. Powering real-time simulation. Consultado el 27 de octubre de 2024. [Online]. Available: https://www.opal-rt.com/software-rt-lab/#getstarted

[9] H. Ataullah, T. Iqbal, I. U. Khalil, U. Ali, V. Blazek, L. Prokop, and N. Ullah, "Analysis of the dual active bridge-based dc-dc converter topologies, high-frequency transformer, and control techniques," *Energies*, vol. 15, no. 23, 2022. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8944

[10] M. Asim, O. Alshibany, M. Jamil, and Q. Ghazanfar, "Implementation of single-phase shift (sps) and extended phase shift (eps) for dual active bridge (dab)," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 17, no. 41, pp. 4262–4269, 2024. [Online]. Available: https://indjst.org/articles/implementation-of-single-phase-shift-sps-and-extended-phase-shift-eps-for-dual-active-bridge-dab

Fermentation of coffee cherry: impact on drying kinetics

Manuela Sofía Velasco Muñoz
Huila, Surcolombiana University
Faculty of Engineering,
Agroindustrial Engineering Program
Neiva, Colombia
u20211197322@usco.edu.co

Isabel Cristina Polanco Gómez
Huila, Surcolombiana University
Faculty of Engineering,
Agroindustrial Engineering Program
Neiva, Colombia
u20212200319@usco.edu.co

Jaime Daniel Bustos Vanegas
Huila, Surcolombiana University
Faculty of Engineering,
Agroindustrial Engineering Program
Neiva, Colombia
jaime.bustos@usco.edu.co

Jennifer Katiusca Castro
Huila, Surcolombiana University
Faculty of Engineering,
Agroindustrial Engineering Program
Neiva, Colombia
jenniferkatiusca.castro@usco.edu.co

Néstor Enrique Cerquera
Huila, Surcolombiana University
Faculty of Engineering,
Agroindustrial Engineering Program
Neiva, Colombia
cerquera@usco.edu.co

Abstract*—Fermentation is a key stage in coffee postharvest processing, yet its effect on subsequent drying remains insufficiently described from a process engineering perspective. In this work, the influence of fermentation time on the drying kinetics of coffee cherries was evaluated under convective conditions. Four fermentation times (0, 24, 48 and 72 h) were combined with four drying temperatures (40, 50, 60 and 70 °C). Drying curves were expressed in terms of moisture ratio (MR), and a Newton-type model was used to obtain a comparable kinetic parameter (k) across all conditions. As expected, temperature was the main driver of the process. Increasing the drying temperature led to a consistent increase in k and a corresponding reduction in drying time. However, fermentation also introduced systematic changes. At a given temperature, fermented cherries generally exhibited higher k values than non-fermented ones. This effect became more evident at 50–70 °C. For instance, at 70 °C, k increased from 0.1668 h^{-1} (0 h) to 0.2162 h^{-1} after 48 h of fermentation, followed by a slight decrease at 72 h (0.2067 h^{-1}), suggesting the existence of an intermediate condition where mass transfer is favored. Although the Newton model was selected for simplicity rather than optimal fitting, the parameter k proved useful to compare process conditions. Since drying time is inversely proportional to k, the observed increase in k with fermentation time implies a reduction in the characteristic drying time. Under similar operating conditions, this translates into a lower relative energy demand. These results indicate that fermentation, beyond its known impact on coffee quality, can modify the drying stage from an operational standpoint. This opens the possibility of integrating fermentation time as a variable in the design and optimization of drying strategies.

Keywords—Energy efficiency, mathematical modelling, postharvest.

I. Introduction

Coffee is one of the agricultural products of greatest economic and social importance in the world, due to its wide commercialization, its contribution to rural income, and its role in the agro-industrial dynamics of numerous tropical countries [1]. Within this context, Coffea arabica L. holds a prominent place due to its sensory quality and its predominance in differentiated and specialty markets, where post-harvest practices decisively influence the final value of the product [2]. In producing countries like Colombia, strengthening the processing and drying processes is especially relevant, given that the quality of coffee depends not only on agronomic factors but also on the handling applied after harvest [1].

Among the post-harvest operations, drying constitutes a critical stage because it allows for the reduction of the coffee's moisture content to safe levels for storage, preservation, and commercialization [1]. Various studies have indicated that inadequate drying promotes the physical, chemical, and microbiological deterioration of the product, in addition to causing losses in sensory quality and commercial defects [2]. In coffee, the objective of this stage is to reduce the moisture

content of the material from high levels at the time of harvest to ranges that allow for the stability of the grain during storage and subsequent industrial processing [1]. For this reason, understanding the factors that affect the rate of water removal is essential to optimize the process and preserve the final quality of the coffee [1].

Controlled fermentation represents another key factor in coffee post-harvest, as during this process the microorganisms present in the pulp and mucilage transform sugars and other compounds of the fruit, causing physical and chemical changes that can modify the behavior of the product during drying [3]. It has been reported that the duration and conditions of fermentation affect the dynamics of moisture loss, such that longer periods can reduce the total drying time compared to unfermented materials or those subjected to shorter fermentations. Such effects are related to modifications in the fruit's structure, tissue integrity, and internal water mobility, aspects that are crucial in the drying kinetics [4].

From the perspective of food engineering, drying kinetics have been studied using empirical, semi-theoretical, and diffusional mathematical models, which allow for the description of moisture reduction as a function of time and process conditions [4]. These models are widely used because they facilitate the estimation of parameters such as effective diffusivity, drying constants, and the energy associated with moisture transport, information useful for the design, scaling, and optimization of dryers [5]. In agricultural products, and particularly in porous biological materials, mathematical modeling has proven to be a valuable tool for interpreting the simultaneous transfer of heat and mass and for comparing the effect of operational variables such as temperature, air velocity, and physical characteristics of the material [4].

In the case of coffee, various studies have shown that the drying temperature significantly influences the rate of moisture removal and the diffusion coefficients, while models such as Page, Henderson, and Pabis have provided satisfactory fits to describe the drying behavior under different conditions [1]. However, although there is background information on the drying kinetics of parchment coffee and other related materials, specific information on cherry coffee subjected to prior fermentation remains limited, especially in dry processing systems [1]. This knowledge gap is relevant in Colombia, where the need to diversify processes and improve the sector's competitiveness demands technically sound information based on experimental evidence for both small and large producers.

The present research aims to evaluate the influence of cherry coffee fermentation times on the drying kinetics of coffee processed by the dry method and to determine the moisture diffusion coefficients of cherry coffee dried at different temperatures and subjected to different fermentation times. With the aim of providing technical and scientific foundations that contribute to a better understanding of the process and the eventual establishment of standardization criteria for the natural processing of coffee.

II. Methodology

The research was conducted using an experimental design with the purpose of evaluating the effect of natural fermentation on the drying behavior of coffee. The study was conducted with Castillo variety coffee beans, collected from lot No. 3 of the Las Delicias farm, located in the municipality of Santa María, Huila, at an altitude of 1800 meters above sea level. The sampling was carried out following a standard collection procedure, selecting only grains in an optimal state of ripeness, in order to ensure the representativeness of the samples.

Once collected, the samples were disinfected with a quaternary ammonium solution (Timsen) to reduce the risk of contamination during the assay. Subsequently, 2 kg portions were weighed for each fermentation treatment, and three containers were set up to apply fermentations of 24, 48, and 72 hours. To each container, 600 mL of potable water were added, equivalent to 30% of the sample's weight, and it was sealed with a lid equipped with a valve, designed to prevent the ingress of oxygen and allow the escape of carbon dioxide.

For the 0-hour fermentation treatment, 2 kg of coffee were used, from which 100 g sub-samples were taken until completing 12 experimental units. These samples were distributed in ovens at 40, 50, 60, and 70 °C, with three replicas per temperature, and each was coded to facilitate tracking during the process. After 24 hours, the coffee corresponding to the 24-hour treatment was removed and the same drying procedure was applied; the protocol was repeated in the same manner for the 48 and 72-hour treatments.

During the drying process, the samples were weighed every 1 hour and 30 minutes for a total of 70 hours and 30 minutes, equivalent to three days of experimental monitoring. The measurements allowed for the recording of mass loss throughout the process and were entered into an Excel spreadsheet for subsequent organization and analysis. This procedure facilitated the monitoring of the drying kinetics based on the fermentation time and the applied temperature.

In parallel, three 10 g samples were taken to determine the initial moisture content of the coffee at each fermentation time. Each sample was analyzed in triplicate in a drying oven at 105 °C for 24 hours; subsequently, they were weighed again to calculate the initial moisture content. The obtained results were also recorded in the database to ensure the traceability of the experimental information.

Finally, the obtained data were processed to determine the average of the three replicates and thus be able to determine the moisture content based on the moisture ratio (MR) of each sample at each temperature. In this way, to observe how the coffee was drying according to its temperature and fermentation time. Similarly, with that data, mathematical models for thin-layer drying of agricultural products were adjusted using Henderson, Halsey, Oswin, Copace, and Page, employing the least squares method using Excel's Solver tool with the GRG Nonlinear resolution method. All models were evaluated using the coefficient of determination, the mean relative error, and the mean standard error, to determine which model fit best and to analyze the effect of fermentation on the drying kinetics of cherry coffee.

III. Results and Discussion

In the drying curves that represent the moisture content on a dry basis versus time, it was clearly evidenced that the drying

Surcolombiana University, internal call, young researchers, project 4195

process of Castillo variety coffee cherries progressively accelerates with the increase in pre-fermentation time (treatments of 0, 24, 48, and 72 hours). Specifically, the samples fermented for 72 hours reached safe moisture levels in a significantly shorter time compared to the control without fermentation «Fig. 1», both at temperatures of 24°C and 48°C. This trend remained consistent across the three replicates per treatment, confirming the reproducibility of the phenomenon observed during the 70 hours and 30 minutes of experimental monitoring.

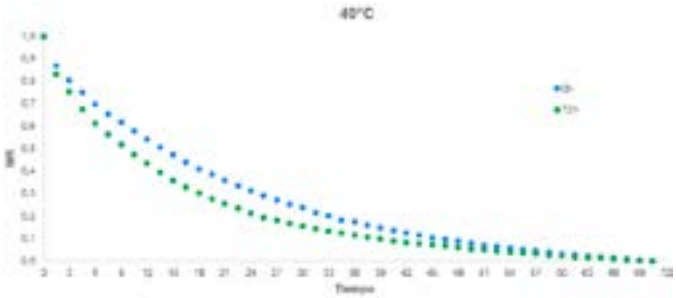


Fig. 1. *Comparison of coffee drying with 0 and 72 hours of fermentation at 40°C.*

The observed phenomenon is explained by the biochemical action of controlled fermentation, during which lactic acid microorganisms and yeasts selectively degrade the pulp and mucilage of coffee cherries, softening the cellular tissues and breaking pectic bonds that retain bound water. This degradation generates a more porous and permeable structure in the exocarp and mesocarp, facilitating the migration of free and bound water to the surface for evaporation, which reduces the resistance to mass and heat transfer. As a result, with a longer fermentation duration, the effective diffusivity of water increases, transitioning from initial phases of constant drying to a more efficient decreasing phase, avoiding typical bottlenecks in intact fruits.

On the other hand, among the evaluated mathematical models, the Halsey model showed the best fit in all combinations of fermentation time and temperature, with determination coefficients (R^2) above 0.98 and the lowest values of mean relative error ($P < 0.02$) and mean standard error ($SE < 0.005$). The equation of the Halsey model is expressed as:

$$MR = -\frac{1}{a}\ln\left(1 - \exp(-bt)\right) \tag{1}$$

where MR is the dimensionless moisture ratio, t is the time, and a, b are adjusted parameters. This empirical model is particularly suitable for hygroscopic agro-industrial products like coffee, as it derives from the BET theory of multilayer sorption, accurately describing how moisture is retained in successive layers beyond the monolayer, capturing both the constant drying phase (surface evaporation) and the falling rate phase (controlled internal diffusion). Its robustness lies in its ability to predict drying rates under variable temperature and moisture load conditions, surpassing linear models like Henderson in porous materials with high capillary retention.

TABLE I. EVALUATION OF MATHEMATICAL MODELS

Modelo	R^2 Promedio	P Promedio	SE Promedio
Halsey	0.999999936	0.010000612	0.002627719
Page	0.973863098	0.025604794	0.009192579
Henderson	0.999624157	0.035928910	0.012571042
Oswin	0.994007874	0.030040056	0.010784412
Copace	0.990768331	0.028057488	0.009858236

The table illustrates Halsey's superiority, especially in prolonged fermentations.

The kinetic curves revealed that, at 40°C, the drying is slower, but the benefit of fermentation is more evident. At 70°C, the initial phase dominates, but fermentation further reduces the final diffusional phase. This temperature-fermentation interaction suggests that moderate conditions (50-60 °C with > 48 hours of fermentation) optimize energy efficiency without the risk of thermal damage to the grain.

IV. CONCLUSIONS

The study shows that prolonged anaerobic fermentation (48-72 hours) structurally modifies the coffee cherry, facilitating a more efficient and uniform drying process, which reduces the risks of microbiological deterioration and optimizes resources on high-altitude farms like those in Huila, Colombia. This interaction with moderate temperatures (50-60 °C) preserves sensory potential for specialty markets thru metabolites generated in the fermentation phase, balancing speed and quality.

It was demonstrated that increasing fermentation times (0, 24, 48, and 72 hours) reduce the total drying time at temperatures of 40-70 °C, an effect attributable to the microbial degradation of the pulp and mucilage, which increases structural permeability and the effective diffusivity of water. The moisture ratio (MR) vs. time curves confirmed this trend reproducibly in three replicates, with shorter constant drying phases and efficient transitions to the diffusional phase in prolonged treatments.

Scientific bases were generated to standardize natural processing, establishing that anaerobic fermentations >48 hours with moderate drying (50-60 °C) minimize exposure times, microbiological risks, and energy costs.

The results show that the Halsey model outperforms the Henderson, Oswin, Copace, and Page models, confirming its applicability to hygroscopic drying kinetics for simulating industrial scales. This temperature-fermentation interaction optimizes the dry route, preserving aromatic precursors and meeting the demands of traceable specialty coffees.

In conclusion, the controlled pre-fermentation of Castillo variety coffee cherries significantly accelerates the drying kinetics in dry processing, with time reductions in 72-hour treatments, thanks to the microbial degradation of the pulp that improves the permeability and diffusivity of water. Mathematical modeling confirms the superiority of the Halsey

model to describe these dynamics under conditions of 40-70 °C, providing a robust predictive tool with high R^2 and minimal errors.

References

[1] Drying Kinetics of Organic Parchment Coffee Beans (Coffea Arabica L.) in a Rotary Dryer: http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v20n39/1692-3324-rium-20-39-167.pdf

[2] Processing and Drying of Coffee – A Review: https://library.sweetmarias.com/wp-content/uploads/2020/08/Processing-and-Drying-of-Coffee-%E2%80%93-A-Review.pdf

[3] Influence of Drying Methods on the Post-Harvest Quality of Coffee: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12071231/

[4] Exploratory evaluation of dry fermentation of specialty coffee from Coffea arabica: https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/2163

[5] A Comprehensive Review of Mathematical Modeling for Drying Agricultural Products: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35910694/

[6] Mathematical modeling of drying on ready-to-eat food using oven drying: https://pubs.aip.org/aip/acp/article/3056/1/050004/3342658/Mathematical-modeling-of-drying-on-ready-to-eat

[7] Cenicafé, (agosto de 2012). Cenicafe.org. factores, procesos y controles en la fermentación Recuperado de https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/327/1/avt0422.pdf

Modelo matemático del crecimiento de la fresa como componente de un Gemelo Digital agrícola

Samuel José Barragán Latorre
Facultad de Sistemas
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
sjbarraganl@itc.edu.co

Kelly Johanna Prieto Pérez
Facultad de Sistemas
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
kjprietop@itc.edu.co

Danna Lizeth Herrera Rincón
Facultad de Sistemas
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
dlherrerar@itc.edu.co

***Abstract*— La limitada adopción de modelos computacionales predictivos en la gestión del cultivo de fresa impide anticipar condiciones adversas de forma oportuna, provocando pérdidas que superan el 25% de producción. En este contexto, se plantea un modelo matemático representativo del crecimiento y desarrollo de la Fragaria como unidad mínima de simulación para su aplicación en un Gemelo Digital, adaptable a múltiples entornos de cultivo con condiciones andinas colombianas inicialmente. En este contexto, se plantea un modelo matemático del crecimiento y maduración de la Fragaria × ananassa que representa el fruto como una malla de parches tisulares interdependientes, cada uno gobernado por un sistema acoplado de ecuaciones diferenciales parciales hormonales (AIA, CK, GA y ABA con geometrías de gradiente diferenciadas) y ecuaciones diferenciales ordinarias de metabolismo de carbono y calidad, organizadas en cuatro etapas fenológicas con transiciones controladas por un selector de estado discreto. Los coeficientes metabólicos no son constantes sino funciones deterministas del estado hormonal local, lo que establece una causalidad trazable entre señalización y composición del fruto, con validación arquitectónica preliminar que confirma estabilidad del solver y conservación de masa.**

Keywords*— *Gemelo digital, Fragaria, modelo bioquímico, agricultura de precisión

I. Introducción

La fresa (Fragaria) es uno de los cultivos de mayor valor comercial en la zona andina colombiana, con producción concentrada en la Sabana de Bogotá y en departamentos como Cundinamarca y Boyacá. Sin embargo, las pérdidas poscosecha oscilan entre el 25% y el 40% del potencial productivo [6], consecuencia de un manejo predominantemente reactivo que interviene cuando el daño ya es visible y de la ausencia de herramientas capaces de anticipar el comportamiento del cultivo.

La Agricultura 4.0 ofrece un marco tecnológico para cerrar esta brecha mediante la integración de modelos computacionales, sensórica y análisis de datos en tiempo real. En este contexto, los Gemelos Digitales han emergido como una de las tecnologías más prometedoras, al permitir la representación dinámica de un objeto físico mediante modelos matemáticos capaces de simular escenarios y anticipar condiciones adversas antes de que ocurran. Se identifican los gemelos digitales agrícolas como una frontera activa de investigación, con aplicaciones documentadas en cultivos de tomate, trigo y vid; sin embargo, existe escasa representación en frutales de clima andino tropical [1]. De manera paralela, la modelación bioquímica de frutos ha presentado avances significativos: modelos de partición fuente-sumidero para tomate [2] y modelos de acumulación de azúcares en uva [3] constituyen precedentes metodológicos relevantes, pero ninguno está calibrado para fresa bajo condiciones de alta montaña ecuatorial.

En respuesta a esta doble brecha —geográfica y biológica— el presente trabajo desarrolla el modelamiento matemático aplicado al

Gemelo Digital del fruto de la fresa como unidad mínima de simulación, mediante una arquitectura modular que integra procesos bioquímicos, señalización hormonal y dinámica morfológica en un solver híbrido adaptable a múltiples entornos de cultivo.

II. Planteamiento del problema

Anticipar el comportamiento del fruto durante su desarrollo requiere modelos que representen los procesos que lo gobiernan, no solo sus síntomas observables. Sin embargo, el modelado computacional del fruto de la fresa enfrenta tres brechas no resueltas en la literatura existente: (1) los modelos disponibles tratan el fruto como un compartimento homogéneo, ignorando que el receptáculo y los aquenios son estructuras con metabolismos distintos acoplados por señalización hormonal, (2) la dinámica de maduración se representa mediante estados fenológicos discretos, cuando en realidad es un proceso continuo gobernado por gradientes hormonales y acumulación térmica, y (3) ningún modelo existente integra la distribución espacial de auxinas como mecanismo generador de la forma del fruto, desvinculando la geometría del proceso biológico que la produce.

Estas brechas limitan la capacidad predictiva de los modelos actuales: un sistema que no representa los procesos causales no puede anticipar el momento óptimo de intervención ni diagnosticar la causa de pérdidas con trazabilidad hacia variables biológicas concretas.

¿Es posible construir un modelo computacional del fruto de la fresa que represente sus procesos bioquímicos, morfológicos y hormonales con suficiente fidelidad biológica para anticipar condiciones adversas y diagnosticar causas de pérdida bajo condiciones andinas colombianas?

Con el fin de responder a la pregunta de investigación planteada, el presente trabajo propone el diseño de un modelo matemático que represente el crecimiento y desarrollo del fruto de la fresa como unidad mínima de simulación para su aplicación en el Gemelo Digital. Para ello, se identifican e incorporan los aspectos cuantitativos y cualitativos que estructuran el modelo base del fruto, formulando una arquitectura modular que integra procesos bioquímicos, señalización hormonal y dinámica morfológica en un solver híbrido adaptable a múltiples entornos de cultivo.

III. Marco teorico

A. *El fruto de fresa como sistema biológico estratificado*

Lo que comercialmente se conoce como fresa es un receptáculo floral hipertrofiado sobre cuya superficie se encuentran los frutos verdaderos (los aquenios). Ambas estructuras poseen metabolismos distintos y se influyen recíprocamente: los aquenios producen fitohormonas que dirigen la expansión del tejido adyacente [7][12], mientras el receptáculo acumula los recursos que determinan la calidad del fruto a partir de fotoasimilados importados del floema [2]. Un aquenio no fecundado interrumpe esta señalización, generando deformidades, por lo que, la forma final de la fresa es el resultado espacial de este proceso hormonal.

El receptáculo se organiza en zonas tisulares con funciones diferenciadas: la zona periférica (epidermis y subepidermis), responsable de coloración y protección; el córtex, principal reservorio de azúcares y ácidos orgánicos; la médula central, que provee soporte estructural; y los haces vasculares, infraestructura de transporte de fotoasimilados y señales hormonales. Esta diferenciación implica que cada región puede exhibir simultáneamente comportamientos metabólicos y hormonales distintos, una realidad que los modelos de compartimento único no pueden representar.
El desarrollo atraviesa cuatro etapas fenológicas [8]: cuajado (días 1–7), dominado por división celular; crecimiento verde (días 8–21), caracterizado por expansión celular y acumulación de masa; estadio blanco (días 22–25), transición del crecimiento hacia la maduración; y maduración (días 26–40), donde se acumulan azúcares simples, antocianinas y compuestos volátiles mientras se degradan las pectinas que determinan la textura.

B. *Señalización hormonal como mecanismo de control*

El desarrollo del fruto está gobernado por seis fitohormonas cuya dominancia varía según la zona y la etapa. Las citoquininas promueven la división celular durante el cuajado, difundiéndose radialmente desde los haces vasculares [14]. Las giberelinas orientan el crecimiento longitudinal base→punta durante las cuatro etapas con intensidad variable [15]. La auxina, producida por los aquenios, genera un gradiente centrípeto mediante transporte polar por proteínas PIN que controla la expansión radial en el crecimiento verde [7][14]. Su relación con los aquenios convierte al campo de auxina en el vínculo causal entre la biología del aquenio y la geometría observable del fruto.
El ácido abscísico (ABA) es la hormona central de la maduración no climatérica [8][17]. Presente en trazas en la médula desde el cuajado, asciende cuando la auxina declina en el estadio blanco, activando la inversión de azúcares, la degradación de pectinas y la síntesis de antocianinas [17][18]. La transición no es instantánea, el remanente de auxina debe disiparse antes de que el ABA alcance dominancia, un comportamiento cinético análogo al amortiguamiento mecánico.

El etileno y los jasmonatos actúan en la zona periférica durante la maduración: el etileno activa compuestos volátiles de aroma [9], los jasmonatos encienden la vía FaMYB10 de síntesis de antocianinas con comportamiento de umbral consistente con la dimerización de receptores FcPYL4 [16][17]. Ambos se distribuyen rápidamente en el tejido, lo que hace innecesaria su resolución espacial.

C. *Metabolismo y calidad del fruto*

La sacarosa del floema se importa al receptáculo mediante transportadores cuya actividad depende de la demanda hormonal local [2][3]. Dentro de la célula se hidroliza en glucosa y fructosa por invertasas activadas por el ABA, lo que explica el aumento de dulzor en la maduración. Parte de la glucosa se incorpora al ciclo de Krebs como precursora de ácidos cítrico y málico, que acumulan en el crecimiento verde y declinan cuando el ABA activa sus enzimas catabólicas [18]. Las pectinas se degradan por poligalacturonasa y pectinametilesterasa activadas por ABA y etileno, con síntesis parcialmente sostenida por giberelinas residuales vía FaGAST [15]. El agua entra impulsada por la diferencia de potencial hídrico; al acumularse azúcares, el potencial osmótico disminuye y la entrada de agua aumenta, acoplando metabolismo de carbono con hidráulica del tejido [2].

D. *Gemelos Digitales en agricultura de precisión*

Un Gemelo Digital es una representación computacional dinámica de un sistema físico que se actualiza con datos de sensores para anticipar escenarios futuros [1]. En agricultura, modelos como el fruto virtual de Génard et al. [2] para tomate y el de Dai et al. [3] para uva constituyen precedentes en la simulación de procesos fisiológicos del fruto.
Estos antecedentes presentan una doble brecha. Biológica: tratan el fruto como compartimento homogéneo sin diferenciar el comportamiento simultáneo de distintas regiones internas. Geográfica: ninguno está calibrado para alta montaña ecuatorial, donde la radiación UV, la amplitud térmica diurna de hasta 20°C y la variabilidad de humedad afectan directamente las tasas enzimáticas y el balance hídrico del fruto [4].

E. *Fundamentos matemáticos*

La distribución hormonal en el tejido se rige por la ecuación de advección-difusión-reacción, derivada de la conservación de

masa de Euler (1757) y la ley de difusión de Fick (1855). La difusión suaviza gradientes de concentración; la advección captura el transporte polar activo de la auxina; las fuentes puntuales (delta de Dirac) representan la síntesis localizada en aquenios [19]. Las condiciones de frontera (Neumann en la superficie (impermeabilidad cuticular) y Dirichlet en el pedúnculo (concentración prescrita)) traducen restricciones físicas en restricciones matemáticas.
Los procesos metabólicos siguen cinética de Michaelis-Menten (1913) con saturación enzimática, generalizada mediante funciones de Hill (1910) para capturar respuestas cooperativas con umbral. El crecimiento celular sigue la ecuación de Lockhart (1965), que distingue deformación elástica reversible de extensión plástica irreversible de la pared celular. La corrección de Arrhenius (1889) traduce temperatura ambiental en variaciones de tasas enzimáticas, particularmente relevante para condiciones andinas donde 10°C de diferencia diurna pueden duplicar la respiración del fruto.

IV. Modelo Matemático

A. *Módulo 1: Señalización Hormonal Espacial*

El desarrollo del fruto de fresa está dirigido por cuatro hormonas vegetales cuya distribución dentro del tejido no es uniforme: cada una forma un gradiente espacial propio que determina qué ocurre en cada zona del fruto y en qué momento. Para capturar este comportamiento, cada hormona se modela mediante una ecuación diferencial parcial que describe cómo su concentración cambia en el tiempo y en el espacio, considerando tres procesos simultáneos: el movimiento de la hormona a través del tejido, su degradación enzimática y su producción en sitios específicos del fruto.

1) *Auxina (AIA)*

La auxina es la hormona dominante durante el crecimiento activo del fruto. Se produce en los aquenios las semillas externas de la fresay se transporta hacia el interior del fruto mediante proteínas especializadas, generando un gradiente que va desde la supercie hacia el centro. Este transporte activo dirigido es lo que distingue a la auxina de las demás hormonas del sistema y lo que produce el patrón de crecimiento radial característico del receptáculo. La concentración de auxina en el dominio espacial del fruto Ω evoluciona según (7). El primer término describe la difusión pasiva de la hormona. El segundo describe el transporte activo dirigido hacia el centro del fruto mediante proteínas PIN, donde v_PIN es una velocidad escalar constante por zona tisular (una simplificación de lo que en el tejido real es un campo vectorial dependiente de la concentración local, cuya formulación completa se deja como mejora futura). El tercer término representa la degradación enzimática proporcional a la concentración presente. El cuarto término introduce la síntesis localizada en cada aquenio i, con tasa Si en la posición fija x_i.

La condición de frontera en la superficie exterior del fruto es de fujo neto cero (la auxina no abandona el fruto), descrita en (8).

La condición inicial al comienzo del cuajado refleja que la auxina está presente solo en la subepidermis a un 10-15 % de su concentración máxima, visto en (9)

TABLA IX: ECUACIÓN AUXINA (AIA).

Expresión	Ec.
$\frac{\partial[\mathrm{AIA}]}{\partial t} = D_{\mathrm{AIA}}\,\nabla^2[\mathrm{AIA}] - v_{\mathrm{PIN}}\,\nabla[\mathrm{AIA}] - k_{\deg,\mathrm{AIA}}\,[\mathrm{AIA}] + \sum_i S_i\,\delta(\mathbf{x}-\mathbf{x}_i)$	(7)
$\left(D_{\mathrm{AIA}}\,\nabla[\mathrm{AIA}] - v_{\mathrm{PIN}}\,[\mathrm{AIA}]\right)\cdot\hat{n} = 0, \qquad \text{en } \partial\Omega$	(8)
$[\mathrm{AIA}](\mathbf{x},0) = [\mathrm{AIA}]_{\mathrm{sub}}\cdot\varphi(\mathbf{x})$	(9)

TABLA I: VARIABLES DE AUXINA (AIA).

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango estimado
$[\mathrm{AIA}]$	Concentración de auxina	μM	0.01 – 2.5
D_{AIA}	Coeficiente de difusión pasiva	$\mathrm{mm^2\cdot h^{-1}}$	0.001 – 0.01
v_{PIN}	Velocidad de transporte polar (escalar por zona)	$\mathrm{mm\cdot h^{-1}}$	0.01 – 0.1
$k_{\deg,\mathrm{AIA}}$	Tasa de degradación enzimática	$\mathrm{h^{-1}}$	0.02 – 0.15
S_i	Tasa de síntesis en el aquenio i	$\mu\mathrm{M\cdot h^{-1}}$	0.001 – 0.05
$\mathbf{x}_i$	Posición del aquenio i (fija post-cuajado)	mm	geometría E1
$[\mathrm{AIA}]_{\mathrm{sub}}$	Concentración inicial en subepidermis	μM	0.001 – 0.01
$\hat{n}$	Vector normal exterior a $\partial\Omega$	—	—

2) *Citoquinina (CK)*

La citoquinina actúa exclusivamente durante el cuajado (los primeros siete días) y es la señal que guía la generación de la malla de parches. A diferencia de la auxina, no tiene transporte polar: se mueve por difusión libre desde los haces vasculares hacia la pulpa, generando un gradiente radial suave desde el interior hacia el exterior del tejido. Su síntesis ocurre a lo largo de los haces vasculares, no en puntos discretos como los aquenios, proceso descrito en (10). El tercer término introduce la fuente vascular distribuida: SCK es la tasa de síntesis dentro de los haces vasculares, χ_vasc(x) es la función que vale 1 dentro de los haces y 0 en el resto del tejido, y f_E1(t) es el modulador temporal que apaga la síntesis al salir del cuajado, descrito en (11). La caída exponencial post-cuajado refleja el apagado gradual de la citoquinina. No hay corte abrupto: la hormona se disipa en 24 a 72 horas, de la misma forma en que ocurre en el tejido real.

Las condiciones de frontera son de flujo neto cero en toda la superficie exterior, más una entrada de citoquinina desde la planta madre a través del pedúnculo durante el cuajado, descritas en (12) y (13).

La condición inicial concentra la citoquinina en los haces vasculares con trazas en el resto del tejido, descrito en (14).

TABLA XI: ECUACIÓN CITOQUININA (CK).

Expresión	Ec.
$\frac{\partial [CK]}{\partial t} = D_{CK}\nabla^2[CK] - k_{deg,CK}[CK] + S_{CK}\chi_{vasc}(\mathbf{x})f_{E1}(t)$	(10)
$f_{E1}(t) = \begin{cases} 1, & t \le 168\,h \\ \exp(-\lambda_{CK}(t-168)), & t > 168\,h \end{cases}$	(11)
$\nabla[CK]\cdot\hat{n} = 0, \quad$ en $\partial\Omega \setminus \partial\Omega_{base}$	(12)
$[CK](\mathbf{x}_{base}, t) = [CK]_{xilema}(t), \quad$ en $\partial\Omega_{base}, \ t \le 168\,h$	(13)
$[CK](\mathbf{x}, 0) = [CK]_0\,\chi_{vasc}(\mathbf{x}) + \varepsilon$	(14)

TABLA II: VARIABLES DE CITOQUININA (CK).

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango estimado
$[CK]$	Concentración de citoquinina	μM	0.05 – 1.8
D_{CK}	Coeficiente de difusión libre	$mm^2\,h^{-1}$	0.01 – 0.05
$k_{deg,CK}$	Tasa de degradación por citoquinina oxidasa	h^{-1}	0.03 – 0.12
S_{CK}	Tasa de síntesis en haces vasculares	$\mu M\,h^{-1}$	0.01 – 0.08
χ_{vasc}	Función característica del subdominio vascular	{0,1}	—
$f_{E1}(t)$	Modulador temporal de síntesis	adim.	0 – 1
λ_{CK}	Tasa de decaimiento post-cuajado	h^{-1}	0.05 – 0.2
$[CK]_{xilema}$	Concentración en savia del xilema (prescrita)	μM	0.1 – 0.5
$[CK]_0$	Concentración inicial en haces vasculares	μM	0.05 – 0.2
ε	Concentración basal en tejido no vascular	μM	0.001 – 0.005

3) Giberelina (GA)

La giberelina es la única hormona activa durante las cuatro etapas del desarrollo. Su gradiente es longitudinal descrito en (15) (va desde la base hacia la punta del fruto) y es la señal responsable de la elongación del eje del receptáculo. Se transporta por difusión libre, pero con mayor facilidad en la dirección longitudinal que en la radial; en esta versión del modelo, dicha anisotropía se implementa mediante condiciones de frontera asimétricas en lugar de un tensor de difusión completo, cuya formulación se deja como mejora futura.

La fuente de giberelina se localiza en los aquenios, al igual que la auxina, pero con un coeficiente de difusión mayor que permite que la hormona se aleje más de su sitio de síntesis antes de degradarse. x_aq(x) es la función característica del subdominio de aquenios y g_E(t) es el modulador de síntesis por etapa, cuyos valores se recogen en la tabla XVII.

El gradiente longitudinal se impone mediante condiciones de frontera asimétricas. En la base del fruto se prescribe una concentración proporcional a la etapa activa; en el ápice y en la superficie lateral se impone flujo neto cero, descrito en (16), (17) y (18).

La condición inicial es un perfil lineal decreciente desde la base hacia la punta, visto en (19) y en la figura I. donde z es la coordenada longitudinal y L es la longitud inicial del fruto.

TABLA III: ECUACIÓN GIBERELINA (GA).

Etapa	Días	$g_E(t)$
E1 — Cuajado	1 – 7	0.3
E2 — Crecimiento verde	8 – 21	1.0
E3 — Blanco	22 – 25	0.6
E4 — Maduración	26 – 40	0.4

TABLA IV: ECUACIÓN GIBERELINA (GA).

Expresión	Ec.
$\frac{\partial [GA]}{\partial t} = D_{GA}\nabla^2[GA] - k_{deg,GA}[GA] + S_{aq,GA}\chi_{aq}(\mathbf{x})g_E(t)$	(15)
$[GA](\mathbf{x}_{base}, t) = [GA]_{base}\,g_E(t), \quad$ en $\partial\Omega_{base}$	(16)
$\frac{\partial [GA]}{\partial z} = 0, \quad$ en $\partial\Omega_{ápice}$	(17)
$\nabla[GA]\cdot\hat{n} = 0, \quad$ en $\partial\Omega_{lateral}$	(18)
$[GA](\mathbf{x}, 0) = [GA]_{base,0}\left(1 - \frac{z}{L}\right) + \varepsilon$	(19)

TABLA V: VARIABLES DE GIBERELINA (GA).

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango estimado
$[GA]$	Concentración de giberelina	μM	0.02 – 1.2
D_{GA}	Coeficiente de difusión libre	$mm^2\,h^{-1}$	0.005 – 0.05
$k_{deg,GA}$	Tasa de degradación por GA 2-oxidasas	h^{-1}	0.01 – 0.08
$S_{aq,GA}$	Tasa de síntesis en aquenios	$\mu M\,h^{-1}$	0.005 – 0.04
χ_{aq}	Función característica del subdominio de aquenios	{0,1}	—
$g_E(t)$	Modulador de síntesis por etapa	adim.	0.3 – 1.0
$[GA]_{base}$	Concentración prescrita en la base por etapa	μM	0.1 – 1.0
$[GA]_{base,0}$	Concentración inicial en la base	μM	0.05 – 0.3
z	Coordenada longitudinal base–punta	mm	0 – L
L	Longitud inicial del fruto	mm	10 – 15

4) Ácido Abscísico (ABA)

El ácido abscísico es la hormona central de la maduración. Está presente en trazas durante el cuajado y el crecimiento verde, pero asciende rápidamente al inicio del estadio blanco y alcanza su máximo durante la maduración. Su formulación descrita en (20) incluye un término de inhibición cruzada por auxina: durante las dos primeras etapas, la auxina suprime activamente al ácido abscísico en la epidermis y subepidermis, confinándolo a la médula. Cuando la auxina declina en el estadio blanco, esa supresión desaparece y el ácido abscísico coloniza el tejido periférico, desencadenando los procesos de maduración. El

cuarto término es el de inhibición cruzada por auxina. kinh es la constante de inhibición, ψ_zona(x) pondera la intensidad de la inhibición por zona tisular, y θ_E(t) es el modulador binario que apaga completamente la inhibición al entrar en el estadio blanco, descritos en (21) y (22).

El modulador de síntesis h_E(t) controla la producción de ácido abscísico por etapa, conforme a la Tabla XVI.

TABLA VI: ÁCIDO ABSCÍSICO (ABA).

Etapa	Días	$h_E(t)$
E1 — Cuajado	1 – 7	0.10
E2 — Crecimiento verde	8 – 21	0.15
E3 — Blanco	22 – 25	0.60
E4 — Maduración	26 – 40	1.00

Las condiciones de frontera son de flujo neto cero en la superficie exterior, más entrada desde el pedúnculo proporcional a la etapa activa, descritas en (23) y (24). La condición inicial concentra el ácido abscísico en la médula con trazas en el resto del tejido, descrito en (25).

TABLA VII: ÁCIDO ABSCÍSICO (ABA).

Expresión	Ec.
$\frac{\partial [\mathrm{ABA}]}{\partial t} = D_{\mathrm{ABA}} \nabla^2 [\mathrm{ABA}] - k_{\mathrm{deg,ABA}} [\mathrm{ABA}] + S_{\mathrm{ABA}}(\mathbf{x}) h_E(t) - k_{\mathrm{inh}} [\mathrm{AIA}](\mathbf{x},t) \psi_{\mathrm{zona}}(\mathbf{x}) \theta_E(t) [\mathrm{ABA}]$	(20)
$\psi_{\mathrm{zona}}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \mathbf{x} \in \text{subepidermis o epidermis} \\ 0.3, & \mathbf{x} \in \text{córtex} \\ 0, & \mathbf{x} \in \text{médula o haces vasculares} \end{cases}$	(21)
$\theta_E(t) = \begin{cases} 1, & t \le 504\,\mathrm{h} \quad (\text{E1 y E2}) \\ 0, & t > 504\,\mathrm{h} \quad (\text{E3 y E4}) \end{cases}$	(22)
$\nabla [\mathrm{ABA}] \cdot \hat{\mathbf{n}} = 0, \qquad \text{en } \partial\Omega \setminus \partial\Omega_{\mathrm{base}}$	(23)
$[\mathrm{ABA}](\mathbf{x}_{\mathrm{base}}, t) = [\mathrm{ABA}]_{\mathrm{pedúnculo}} h_E(t), \qquad \text{en } \partial\Omega_{\mathrm{base}}$	(24)
$[\mathrm{ABA}](\mathbf{x},0) = [\mathrm{ABA}]_0 \chi_{\mathrm{médula}}(\mathbf{x}) + \varepsilon$	(25)

TABLA XVIII: VARIABLES DE ÁCIDO ABSCÍSICO (ABA).

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango estimado
$[\mathrm{ABA}]$	Concentración de ácido abscísico	μM	0.0 – 3.0
D_{ABA}	Coeficiente de difusión pasiva	$\mathrm{mm^2 \cdot h^{-1}}$	0.005 – 0.04
$k_{\mathrm{deg,ABA}}$	Tasa de catabolismo enzimático agregado	$\mathrm{h^{-1}}$	0.02 – 0.10
$S_{\mathrm{ABA}}(\mathbf{x})$	Densidad de fuente espacial (pedúnculo y médula)	$\mu\mathrm{M \cdot h^{-1}}$	0.005 – 0.06
$h_E(t)$	Modulador de síntesis por etapa	adim.	0.1 – 1.0
k_{inh}	Constante de inhibición AIA → ABA	$\mu\mathrm{M^{-1} \cdot h^{-1}}$	0.05 – 0.3
ψ_{zona}	Función de selectividad espacial de inhibición	adim.	0 – 1
$\theta_E(t)$	Modulador binario de inhibición por etapa	{0,1}	—
$[\mathrm{ABA}]_{\mathrm{pedúnculo}}$	Concentración de entrada en pedúnculo	μM	0.01 – 0.1
$[\mathrm{ABA}]_0$	Concentración inicial en médula	μM	0.005 – 0.02
$\chi_{\mathrm{médula}}$	Función característica de la zona medular	{0,1}	—

FIGURA I: GEOMETRÍA GRADIENTES HORMONALES PRINCIPALES.



B. Módulo 2: Señalización Hormonal Temporal

El etileno y los jasmonatos son señales que aparecen únicamente durante la maduración y actúan principalmente en la zona periférica del fruto. A diferencia de las cuatro hormonas del Módulo 1, no requieren resolución espacial: el etileno es un gas que se equilibra en el tejido en minutos (escala mucho menor que el paso de integración de una hora) y los jasmonatos actúan en el mismo compartimento donde se sintetizan. En ambos casos es suficiente seguir la evolución de su concentración en el tiempo mediante ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas entre sí y con el estado hormonal del Módulo 1.

1) Etileno

En la fresa, a diferencia de las frutas climatéricas, el etileno no se autorregula: su producción depende de señales externas, principalmente del ácido abscísico como inductor principal y de los jasmonatos como co-inductores. El modelo captura esta dependencia mediante una función de inducción que combina ambas señales, junto con un término de pérdida por

volatilización que no existe en las hormonas no gaseosas. La concentración de etileno evoluciona según (26).

El primer término es la síntesis inducida, el segundo la degradación enzimática y el tercero la pérdida por volatilización a través de la cutícula, cuya permeabilidad aumenta durante la maduración. La función de inducción tiene la forma descrita en (27). El primer factor es una función de saturación sobre el ácido abscísico (la inducción crece con [ABA] pero se satura al alcanzar K_ABA,ET). El segundo factor amplifica esa inducción cuando los jasmonatos están presentes: cuando [JA] ≈ 0 el factor vale 1 y solo el ácido abscísico induce; cuando [JA] es alto la amplificación puede alcanzar 1 + βJA.

La ecuación se activa en t = 624 h (inicio de E4, día 26). Antes de ese momento el selector de etapa mantiene SET = 0 y la ODE no se integra. La condición inicial al comienzo de E4 se describe en (28), con ε suficientemente pequeño para evitar singularidades en f_ET.

TABLA XVIII: ETILENO.

Expresión	Ec.
$\frac{d[ET]}{dt} = S_{ET} \cdot f_{ET}([ABA],[JA]) - k_{deg,ET}\,[ET] - k_{vol}\,[ET]$	(26)
$f_{ET}([ABA],[JA]) = \frac{[ABA]}{K_{ABA,ET} + [ABA]} \cdot \left(1 + \beta_{JA}\frac{[JA]}{K_{JA,ET} + [JA]}\right)$	(27)
$[ET](624\,h) = \varepsilon$	(28)

TABLA IX: VARIABLES DE ETILENO.

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango estimado
[ET]	Concentración de etileno	nL·L^{-1}	0.0 – 0.8
S_{ET}	Tasa máxima de síntesis	nL·L^{-1}·h^{-1}	0.01 – 0.05
$k_{deg,ET}$	Tasa de degradación enzimática	h^{-1}	0.05 – 0.2
k_{vol}	Tasa de volatilización cuticular	h^{-1}	0.1 – 0.5
$K_{ABA,ET}$	Constante de semisaturación ABA → ET	µM	0.5 – 1.5
$K_{JA,ET}$	Constante de semisaturación JA → ET	µM	0.1 – 0.8
β_{JA}	Factor de amplificación de jasmonatos	adim.	0.5 – 2.0
ε	Concentración inicial en E4	nL·L^{-1}	≪ 0.01

2) Jasmonatos

Los jasmonatos se sintetizan en la zona periférica del fruto, proceso descrito en (29), en respuesta al ácido abscísico y activan la vía FaMYB10, responsable de la producción de antocianinas y por tanto del color rojo característico de la fresa madura. Su función de inducción tiene orden cuadrático sobre el ácido abscísico, lo que introduce un umbral más pronunciado que el del etileno: la síntesis es prácticamente nula por debajo del umbral y satura rápidamente por encima, produciendo una respuesta de tipo interruptor consistente con la coloración observada. Se puede observar en (30) la función de inducción de orden 2 sobre el ácido abscísico.

El factor Φ_daño(t) amplifica la síntesis ante condiciones de estrés mecánico o hídrico. En el modelo base para maduración normal su valor se ve reflejado en (31).

Si el modelo se extiende para simular variabilidad en condiciones de cosecha, Φdaño > 1 convierte a los jasmonatos en el puente entre estrés mecánico y acumulación acelerada de antocianinas. Al igual que el etileno, la ecuación se activa en t = 624 h con condición inicial descrita en (32).

TABLA X: JASMONATO.

Expresión	Ec.
$\frac{d[JA]}{dt} = S_{JA} \cdot f_{JA}([ABA]) \cdot \Phi_{daño}(t) - k_{deg,JA}\,[JA]$	(29)
$f_{JA}([ABA]) = \frac{[ABA]^2}{K_{ABA,JA}^2 + [ABA]^2}$	(30)
$\Phi_{daño}(t) = 1, \quad \forall t$	(31)
$[JA](624\,h) = \varepsilon$	(32)

TABLA XI: VARIABLES DE JASMONATO.

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango estimado
[JA]	Concentración de jasmonatos (JA + JA-Ile)	µM	0.0 – 0.5
S_{JA}	Tasa máxima de síntesis	µM·h^{-1}	0.005 – 0.03
$k_{deg,JA}$	Tasa de degradación enzimática	h^{-1}	0.08 – 0.25
$K_{ABA,JA}$	Constante de semisaturación ABA → JA	µM	1.0 – 2.5
$\Phi_{daño}$	Factor de amplificación por estrés	adim.	1.0 (base)
ε	Concentración inicial en E4	µM	≪ 0.001

3) Sistema acoplado ET-JA

Las dos ODEs forman un subsistema acoplado con amplificación positiva indirecta. El ácido abscísico, cuyo valor proviene de la EDP del Módulo 1 evaluada en la zona periférica, actúa como señal de entrada común a ambas ecuaciones. El mecanismo de amplificación opera en cascada, proceso descrito en (33).

En forma matricial compacta, el subsistema que el solver integra desde t = 624 h, observable en (34).

No existe retroalimentación directa ET→JA en el modelo actual, lo que garantiza estabilidad del punto fijo ante perturbaciones pequeñas. La concentración de ácido abscísico entra como parámetro externo actualizado en cada paso temporal a partir de la solución de la ecuación (20) del Módulo 1.

TABLA XII: SISTEMA ACOPLADO ET-JA.

Expresión	Ec.
$[\mathrm{ABA}]\uparrow \xrightarrow{f_{\mathrm{JA}}} [\mathrm{JA}]\uparrow \xrightarrow{\beta_{\mathrm{JA}}} f_{\mathrm{ET}}\uparrow \longrightarrow [\mathrm{ET}]\uparrow$	(33)
$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}[\mathrm{ET}]\\[\mathrm{JA}]\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{\mathrm{ET}}\cdot f_{\mathrm{ET}}([\mathrm{ABA}],[\mathrm{JA}]) - (k_{\deg,\mathrm{ET}}+k_{\mathrm{vol}})[\mathrm{ET}] \\ S_{\mathrm{JA}}\cdot f_{\mathrm{JA}}([\mathrm{ABA}])\cdot\Phi_{\mathrm{daño}} - k_{\deg,\mathrm{JA}}[\mathrm{JA}] \end{pmatrix}$	(34)
$\Phi_{\mathrm{daño}}(t) = 1, \qquad \forall\, t$	(35)
$[\mathrm{JA}](624\,\mathrm{h}) = \varepsilon$	(36)

TABLA XIII: VARIABLES DEL SISTEMA ACOPLADO ET-JA.

Variable	Etapas activas	Zona de acción	Rango E4	Acoplamientos de salida
[ET]	Solo E4	Periférica	0.2–0.8 ppm	Pectinasas periféricas; precursor de volátiles de aroma
[JA]	Solo E4	Periférica	0.1–0.5 μM	Activación FaMYB10 → antocianinas; co-activador de pectinasas

C. *Módulo 3 — Acoplamiento Hormona–Coeficiente*

Los Módulos 1 y 2 producen en cada paso temporal un mapa hormonal completo del fruto. El Módulo 3 traduce ese mapa en los coeficientes que gobiernan las ecuaciones metabólicas del Módulo 4. No contiene ecuaciones diferenciales propias: opera sincrónicamente en cada paso mediante funciones de modulación que convierten concentraciones hormonales en velocidades de proceso. Esta capa de traducción hace que cada coeficiente metabólico tenga una causa hormonal identificable y trazable, lo que facilita tanto la interpretación biológica del modelo como su calibración posterior.

1) *Formas canónicas de modulación*

Todas las funciones de modulación del módulo siguen una de tres formas según el tipo de efecto biológico. Cada coeficiente metabólico se expresa como el producto de su valor base por uno o más factores de modulación, descritos en (37).

a) *Forma A — Activación saturante (Hill orden 1)*

La hormona activa el proceso de forma gradual. A concentración cero el efecto es nulo; a concentración alta satura en 1. Descrita en (38).

b) *Forma B — Activación con umbral (Hill orden n)*

Introduce un umbral pronunciado: la respuesta es casi nula por debajo de K y satura rápidamente por encima. Se usa n = 2 salvo indicación contraria. Descrita en (39).

c) *Forma C — Inhibición saturante*

Forma complementaria de la Forma A. A concentración cero la inhibición es nula (factor = 1); a concentración alta colapsa a 0. Por construcción, todos los factores están acotados en el intervalo [0, 1], lo que garantiza que ningún coeficiente supere su valor base ni tome valores negativos. Descrito en (40).

TABLA XIV: SISTEMA ACOPLADO ET-JA.

Expresión	Ec.
$\mathrm{coeficiente}(\mathbf{x},t) = \mathrm{coeficiente}_{\mathrm{base}}\cdot\prod_k \Phi_k(H_k(\mathbf{x},t))$	(37)
$\Phi_{\mathrm{act}}(H) = \frac{H}{K_H + H}$	(38)
$\Phi_{\mathrm{thr}}(H) = \frac{H^n}{K_H^n + H^n}, \qquad n > 1$	(39)
$\Phi_{\mathrm{inh}}(H) = \frac{K_H}{K_H + H}$	(40)

TABLA XV: VARIABLES DEL SISTEMA ACOPLADO ET-JA.

Símbolo	Descripción
H	Concentración de la hormona.
$\Phi_{\mathrm{act}}(H)$	Factor de activación saturante gradual (dependiente de la concentración H).
$\Phi_{\mathrm{thr}}(H)$	Factor de activación con umbral pronunciado.
$\Phi_{\mathrm{inh}}(H)$	Factor de inhibición saturante.
K_H	Constante de sensibilidad (concentración hormonal a la cual la respuesta es la mitad del máximo).
n	Orden de Hill (determina la pendiente del umbral de activación, donde $n > 1$).
Φ	Representación general de los factores de modulación, normalizados en el rango $[0, 1]$.

2) *Coeficientes de Modulación*

a) *Coeficiente de importación de sacarosa: k_sink*

Este coeficiente controla la tasa de importación de sacarosa desde el floema hacia el parche. Es el coeficiente con mayor número de moduladores hormonales porque el ácido abscísico invierte su rol entre etapas: inhibe levemente la importación en E1–E2 y la activa en E3–E4. Los moduladores binarios son complementarios y garantizan que solo uno de los dos roles del ABA esté activo en cada momento, descrito en (41).

b) *Coeficientes de expansión de volumen: k_vol,rad y k_vol,long*

El crecimiento del parche opera sobre dos ejes geométricos independientes, cada uno modulado por su hormona correspondiente. El eje radial está gobernado por la auxina (con contribución de la citoquinina en E1) y el eje longitudinal por la giberelina, inhibido por el ácido abscísico en E3–E4 para detener la elongación durante la maduración, descrito en (42) y (43) respectivamente.

c) *Coeficiente de inversión de sacarosa: k_inv*

Este coeficiente controla la hidrólisis de sacarosa en glucosa y fructosa por las invertasas de pared y vacuolares, proceso directamente relacionado con el dulzor del fruto. El ácido abscísico activa las invertasas desde E3; el etileno y los jasmonatos amplifican esa activación en E4, con el factor

cuadrático de los jasmonatos reflejando que su contribución tiene un umbral más pronunciado, descrito en (44).

d) Coeficiente de síntesis de antocianinas: k_anth

Este coeficiente controla la producción de antocianinas en la subepidermis mediante la vía FaMYB10. Tanto el ácido abscísico como los jasmonatos activan esta vía con factores cuadráticos (doble umbral) reproduciendo el comportamiento observado: el fruto permanece blanco hasta que ambas señales superan sus umbrales y luego enrojece rápidamente. La función característica de la subepidermis restringe la síntesis a la zona periférica, descrito en (45).

e) Coeficiente de degradación de pectinas: k_pect

Este coeficiente controla la actividad conjunta de poligalacturonasa y pectinametilesterasa, enzimas responsables del ablandamiento del fruto. El ácido abscísico y el etileno la activan; la giberelina residual en E4, vía FaGAST, la inhibe moderadamente, sosteniendo cierta integridad de la pared para evitar el colapso estructural prematuro. Descrito en (46).

f) Coeficientes de síntesis de ácidos orgánicos: k_cit y k_mal

Los ácidos cítrico y málico acumulan durante el crecimiento verde y declinan en la maduración. Tienen moduladores hormonales distintos que reflejan sus rutas metabólicas diferentes: la auxina promueve la síntesis de citrato en E2, mientras que el ácido abscísico y el etileno aceleran el consumo de ambos ácidos en E3–E4 al activar las enzimas catabólicas correspondientes. Descritos en (47) y (48).

3) Mapa consolidado de acoplamientos

Tres propiedades de consistencia se verifican por construcción. Primera, positividad: todos los factores de modulación están acotados en el intervalo [0, 1], por lo que ningún coeficiente puede volverse negativo ni superar su valor base. Segunda, continuidad en checkpoints: los moduladores binarios introducen conmutaciones discretas en los días 7, 21 y 25, cuyos efectos metabólicos se propagan gradualmente a través del mecanismo de disipación de remanentes hormonales del Módulo 5. Tercera, separación de roles: ninguna hormona actúa como activadora e inhibidora del mismo coeficiente en la misma etapa; los roles duales del ácido abscísico sobre la importación de sacarosa se separan mediante moduladores temporales complementarios. Mapa reflejado en la tabla ----.

TABLA XVI: COEFICIENTES DE MODULACIÓN.

Expresión	Ec.
$k_{\text{anth}}(\mathbf{x},t) = k_{\text{anth,base}} \cdot \frac{[\text{AIA}]}{K_{\text{AIA,ab}} + [\text{AIA}]} \cdot \frac{K_{\text{ABA,ab}}}{K_{\text{ABA,ab}} + [\text{ABA}]} \cdot \theta_{\text{E1E2}} \cdot \frac{[\text{ABA}]}{K_{\text{ABA,ab2}} + [\text{ABA}]} \cdot \theta_{\text{E3E4}}$	(41)
$k_{\text{vol,rad}}(\mathbf{x},t) = k_{\text{vol,rad,base}} \cdot \frac{[\text{AIA}]}{K_{\text{AIA,vl}} + [\text{AIA}]} \cdot \frac{[\text{CK}]}{K_{\text{CK,vl}} + [\text{CK}]} \cdot \theta_{\text{E1}}$	(42)
$k_{\text{vol,long}}(\mathbf{x},t) = k_{\text{vol,long,base}} \cdot \frac{[\text{GA}]}{K_{\text{GA,vl}} + [\text{GA}]} \cdot \frac{K_{\text{ABA,vl}}^2}{K_{\text{ABA,vl}}^2 + [\text{ABA}]^2}$	(43)

Expresión	Ec.
$k_{\text{inv}}(\mathbf{x},t) = k_{\text{inv,base}} \cdot \frac{[\text{ABA}]}{K_{\text{ABA,inv}} + [\text{ABA}]} \cdot \frac{[\text{ET}]}{K_{\text{ET,inv}} + [\text{ET}]} \cdot \theta_{\text{E3}} \cdot \frac{[\text{JA}]^2}{K_{\text{JA,inv}}^2 + [\text{JA}]^2} \cdot \theta_{\text{E4}}$	(44)
$k_{\text{anth}}(\mathbf{x},t) = k_{\text{anth,base}} \cdot \frac{[\text{ABA}]^2}{K_{\text{ABA,an}}^2 + [\text{ABA}]^2} \cdot \frac{[\text{JA}]^2}{K_{\text{JA,an}}^2 + [\text{JA}]^2} \cdot \phi_{\text{subep}}(\mathbf{x}) \cdot \theta_{\text{E3}}$	(45)
$k_{\text{pect}}(\mathbf{x},t) = k_{\text{pect,base}} \cdot \frac{[\text{ABA}]}{K_{\text{ABA,pc}} + [\text{ABA}]} \cdot \frac{[\text{ET}]}{K_{\text{ET,pc}} + [\text{ET}]} \cdot \theta_{\text{E3}} \cdot \frac{K_{\text{GA,pc}}}{K_{\text{GA,pc}} + [\text{GA}]}$	(46)
$k_{\text{cit}}(\mathbf{x},t) = k_{\text{cit,base}} \cdot \frac{[\text{AIA}]}{K_{\text{AIA,cit}} + [\text{AIA}]} \cdot \theta_{\text{E2}} \cdot \frac{K_{\text{ABA,cit}}}{K_{\text{ABA,cit}} + [\text{ABA}]}$	(47)
$k_{\text{mal}}(\mathbf{x},t) = k_{\text{mal,base}} \cdot \frac{K_{\text{ABA,mal}}}{K_{\text{ABA,mal}} + [\text{ABA}]} \cdot \frac{K_{\text{ET,mal}}}{K_{\text{ET,mal}} + [\text{ET}]} \cdot \theta_{\text{E4}}$	(48)

TABLA XVII: VARIABLES DE COEFICIENTES DE MODULACIÓN – IMPORTACIÓN DE SACAROSA.

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango estimado
$k_{\text{sink,base}}$	Tasa base de importación	$\mu\text{mol}\,\text{h}^{-1}$	0.01 – 0.1
$K_{\text{AIA,ab}}$	Semisaturación AIA en k_{sink}	μM	0.3 – 1.0
$K_{\text{ABA,ab}}$	Semisaturación ABA inhibidor (E1–E2)	μM	0.5 – 2.0
$K_{\text{ABA,ab2}}$	Semisaturación ABA activador (E3–E4)	μM	0.8 – 2.5
θ_{E1E2}	Modulador binario activo en E1–E2	{0,1}	—
θ_{E3E4}	Modulador binario activo en E3–E4	{0,1}	—

TABLA XVIII: VARIABLES DE COEFICIENTES DE MODULACIÓN – INVERSIÓN DE SACAROSA.

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango estimado
$k_{\text{inv,base}}$	Tasa base de inversión	h^{-1}	0.005 – 0.05
$K_{\text{ABA,inv}}$	Semisaturación ABA en invertasas	μM	0.6 – 1.8
$K_{\text{ET,inv}}$	Semisaturación ET en invertasas	ppm	0.1 – 0.5
$K_{\text{JA,inv}}$	Semisaturación JA en invertasas	μM	0.15 – 0.6
θ_{E4}	Modulador binario activo sólo en E4	{0,1}	—

TABLA XIX: VARIABLES DE COEFICIENTES DE MODULACIÓN – EXPANSIÓN DE VOLUMEN.

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango estimado
$k_{\text{vol,rad,base}}$	Tasa base de expansión radial	$\text{mm}^3\,\text{h}^{-1}$	0.001 – 0.01
$k_{\text{vol,long,base}}$	Tasa base de elongación longitudinal	$\text{mm}^3\,\text{h}^{-1}$	0.001 – 0.008
$K_{\text{AIA,vl}}$	Semisaturación AIA en expansión radial	μM	0.4 – 1.2
$K_{\text{CK,vl}}$	Semisaturación CK en expansión radial	μM	0.3 – 1.0
$K_{\text{GA,vl}}$	Semisaturación GA en elongación	μM	0.2 – 0.8
$K_{\text{ABA,vl}}$	Semisaturación ABA inhibidor de elongación	μM	1.0 – 2.5
θ_{E1}	Modulador binario activo sólo en E1	{0,1}	—

TABLA XX: VARIABLES DE COEFICIENTES DE MODULACIÓN – ANTOCIANINAS.

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango
$k_{ant,base}$	Tasa base de síntesis de antocianinas	$\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$	0.001–0.02
$K_{ABA,ant}$	Semisaturación ABA en FaMYB10	μM	1.0–2.5
$K_{JA,ant}$	Semisaturación JA en FaMYB10	μM	0.2–0.8
ψ_{subep}	Función característica de subepidermis	[0,1]	—
θ_{E4}	Modulador binario activo solo en E4	{0,1}	—

TABLA XXI VARIABLES DE COEFICIENTES DE MODULACIÓN – PECTINAS.

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango estimado
$k_{pect,base}$	Tasa base de degradación de pectinas	h^{-1}	0.002 – 0.02
$K_{ABA,pc}$	Semisaturación ABA en pectinasas	μM	0.8 – 2.0
$K_{ET,pc}$	Semisaturación ET en pectinasas	ppm	0.1 – 0.4
$K_{GA,pc}$	Semisaturación GA inhibidor de pectinasas	μM	0.3 – 1.0
θ_{E4}	Modulador binario activo solo en E4	{0,1}	—

TABLA XXII: VARIABLES DE COEFICIENTES DE MODULACIÓN – ÁCIDOS ORGÁNICOS.

Símbolo	Descripción	Unidades	Rango
$k_{cit,base}$	Tasa base de síntesis de citrato	$\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$	0.005–0.04
$K_{AIA,cit}$	Semisaturación AIA en síntesis de citrato	μM	0.5–1.5
$K_{ABA,cit}$	Semisaturación ABA inhibidor de citrato	μM	0.8–2.0
$k_{mal,base}$	Tasa base de síntesis de malato	$\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$	0.008–0.05
$K_{ABA,mal}$	Semisaturación ABA en consumo de malato	μM	0.6–1.8
$K_{ET,mal}$	Semisaturación ET en consumo de malato	ppm	0.1–0.4
θ_{E2}	Modulador binario activo solo en E2	{0,1}	—
θ_{E4}	Modulador binario activo solo en E4	{0,1}	—

TABLA XXIII: VARIABLES DE COEFICIENTES DE MODULACIÓN – CONSOLIDADO DE ACOPLAMIENTOS.

Coeficiente	AIA	CK	GA	ABA	ET	JA
k_{xilA}	A	—	—	I (E1–E2) / A (E3–E4)	—	—
$k_{vol,ind}$	A	A^{E1}	—	—	—	—
$k_{vol,long}$	—	—	A	I^{γ}	—	—
k_{tur}	—	—	—	A	A^{E4}	T^{E4}
k_{sacA}	—	—	—	T	—	T^{E4}
k_{pect}	—	—	I	A	A^{E4}	—
k_{cit}	A^{E2}	—	—	I	—	—
k_{mal}	—	—	—	I	I^{E4}	—

^{E1} activo solo

en E1; ^{E2} activo solo en E2; ^{E4} activo solo en E4; $^{\gamma}$ factor exponencial ($n = 2$).

D. Módulo 4 — EDOs Metabólicas

Las ecuaciones diferenciales ordinarias del Módulo 4 describen la evolución temporal de once variables de estado por parche, organizadas en tres bloques con causalidad unidireccional dentro de cada paso temporal. Los coeficientes de todas las ecuaciones son los producidos por el Módulo 3.

El Bloque A establece los flujos de entrada al parche. El agua ingresa desde el xilema impulsada por la diferencia de potencial hídrico entre la planta y el parche, descompuesto en sus componentes osmótico y de presión de turgencia. A medida que se acumulan azúcares, el potencial osmótico disminuye y la entrada de agua aumenta (un acoplamiento directo entre metabolismo e hidráulica). La sacarosa se importa desde el floema con cinética de Michaelis-Menten modulada por el coeficiente de importación del Módulo 3, sujeta a una función de retroinhibición por turgencia que detiene la importación cuando el parche alcanza su expansión máxima.

El Bloque B distribuye el carbono importado. La sacarosa puede permanecer intacta, hidrolizarse en glucosa y fructosa por acción de invertasas, o consumirse en respiración con corrección de Arrhenius por temperatura. La hidrólisis produce ambas hexosas en proporción equimolar con corrección estequiométrica de masa molar (180/342), constante determinada por la química de la reacción y no ajustable. La glucosa tiene un drenaje adicional hacia la síntesis de ácido cítrico vía glicólisis y ciclo de Krebs, modelado como un paso cinético agregado de primer orden. La fructosa se acumula preferentemente como azúcar libre. El ácido cítrico se sintetiza proporcionalmente al drenaje de glucosa, modulado por el coeficiente del Módulo 3 que decrece en E4 por inhibición del ABA, invirtiendo la acumulación neta. El ácido málico se sintetiza vía carboxilación de fosfoenolpiruvato (PEP), tratado como variable algebraica proporcional a la glucosa para evitar una ecuación diferencial sobre un intermedio de rápido equilibrio; su consumo se acelera en E4 por activación de la malato deshidrogenasa dependiente de ABA.

El Bloque C traduce el estado metabólico en calidad observable. Las antocianinas se sintetizan en la subepidermis con tasa controlada por el coeficiente del Módulo 3 (que ya incorpora la dependencia de ABA y jasmonatos) y se degradan lentamente por peroxidasas, acumulándose de forma casi

irreversible una vez iniciada la síntesis. Las pectinas tienen síntesis constitutiva sostenida por giberelina vía FaGAST y degradación por pectinasas activadas por ABA y etileno con cinética de Michaelis-Menten; la firmeza neta resulta de este balance. La presión de turgencia responde elásticamente a la entrada de agua y plásticamente cuando supera el umbral de cedencia de la pared celular, siguiendo la ecuación de Lockhart adaptada al modelo por parches. El volumen del parche crece irreversiblemente cuando la turgencia supera el umbral, con coeficiente de crecimiento que combina las contribuciones radial y longitudinal del Módulo 3.

Tres variables se actualizan algebraicamente sin integración: el potencial osmótico como función de la concentración molar total de solutos, la firmeza como función multiplicativa de pectinas y turgencia con exponente empírico, y la concentración de PEP como proporcional a la glucosa.
El sistema es potencialmente rígido por la coexistencia de escalas de tiempo muy distintas — la turgencia responde en minutos, los azúcares en horas, las pectinas en días. La estrategia recomendada es un integrador con detección automática de rigidez (LSODA), con splitting opcional para la ecuación de turgencia con paso interno reducido.

Las ecuaciones completas del sistema se presentan a continuación clasificadas por los bloques referenciados previamente.

TABLA XXIV: EDOS DE METABOLISMO.

Expresión	Ec.	Bq.
$\frac{dV_{agua}}{dt} = L_p\left(\Psi_{xilema} - \Psi_{fruto}\right) A_{xilema} - k_{transp} V_{agua}$	(49)	A
$\frac{d[Sac]}{dt} = \frac{dS_{imp}}{dt} - k_{inv}\frac{V_{max,inv}[Sac]}{K_{m,inv} + [Sac]} - k_{resp,sac}[Sac]$	(50)	B
$\frac{d[Glc]}{dt} = k_{inv}\frac{V_{max,inv}[Sac]}{K_{m,inv} + [Sac]}\frac{1}{2}\frac{180}{342} - k_{resp,hex}[Glc] - k_{Glc,cit}[Glc]$	(51)	B
$\frac{d[Fru]}{dt} = k_{inv}\frac{V_{max,inv}[Sac]}{K_{m,inv} + [Sac]}\frac{1}{2}\frac{180}{342} - k_{resp,hex}[Fru]$	(52)	B
$\frac{d[Cit]}{dt} = k_{cit}\,k_{Glc,cit}[Glc] - k_{deg,cit}[Cit] - k_{resp,cit}[Cit]$	(53)	B
$\frac{d[Mal]}{dt} = k_{mal}\,k_{PEP,mal}\,\alpha_{PEP}[Glc] - k_{MDH}[Mal]\,\Phi_{ABA,MDH} - k_{resp,mal}[Mal]$	(54)	B
$\frac{d[Anth]}{dt} = k_{anth}\,V_{max,anth} - k_{deg,anth}[Anth]$	(55)	C
$\frac{d[Pect]}{dt} = k_{sint,pect}\,\Phi_{GA,sint} - k_{pect}\frac{V_{max,pect}[Pect]}{K_{m,pect} + [Pect]}$	(56)	C
$\frac{dP_{turgor}}{dt} = \varepsilon_{elast}\left(\frac{\dot{V}_{agua}}{V_{parche}} - k_{cre}\max(0, P_{turgor} - P_{umbral})\right)$	(57)	C
$\frac{dV_{parche}}{dt} = k_{cre}\,V_{parche}\max(0, P_{turgor} - P_{umbral})$	(58)	C

TABLA XXV: VARIABLES DINÁMICA HÍDRICA Y CRECIMIENTO.

Símbolo	Descripción
V_{agua}	Volumen de agua contenido en el tejido o parche.
$\dot{V}_{agua}$	Derivada temporal neta del volumen de agua ($\frac{dV_{agua}}{dt}$).
L_p	Conductividad hidráulica de las membranas.
$\Psi_{xilema}, \Psi_{fruto}$	Potencial hídrico del vaso del xilema y del tejido del fruto, respectivamente.
A_{xilema}	Área funcional de intercambio de agua a través del xilema.
k_{transp}	Constante de pérdida de agua por transpiración.
P_{turgor}	Presión de turgencia en el interior celular.
P_{umbral}	Presión umbral crítica de fluencia para la expansión irreversible.
ε_{elast}	Módulo de elasticidad volumétrica de la pared celular.
V_{parche}	Volumen global del elemento diferencial de tejido (parche).
k_{cre}	Tasa o constante de extensibilidad y crecimiento celular.

TABLA XXVI: VARIABLES METABOLISMO.

Símbolo	Descripción
[Sac], [Glc], [Fru]	Concentración de sacarosa, glucosa y fructosa, respectivamente.
S_{imp}	Cantidad de sacarosa importada al sistema.
$k_{inv}, V_{max,inv}, K_{m,inv}$	Constante de reacción, velocidad máxima y constante de saturación (Michaelis) de la enzima invertasa.
$k_{resp,sac}, k_{resp,hex}$	Tasas de consumo de sacarosa y hexosas por respiración celular.
[Cit], [Mal]	Concentración de citrato y malato.
$k_{cit}, k_{deg,cit}$	Parámetros asociados a la síntesis y degradación biológica del citrato.
$k_{Glc,cit}$	Tasa de asimilación de glucosa orientada al ciclo del citrato.
$k_{mal}, k_{PEP,mal}, \alpha_{PEP}$	Constantes de formación de malato a partir de fosfoenolpiruvato (PEP).
$k_{MDH}, \Phi_{ABA,MDH}$	Degradación catalizada por malato deshidrogenasa (MDH) y su modulación por el ácido abscísico (ABA).
[Anth], [Pect]	Concentraciones de pigmentos (antocianinas) y de pectinas de pared.
$k_{anth}, V_{max,anth}$	Constante de síntesis y velocidad máxima de producción de antocianinas.
$k_{sint,pect}, \Phi_{GA,sint}$	Tasa de síntesis base de pectina y su modulación por giberelinas (GA).
$k_{pect}, V_{max,pect}, K_{m,pect}$	Parámetros cinéticos relacionados con la degradación y aflojamiento de pectinas.

E. Selector de Etapa y Transiciones

El selector de etapa es el controlador discreto del solver. No integra ecuaciones diferenciales ni evalúa gradientes, su función es determinar en cada paso temporal qué configuración del sistema está activa y gestionar los cambios entre configuraciones. Es el único componente que introduce discontinuidades deliberadas.

El selector implementa una máquina de estados finitos con cuatro estados y tres transiciones estrictamente acíclicas (ninguna etapa puede reactivarse una vez superada, lo que implementa la irreversibilidad fenológica del desarrollo). Los estados son cuajado (días 1–7), crecimiento verde (días 8–21), estadio blanco (días 22–25) y maduración (días 26–40). Las transiciones ocurren en checkpoints fijos en los días 7, 21 y 25. Los checkpoints son fijos por diseño, no emergentes: un checkpoint emergente requeriría un criterio cuantitativo de madurez que introduce un parámetro adicional de calibración y posibles oscilaciones alrededor del umbral.

Cada etapa define una configuración completa del solver: qué canal hormonal del Módulo 1 está activo (CK en E1, AIA en E2, ABA en E3–E4, GA permanente en las cuatro), qué moduladores de síntesis y de inhibición están habilitados, si la integración de volumen y la síntesis de antocianinas están activas, y si las ODEs de etileno y jasmonatos del Módulo 2 se integran.

La transición T1 (día 7) congela la malla de parches (los atributos de identidad de cada parche quedan inmutables y el procedimiento de generación de malla se desactiva permanentemente) activa el canal de auxina al 100% y pone la síntesis de citoquinina en decaimiento exponencial. La transición T2 (día 21) es la más crítica: el modulador binario de inhibición AIA→ABA colapsa de 1 a 0 instantáneamente en todos los parches, liberando al ABA para colonizar el tejido periférico; simultáneamente el modulador de síntesis de ABA salta de 0.15 a 0.6 y la integración de volumen se desactiva. La combinación de estos cambios produce el ascenso rápido de ABA que caracteriza el quiebre del córtex. La transición T3 (día 25) activa el subsistema de etileno y jasmonatos, sube el modulador de ABA a su máximo y habilita la síntesis plena de antocianinas.

Las transiciones son discretas en los parámetros de configuración, pero sus efectos metabólicos no lo son: los remanentes de las hormonas cuya síntesis se ha cortado persisten y se disipan gradualmente, gobernados solo por degradación y difusión. El tiempo característico de disipación es el inverso de la tasa de degradación de cada hormona, con rangos que van desde medio día para jasmonatos y etileno hasta 12 días para giberelina en el extremo bajo de degradación. Este mecanismo suaviza la respuesta metabólica ante las conmutaciones discretas del selector.

Antes de continuar la integración tras cada transición, el solver verifica tres condiciones: positividad de todas las variables de estado post-transición, continuidad del balance de carbono con tolerancia del 1%, y consistencia del número de parches generados dentro del rango fisiológico (solo en T1). Cada checkpoint serializa el estado completo en HDF5, lo que permite reiniciar la simulación desde cualquier etapa sin reejecutar las anteriores.

Las ecuaciones de la función de estado, las transiciones y la disipación de remanentes se presentan a continuación:

1) Máquina de estados fenológicos

TABLA XXVII: COEFICIENTES DE ESTADOS FENOLÓGICOS.

Expresión	Ec.
$T_1 : E_1 \to E_2 \quad \text{en } t = 168\,\text{h} \quad \text{(checkpoint día 7)}$ $T_2 : E_2 \to E_3 \quad \text{en } t = 504\,\text{h} \quad \text{(checkpoint día 21)}$ $T_3 : E_3 \to E_4 \quad \text{en } t = 600\,\text{h} \quad \text{(checkpoint día 25)}$	(59)

Expresión	Ec.
$E(t) = \begin{cases} E_1, & 0 \le t \le 168\,\text{h} \\ E_2, & 168 < t \le 504\,\text{h} \\ E_3, & 504 < t \le 600\,\text{h} \\ E_4, & 600 < t \le 960\,\text{h} \end{cases}$	(60)

TABLA XXVIII: COEFICIENTES DE ESTADOS FENOLÓGICOS.

Parámetro	E_1	E_2	E_3	E_4
Canal EDP rotativo	CK	AIA	ABA	ABA
Canal EDP permanente	GA	GA	GA	GA
Malla de parches	Gener.	Congel.	Congel.	Congel.
Fuentes AIA (S_i)	10–15%	100%	Decrec.	Mín.
Modulador CK (f_{E1})	1.0	Decaim.	≈ 0	≈ 0
Modulador GA (g_E)	0.3	1.0	0.6	0.4
Modulador ABA (h_E)	0.1	0.15	0.6	1.0
Inh. AIA→ABA (θ_E)	1	1	0	0
ODEs ET y JA	No	No	No	Sí
Integración de volumen	Sí	Sí	No	No
Síntesis de antocianinas	No	No	Trazas	Sí

2) Disipación de remanentes hormonales

TABLA XXVII: COEFICIENTES DE ESTADOS FENOLÓGICOS.

Expresión	Ec.
$\frac{\partial [H]}{\partial t} = D_H \nabla^2 [H] - k_{\text{deg},H} \cdot [H], \qquad t > t_c$	(61)
$[H](t) = [H](t_c) \cdot \exp\!\left(-k_{\text{deg},H} \cdot (t - t_c)\right), \qquad t > t_c$	(62)
$\tau_{\text{disip}}(H) = \frac{1}{k_{\text{deg},H}}$	(63)

TABLA XXVIII: TIEMPOS DE DISIPACIÓN POR HORMONA.

Hormona	k_{deg} (h^{-1})	τ_{disip} (h)	Rango de disipación
AIA	0.02 – 0.15	7 – 50	1 – 6 días
CK	0.03 – 0.12	8 – 33	1 – 4 días
GA	0.01 – 0.08	12 – 100	1.5 – 12 días
ABA	0.02 – 0.10	10 – 50	1 – 6 días
ET	0.05 – 0.20	5 – 20	0.6 – 2.5 días
JA	0.08 – 0.25	4 – 12	0.5 – 1.5 días

F. Verificadores de Consistencia

Los verificadores de consistencia son el sistema de invariantes del solver. Se ejecutan al final de cada paso temporal, después de que el Módulo 4 produce el nuevo estado y antes de que se serialice en disco. No comparan la salida del modelo con datos observados, comprueban propiedades matemáticas que deben cumplirse por construcción. Si un verificador falla, el problema es de implementación o inestabilidad numérica, no de calibración. Cada verificador tiene tres niveles de respuesta: corrección local y continuación (Nivel 1), advertencia con

snapshot de diagnóstico (Nivel 2), y abort de la simulación (Nivel 3).

El Verificador 1 comprueba positividad de todas las variables de estado en todos los parches. La condición suficiente para que el integrador explícito la mantenga es que el paso temporal sea menor que el inverso de la tasa de pérdida efectiva máxima — con un paso de una hora, ninguna tasa efectiva debe superar 1 por hora. Si se detecta una variable negativa se fuerza a cero; si más del 5% de los parches están afectados se aborta por inestabilidad sistémica.

El Verificador 2 comprueba conservación de carbono. El carbono total (suma ponderada por volumen de sacarosa, glucosa, fructosa, citrato y malato con sus respectivos números de carbonos por molécula) debe variar en cada paso solo por importación menos respiración, con tolerancia del 1%. Un desequilibrio mayor al 10% en un solo paso indica error de implementación severo y dispara abort.

El Verificador 3 comprueba irreversibilidad de senescencia. Firmeza, pectinas, ácido cítrico y ácido málico no pueden aumentar una vez alcanzado su pico en cada parche, con tolerancia del 2% para oscilaciones numéricas. Las antocianinas quedan excluidas porque pueden decrecer momentáneamente por peroxidasas (su monotonía se verifica por separado en el Verificador 5). No existe abort para este verificador; la reversión indica problema de calibración, no de estabilidad.

El Verificador 4 comprueba acotamiento de gradientes hormonales estimados por diferencias finitas sobre parches vecinos. Un gradiente excesivo indica singularidad numérica por fuentes puntuales mal regularizadas. Si supera diez veces el umbral se aborta; si afecta menos del 2% de los parches se aplica suavizado local.

El Verificador 5 comprueba monotonía acumulada de antocianinas en ventanas de 24 horas, no paso a paso. Una pérdida neta sostenida durante 24 horas en E4, cuando la síntesis está en máximo, es biológicamente imposible en condiciones normales. Tolerancia del 5%. Sin abort.

El Verificador 6 comprueba consistencia del volumen total del fruto: crecimiento monotónico en E1–E2, variación menor al 0.5% por paso en E3–E4, y rango fisiológico absoluto entre 500 y 25000 mm³. Volumen fuera de rango dispara abort.

El orden de ejecución no es arbitrario. El Verificador 1 se ejecuta primero porque el clamping a cero afecta el balance de carbono del Verificador 2. El Verificador 4 va antes del 2 porque el suavizado local redistribuye masa. Los Verificadores 3 y 5 van al final porque requieren el estado completamente limpio. Cada evento se registra en un log estructurado independiente del almacenamiento principal, un patrón de eventos de Nivel 1 recurrentes en los mismos parches es el indicador principal de qué parámetros requieren ajuste.

Las ecuaciones de cada verificador se presentan a continuación:

TABLA XXIX: VERIFICADORES DE CONSISTENCIA.

Expresión	Ec.	V
$v(p,t) \geq 0, \qquad \forall v,\ \forall p,\ \forall t$	(64)	V1
$\Delta t < \dfrac{1}{\max_{\mathbf{x}} k_{\deg,\mathrm{ef}}(\mathbf{x},t)}$	(65)	V1
$C_{\mathrm{total}}(t) = \sum_{p} \sum_{v \in V_C} n_C(v) \cdot [v](p,t) \cdot V_{\mathrm{parche}}(p,t)$	(66)	V2
$C_{\mathrm{imp}}(t) = \sum_{p} \dfrac{dS_{\mathrm{imp}}}{dt}(p,t) \cdot \Delta t \cdot 12$	(67)	V2
$C_{\mathrm{esp}}(t) = \sum_{p} \big(k_{\mathrm{esp,suc}} \cdot [\mathrm{Suc}] \cdot 12 + k_{\mathrm{esp,hex}} \cdot ([\mathrm{Glc}] + [\mathrm{Fru}]) \cdot 6 + k_{\mathrm{esp,cit}} \cdot [\mathrm{Cit}] \cdot 6 + k_{\mathrm{esp,mal}} \cdot [\mathrm{Mal}] \cdot 4 \big) \cdot V_{\mathrm{parche}} \cdot \Delta t$	(68)	V2
$\lvert \Delta C_{\mathrm{total}}(t) - \big(C_{\mathrm{imp}}(t) - C_{\mathrm{esp}}(t)\big) \rvert \leq \varepsilon_C \cdot C_{\mathrm{total}}(t)$ $v(p,t) \leq v\big(p, t_{\mathrm{pico}}(v,p)\big) \cdot (1 + \varepsilon_{\mathrm{mon}}), \qquad \forall t > t_{\mathrm{pico}}(v,p)$	(69)	V3
$\lVert \nabla [H](p,t) \rVert \approx \max_{q \in \mathrm{vec}(p)} \dfrac{\lvert [H](p,t) - [H](q,t) \rvert}{d(p,q)}$	(70)	V4
$\lVert \nabla [H](p,t) \rVert \leq G_{\max}(H), \qquad \forall p,\ \forall H$	(71)	V4
$[\mathrm{Anth}]_{\mathrm{total}}(t) \geq [\mathrm{Anth}]_{\mathrm{total}}(t - 24\,\mathrm{h}) \cdot (1 - \varepsilon_{\mathrm{anth}})$	(72)	V5
$V_{\mathrm{fruto}}(t) \geq V_{\mathrm{fruto}}(t - \Delta t)$	(73)	V6
$\left\lvert \dfrac{V_{\mathrm{fruto}}(t) - V_{\mathrm{fruto}}(t - \Delta t)}{V_{\mathrm{fruto}}(t)} \right\rvert \leq \varepsilon_{\mathrm{vol}}$	(74)	V6
$500\,\mathrm{mm}^3 \leq V_{\mathrm{fruto}}(t) \leq 25000\,\mathrm{mm}^3$	(75)	V6
$\left\lvert \dfrac{V_{\mathrm{fruto}}(t) - V_{\mathrm{geom}}(t)}{V_{\mathrm{geom}}(t)} \right\rvert \leq \varepsilon_{\mathrm{malla}}$	(76)	V6

TABLA XXX: UMBRALES DE GRADIENTE HORMONAL.

Hormona	$G_{\max}$ (μM·mm^{-1})	Justificación
AIA	2.0	Gradiente radial pronunciado
CK	1.0	Difusión libre, gradiente suave
GA	0.5	Gradiente longitudinal gradual
ABA	1.5	Gradiente con transición E3

TABLA XXXI: CONSOLIDACIÓN FINAL.

Nº	Propiedad	Granularidad	Tolerancia	¿Abort?	Ord
V1	Positividad	Parche/variable	Clamping	Nv. 3 (>5%)	1
V4	Gradientes hormon.	Por parche	G_{max}	Nv. 3	2
V2	Conserv. carbono	Sistema total	1%	Nv. 3 (>10%)	3
V6	Volumen total	Sistema total	0.5%	Nv. 3 (rango)	4
V3	Irrev. senescencia	Parche/post-pico	2%	No	5
V5	Monotonía antocian.	Sistema/24 h	5%	No	6

V. Resultados y Discusión

A. Alcance y estado actual

El modelo formaliza la estructura matemática completa (ecuaciones, variables, parámetros, acoplamientos y verificadores) pero no ha sido calibrado ni validado experimentalmente. La contribución es el ensamblaje mismo: EDPs hormonales con gradientes diferenciados, EDOs metabólicas con cinética enzimática y un controlador discreto de etapas fenológicas sobre malla tisular, aplicado específicamente a Fragaria × ananassa. Este ensamblaje no ha sido reportado previamente para esta especie. El modelo no se encuentra en capacidad de aplicación productiva; las etapas siguientes son necesarias para llevarlo a un estado desplegable.

B. Análisis de sensibilidad global

El modelo contiene ~90 parámetros con rangos estimados, lo que genera un problema de identificabilidad. El análisis de sensibilidad (Sobol o Morris) busca reducir la dimensionalidad efectiva identificando qué parámetros afectan significativamente las tres salidas comercialmente relevantes (°Brix, firmeza y color al día 40) y cuáles pueden fijarse sin pérdida predictiva. El resultado esperado es que 20–30 parámetros dominen la varianza. El análisis también revelará si las simplificaciones adoptadas (v_PIN escalar, condiciones de frontera asimétricas para GA, modulador binario θ_E) afectan las salidas o si su impacto es absorbido por otros parámetros.

C. Calibración

La calibración ajusta los parámetros influyentes minimizando la discrepancia entre las salidas del modelo y observaciones experimentales con resolución temporal en las cuatro etapas fenológicas. Las variables medibles con equipamiento estándar (peso, °Brix, firmeza, color) son magnitudes de fruto completo, lo que requiere funciones de agregación que proyecten el estado por parche a magnitudes comparables. Existe un desajuste de escala entre la resolución del modelo y la de los datos accesibles; la calibración de primera iteración procede con datos de fruto completo. Los datos deben provenir de condiciones andinas colombianas, no de invernaderos europeos, dado que las condiciones ambientales entran directamente al modelo a través de Arrhenius y del potencial hídrico.

D. Validación

La validación usa datos independientes de la calibración (idealmente de temporadas, fincas o variedades distintas) para evaluar capacidad predictiva real. El protocolo incluye cuantificación de incertidumbre mediante calibración bayesiana (MCMC), produciendo intervalos de credibilidad y no solo valores puntuales.

E. Solución computacional

La implementación tiene dos subetapas. Primera, una implementación de referencia en Python (NumPy, SciPy, HDF5) sin restricciones de tiempo real, para calibración, validación y generación de datos sintéticos. Segunda, optimización para despliegue: el modelo completo puede ser demasiado lento para el ciclo de decisión de un agricultor, lo que motiva la migración a lenguajes de mayor rendimiento o la construcción del modelo surrogate de la etapa siguiente.

F. Red neuronal como modelo surrogate

El modelo mecanicista calibrado genera miles de trayectorias sintéticas bajo variaciones de condiciones ambientales, constituyendo el dataset de entrenamiento para una red neuronal que aproxime la función entrada (temperatura, humedad, radiación) → salida (°Brix, firmeza, color) en milisegundos. La arquitectura de la red solo puede definirse a partir del modelo base: sus entradas son las variables ambientales que entran como condiciones de frontera, sus salidas las tres variables objetivo, y su complejidad depende de la no linealidad que el análisis de sensibilidad revele. Este patrón (surrogate modeling) tiene variantes que incorporan las ecuaciones del modelo como restricciones de la red (Physics-Informed Neural Networks). Una CNN sobre imágenes del fruto no sustituye este enfoque: puede clasificar el estado actual pero no predecir el estado futuro ni explicar por qué se llegó a él.

G. Refinamiento iterativo

Con el modelo calibrado y acelerado, se sustituyen las simplificaciones por formulaciones más cercanas a la biología: v_PIN como campo dependiente de concentración, difusión anisotrópica para GA, y transición emergente de la inhibición AIA→ABA. Cada refinamiento repite el ciclo formulación → sensibilidad → calibración → validación → actualización del surrogate, y se detiene cuando la mejora marginal en las tres salidas objetivo sea menor al 5% relativo.

H. Aplicaciones derivadas

El modelo tiene aplicaciones más allá de la producción de fresa. En investigación, permite evaluar hipótesis biológicas in silico antes de diseñar experimentos de laboratorio. En educación, la causalidad explícita lo convierte en herramienta para conectar biología, matemática y computación en contextos concretos. En desarrollo tecnológico, la malla de parches y el pipeline de seis módulos son reutilizables como infraestructura para gemelos digitales de otros sistemas biológicos.

VI. Conclusiones

El presente trabajo formaliza un modelo matemático del crecimiento y maduración de Fragaria × ananassa que integra cuatro EDPs hormonales con geometrías de gradiente diferenciadas, dos ODEs de señalización temporal, ocho funciones de modulación derivadas de la cinética de Hill y Michaelis-Menten, once ODEs metabólicas en tres bloques causales, un controlador discreto de cuatro etapas fenológicas y

seis verificadores de consistencia. La simulación cubre cuarenta días en pasos de una hora sobre una malla de parches tisulares donde cada parche mantiene su propio estado hormonal y metabólico.

La contribución no radica en las ecuaciones individuales sino en su ensamblaje para representar la fisiología del fruto con resolución espacial y temporal simultánea. Los modelos existentes tratan el fruto como un compartimento homogéneo y no resuelven la distribución espacial de las señales que dirigen el desarrollo. La malla de parches permite representar fenómenos como la colonización progresiva del ABA desde la médula, la supresión diferencial de la maduración por la auxina en la epidermis, y el quiebre metabólico del córtex (procesos que un modelo de compartimento único no puede capturar). La separación explícita del acoplamiento hormona-coeficiente garantiza que cada predicción tenga una causa hormonal identificable, lo que distingue al modelo tanto de enfoques fenomenológicos como de enfoques de aprendizaje automático donde la relación entrada-salida es opaca.

El modelo no está validado experimentalmente y contiene del orden de noventa parámetros con rangos estimados. Las simplificaciones adoptadas (transporte polar de auxina como escalar constante, condiciones de frontera asimétricas para giberelina, modulador binario de la inhibición auxina-ABA) priorizan la tratabilidad sobre el realismo en puntos donde la pérdida es probablemente absorbida por otros parámetros, suposición que solo el análisis de sensibilidad puede confirmar.

La adaptación a condiciones andinas colombianas trasciende la parametrización regional: la radiación UV, la amplitud térmica diurna y la variabilidad de humedad entran al modelo a través de la corrección de Arrhenius y del potencial hídrico del xilema (precisamente las variables que un sistema de sensores en campo puede medir, lo que establece la interfaz natural entre el modelo y el gemelo digital operativo).

El modelo mecanicista y la red neuronal son progresiones complementarias: el primero genera datos de entrenamiento y aporta trazabilidad causal, la segunda aporta velocidad de evaluación en tiempo real. Desarrollar el modelo con rigor antes de construir el sistema de inferencia que lo aproxime no es una restricción sino un requisito.

En síntesis, este trabajo establece una base modular y reproducible para un gemelo digital del fruto de fresa adaptado a condiciones andinas. La ruta siguiente (análisis de sensibilidad, calibración con datos andinos, validación independiente, implementación optimizada y red neuronal surrogate) es secuencial y cada etapa depende de la anterior. El objetivo final es proporcionar al agricultor una herramienta que le diga no solo qué va a pasar con su fruto sino por qué, y qué puede hacer al respecto.

References

[1] C. Verdouw, B. Tekinerdogan, A. Beulens, y S. Wolfert, "Digital twins in smart farming," *Agricultural Systems*, vol. 189, art. no. 103046, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.agsy.2020.103046.

[2] M. Génard, N. Bertin, C. Borel, P. Bussières, H. Gautier, R. Habib, M. Léchaudel, A. Lecomte, F. Lescourret, P. Lobit, y B. Quilot, "Towards a virtual fruit focusing on quality: modelling features and potential uses," *Journal of Experimental Botany*, vol. 58, no. 5, pp. 917–928, Mar. 2007, doi: 10.1093/jxb/erl287.

[3] Z. W. Dai, P. Vivin, T. Robert, S. Milin, S. H. Li, y M. Génard, "Model-based analysis of sugar accumulation in response to source-sink ratio and water supply in grape (*Vitis vinifera*) berries," *Functional Plant Biology*, vol. 36, no. 6, pp. 527–540, Jun. 2009, doi: 10.1071/FP08284.

[4] AGROSAVIA, *Manual del cultivo de fresa para el departamento de Cundinamarca*. Bogotá, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, 2019.

[5] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), *Norma Técnica Colombiana NTC 4103: Frutas frescas. Fresa. Especificaciones*. Bogotá, Colombia: ICONTEC, 1997.

[6] K. M. Islam, M. A. Rahman, y M. S. Islam, "Postharvest performance evaluation of strawberry varieties at ambient condition," *ResearchGate*, 2025.

[7] Y. Tian, W. Xin, J. Lin, J. Ma, J. He, X. Wang, T. Xu, y W. Tang, "Auxin coordinates achene and receptacle development during fruit initiation in *Fragaria vesca*," *Frontiers in Plant Science*, vol. 13, art. no. 929831, Jul. 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.929831.

[8] B. J. Li, D. Grierson, Y. Shi, y K. S. Chen, "Roles of abscisic acid in regulating ripening and quality of strawberry, a model non-climacteric fruit," *Horticulture Research*, vol. 9, art. no. uhac089, Apr. 2022.

[9] L. Merchante, J. M. Estornell, J. A. Martínez-Macías, M. A. Botella, y V. Valpuesta, "Ethylene is involved in strawberry fruit ripening in an organ-specific manner," *PLOS ONE*, vol. 8, no. 10, Oct. 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0078025.

[10] T. Okabe, "Biophysical optimality of the golden angle in phyllotaxis," *Scientific Reports*, vol. 5, art. no. 15358, Oct. 2015, doi: 10.1038/srep15358.

[11] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, y B. P. Flannery, *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, 3rd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2007.

[12] "Homeostasis and catabolism of indole-3-acetic acid in strawberry: kinetic coefficients for AIA-oxidase degradation and GH3 conjugation family genes," *PubMed Central*, PMC11414167.

[13] "Auxin biosynthesis via FaTAR2 and FaYUCCA genes in achenes during green development," *Frontiers in Plant Science*, vol. 8, art. no. 889, 2017, doi: 10.3389/fpls.2017.00889.

[14] "Gibberellin regulation and FaGAST interaction in strawberry firmness and structural integrity," *MDPI Agronomy*, vol. 15, art. no. 2645, 2025, doi: 10.3390/agronomy15112645.

[15] "Non-climacteric hormonal mechanisms: ethylene, jasmonates and FaMYB10 control of color and aroma in strawberry," *Plant Molecular Biology*, 2026, doi: 10.1007/s11103-026-01714-x.

[16] "ABA signaling networks and FcPYL4 receptor dynamics in strawberry ripening zones," *MDPI International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, art. no. 8531, 2023, doi: 10.3390/ijms24108531.

[17] "Sucrose-ABA interaction and FaNCED1 transcription during strawberry maturation," *Pakistan Journal of Botany*, vol. 45, no. 1, 2013.

[18] "Mathematical modeling of phytohormone transport and signaling in plant tissues," *Journal of Mathematical Biology*, Springer, 2019.

[19] J. P. Nitsch, "Growth and morphogenesis of the strawberry as related to auxin," *American Journal of Botany*, vol. 37, no. 3, pp. 211–215, Mar. 1950, doi: 10.1002/j.1537-2197.1950.tb12183.x.

[20] L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Møller, y A. Murphy, *Plant Physiology and Development*, 6th ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates, 2015.

[21] L. Medina-Puche, G. Cumplido-Laso, F. Amil-Ruiz, T. Hoffmann, L. Ring, A. Rodríguez-Franco, J. L. Caballero, W. Schwab, J. Muñoz-Blanco, y R. Blanco-Portales, "MYB10 plays a major role in the regulation of flavonoid/phenylpropanoid metabolism during ripening of *Fragaria × ananassa* fruits," *Journal of Experimental Botany*, vol. 65, no. 2, pp. 401–417, Jan. 2014, doi: 10.1093/jxb/ert377.

[22] P. F. Nobel, *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*, 5th ed. Oxford, U.K.: Academic Press, 2020.

[23] M. C. Bourne, *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*, 2nd ed. San Diego, CA: Academic Press, 2002.

[24] E. Steudle, "Water uptake by plant roots: an integration of views," *Plant and Soil*, vol. 226, no. 1, pp. 45–56, Nov. 2000, doi: 10.1023/A:1026439226716.

[25] J. A. Lockhart, "An analysis of irreversible plant cell elongation," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 8, no. 2, pp. 264–275, Mar. 1965, doi: 10.1016/0022-5193(65)90077-9.

[26] L. Michaelis y M. L. Menten, "Die Kinetik der Invertinwirkung," *Biochemische Zeitschrift*, vol. 49, pp. 333–369, 1913.

[27] A. V. Hill, "The possible effects of the aggregation of the molecules of haemoglobin on its dissociation curves," *The Journal of Physiology*, vol. 40, no. S4, pp. iv–vii, Jan. 1910, doi: 10.1113/jphysiol.1910.sp001386.

[28] S. H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, 2nd ed. Boulder, CO: Westview Press, 2015.

[29] J. D. Murray, *Mathematical Biology I: An Introduction*, 3rd ed. New York: Springer, 2002.

[30] S. J. Farlow, *Partial Differential Equations for Scientists and Engineers*. New York: Dover Publications, 1993.

[31] A. Fick, "Ueber Diffusion," *Annalen der Physik*, vol. 170, no. 1, pp. 59–86, 1855, doi: 10.1002/andp.18551700105.

[32] S. Arrhenius, "Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren," *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, vol. 4, pp. 226–248, 1889.

[33] H. Darcy, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Paris: Victor Dalmont, 1856.

[34] C. W. Gear, *Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1971.

[35] A. M. Turing, "The chemical basis of morphogenesis," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, vol. 237, no. 641, pp. 37–72, Aug. 1952, doi: 10.1098/rstb.1952.0012.

Diagnóstico integral de sistemas integrados de gestión para el fortalecimiento organizacional.

Wendy Ensuncho.
Universidad Libre
Seccional Barranquilla
Barranquilla, Colombia
wendye31@hotmail.com

Yosiris Ascanio.
Universidad Libre
Seccional Barranquilla
Barranquilla, Colombia
yosi.ascanio@hotmail.com

Diego Suero.
Tutor
Universidad Libre.
Seccional Barranquilla.
diego.suerop@unilibre.edu.co

***Resumen*—En un entorno organizacional cada vez más exigente, las empresas que buscan certificarse en sistemas integrados de gestión requieren mecanismos que les permitan conocer con precisión su nivel de avance frente a los requisitos normativos aplicables. Sin embargo, en muchos casos persisten dificultades asociadas a la evaluación fragmentada de los sistemas, la falta de criterios estructurados de diagnóstico y la limitada identificación de brechas para orientar procesos de mejora. Frente a esta necesidad, la presente investigación tiene como objetivo desarrollar una herramienta diagnóstica para evaluar el estado de implementación de sistemas integrados de gestión en empresas que requieran certificación se integrarán las normas ISO 9001:2015 e ISO 45001:2018.**

Esta investigación se ejecutó en tres partes. Primero se identificaron los requisitos esenciales que se tuvieron en cuenta para el diseño de la herramienta, partiendo del análisis de las exigencias de las normas y de su estructuración dentro de una perspectiva integrada. En la segunda parte, se estructuró un método de diagnóstico fundamentado con criterios e indicadores que permitieron darle valor al nivel de implementación del sistema de gestión de manera objetiva, organizada y coherente con los lineamientos de Calidad, seguridad y salud en el trabajo.

El resultado de esta investigación fue proporcionar a las organizaciones un instrumento de valor para identificar brechas de cumplimiento, priorizar acciones de intervención y fortalecer su preparación hacia procesos de certificación. Ademas este estudio favorece la integración de sistemas, la mejora continua y el fortalecimiento del desempeño organizacional.

Palabras clave: Herramienta diagnostica, norma ISO 9001:2015, norma ISO 45001:2018, sistemas integrados de gestión. *(palabras clave)*

I. Introducción

Las empresas que buscan certificarse en sistemas de gestión enfrentar diversas dificultades para determinar su nivel real de cumplimiento frente a estándares internacionales como la ISO 9001:2015 e ISO 45001:2018. A pesar de la disponibilidad de estas normas, muchas organizaciones presentan debilidades en la integración de los sistemas de gestión, evaluaciones fragmentadas y ausencia de herramientas estructuradas que permitan identificar de manera objetiva las brechas existentes.

Esta problemática se evidencia con mayor frecuencia en pequeñas y medianas empresas, debido a limitaciones en recursos técnicos, desconocimiento metodológico y ausencia de instrumentos diagnósticos que integren los requisitos de calidad, seguridad y salud en el trabajo. Como consecuencia, las organizaciones implementan sistemas de gestión de forma parcial, generando reprocesos, incumplimientos normativos y dificultades para alcanzar procesos de certificación. Adicionalmente, la falta de herramientas cuantitativas que permitan medir el nivel de implementación impide a las empresas priorizar acciones de mejora de manera eficiente. En muchos casos, las auditorías internas se limitan a evaluaciones cualitativas sin criterios estandarizados, lo que reduce la confiabilidad de los resultados obtenidos. Es por esto que se detectó la necesidad de desarrollar una herramienta diagnóstica estructurada que permita evaluar de manera integral el estado de implementación de sistemas integrados de gestión, facilitando la identificación de brechas, la priorización de acciones correctivas y el fortalecimiento del desempeño organizacional.

II. Integración de Normas

A. ISO 9001:2015

Las normas ISO 9000 han sido introducidas con el ánimo de brindar a las organizaciones de todo tipo y tamaño una herramienta efectiva que les permita implementar y operar de manera efectiva sistemas de gestión de la calidad, a través del trabajo reflejado en un compendio de familia normativa que da los fundamentos y vocabulario (ISO 9000:2015) requisitos (ISO 9001:2015) y enfoque de gestión (ISO 9004:2009), así como una herramienta de evaluación y auditoria que brinda los principios y directrices para evaluar estos sistemas (ISO 19011:2011) [1].

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/$XX.00 ©20XX IEEE

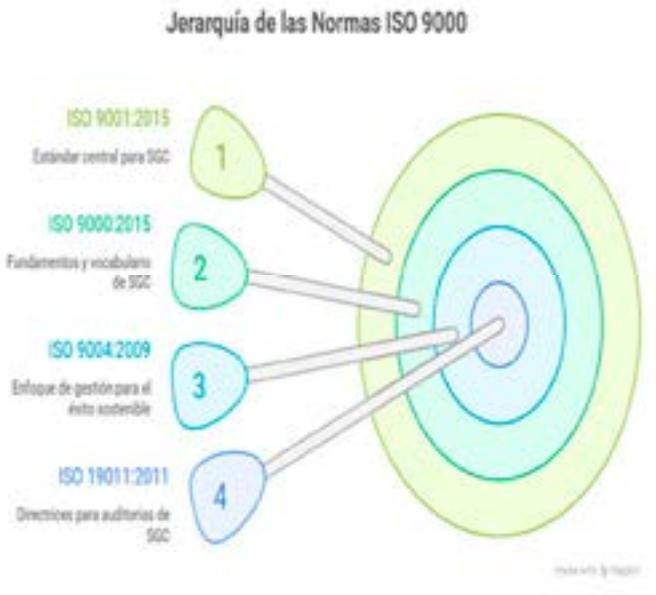


Ilustración 1

Debido a que la serie de normas ISO 9000 son muy generales en su lenguaje, sus secciones deben interpretarse cuidadosamente dentro del contexto comercial de cada organización. Como resultado, varios sectores de la industria han creado sus propios estándares de sistemas de gestión de calidad estandarizados para garantizar que se aborden los problemas críticos específicos de la industria y para garantizar la evaluación y certificación por parte de auditores debidamente capacitados y experimentados. La motivación de la alta dirección de una empresa respecto a decidir la implementación de un sistema de gestión de calidad ISO 9001:2015 obedece principalmente a la estrategia de negocio de estas. La implementación de este sistema de gestión afronta también la certificación de cumplimiento de sus requisitos a través de una entidad externa aportando principalmente a clientes y partes interesadas confianza sobre el desempeño de la organización desde una visión independiente, que ayude a identificar aspectos de mejora [2].

La norma ISO 9001:2015 es el estándar internacional de referencia para los Sistemas de Gestión de la Calidad (SGC). En su versión 2015, incorporó un enfoque renovado basado en el pensamiento basado en riesgos y oportunidades, el liderazgo activo de la alta dirección, el enfoque a procesos, el contexto organizacional y la mejora continua como principios articuladores del sistema.

B. ISO 45001:2018

En el contexto actual, las organizaciones asumen un rol fundamental en la protección de la seguridad y la salud de sus trabajadores, así como de todas aquellas personas que puedan verse afectadas por el desarrollo de sus actividades. En este sentido, los entornos laborales han evolucionado, dejando de concebirse únicamente como espacios seguros, para ser entendidos también como ambientes que promueven el bienestar integral de los individuos.

Esta responsabilidad organizacional no se limita a la prevención de accidentes y enfermedades laborales, sino que abarca de manera integral la promoción y protección de la salud física y mental de los trabajadores, así como de otras partes interesadas. Por tanto, se hace imprescindible la adopción de enfoques sistemáticos que permitan gestionar de manera eficaz estos aspectos dentro de las organizaciones. Bajo esta perspectiva, la implementación de un Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), alineado con los lineamientos de la norma ISO 45001, surge como una herramienta estratégica orientada a abordar de manera estructurada y continua los riesgos y oportunidades en materia de seguridad y salud. Este sistema permite dar respuesta a los desafíos recurrentes asociados a la gestión del riesgo laboral, promoviendo la mejora continua y el fortalecimiento de una cultura organizacional preventiva.



Ilustración 2

ISO 45001:2018 al igual que todas las normas desarrolladas por ISO, está alineada con la estructura de alto nivel. Esto significa que las normas de sistemas de gestión tales como ISO 9001 e ISO 14001, no solo se organizan con un mismo índice y presentan contenidos esenciales comunes, sino que en ellas se utiliza el mismo leguaje, con el uso de los mismos términos, que asegura la correcta comunicación entre las partes interesadas [2].

La norma también introduce conceptos que complementan y enriquecen los requisitos de calidad, como la identificación de peligros, la evaluación de riesgos para la SST, la gestión del cambio, la preparación y respuesta ante emergencias, y los requisitos específicos para contratistas y partes externas en el lugar de trabajo.

C. ISO 9001:2015 E ISO 45001:2018

Es preciso señalar que las normas objeto de análisis corresponden a estándares internacionales que han sido objeto de procesos de revisión y actualización, orientados a fortalecer la coherencia, compatibilidad y unificación conceptual entre los distintos sistemas de gestión. En particular, se consideran las normas ISO 9001:2015, relativa a los sistemas de gestión de la calidad, e ISO 45001:2018, enfocada en los sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo. Ambas normas se encuentran estructuradas bajo el enfoque de la denominada Estructura de Alto Nivel (High-Level Structure), la cual establece un marco común en términos de organización, terminología y requisitos, con el propósito de facilitar su integración e implementación conjunta en las organizaciones. En consecuencia, dichas normas comparten principios, criterios y lineamientos estructurales, diferenciándose esencialmente por el alcance y la naturaleza específica de su campo de aplicación. Esta característica permite su articulación dentro de un sistema integrado de gestión, favoreciendo la optimización de procesos y la mejora continua en las organizaciones.

La herramienta de diagnóstico desarrollada aprovecha precisamente esta alineación estructural para diseñar una matriz de evaluación que, para cada requisito, presenta el literal correspondiente de ISO 9001:2015 y su equivalente en ISO 45001:2018, ofreciendo al auditor o evaluador una visión integrada que evita la fragmentación del diagnóstico y fortalece la coherencia del análisis.

La ISO 45001 al igual que la ISO 9001, promueven la mejora continua y facilitan la integración de los sistemas mediante el uso del ciclo PHVA (Planear, Hacer, Verificar y Actuar), con esta herramienta se busca tener un enfoque coherente para las acciones preventivas y correctivas, el enfoque de mejora continua es fundamental para el éxito a largo plazo del sistema integrado de gestión identificando no conformidades e implementando acciones correctivas.



Ilustración 3

III. HERRAMIENTA DE DIAGNÓSTICO (MATRIMONIO)

A. DESCRIPCION DE LA HERRAMIENTA

La presente herramienta surge como respuesta a una necesidad identificada en diversas organizaciones: contar con un instrumento sistemático, automatizado y de fácil aplicación que permita evaluar el nivel de implementación y cumplimiento de los requisitos establecidos en la norma ISO 9001:2015, correspondiente a los Sistemas de Gestión de la Calidad, y en la norma ISO 45001:2018, relativa a los Sistemas de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo. Ambas normas se abordan de manera integrada y articulada bajo una misma estructura de diagnóstico.

En la primera etapa del proceso se identificaron los requisitos asociados a cada numeral de las normas mencionadas. Posteriormente, se establecieron los aspectos a verificar por cada literal, dando lugar a una lista de chequeo en la que se registra el hallazgo correspondiente, clasificado en las siguientes categorías: cumple, oportunidad de mejora, no conformidad menor, no conformidad mayor o no aplica. A cada categoría se le asigna un valor numérico que permite calcular el porcentaje de conformidad del sistema evaluado, así como determinar el tipo de hallazgo predominante.

Adicionalmente, la herramienta dispone de un espacio destinado al auditor o evaluador, en el cual es posible registrar las observaciones pertinentes, describir las evidencias recopiladas, documentar el hallazgo identificado, asignar un responsable de seguimiento y establecer una fecha de compromiso para la atención de las oportunidades de mejora detectadas.

B. *Estructura de hojas de cálculo*

La herramienta está organizada en seis partes interconectadas, cada una con una función específica dentro del sistema de diagnóstico. La siguiente ilustracion describe cada hoja y su propósito funcional:

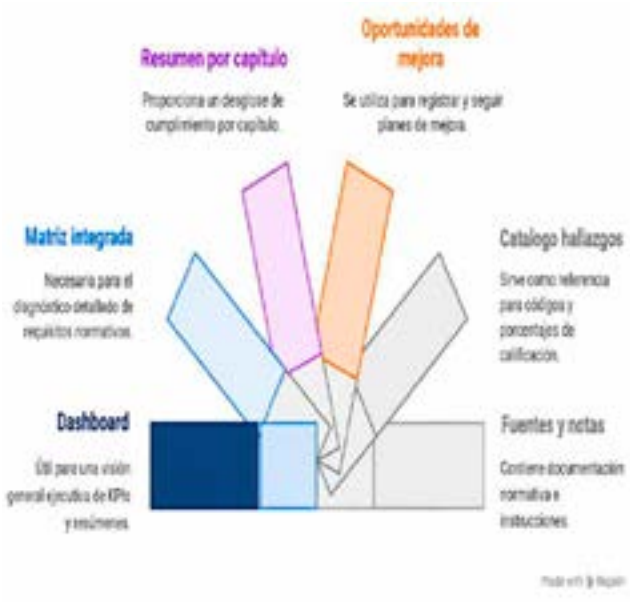


Ilustración 4

C. *Flujo de datos e interconexión*

La herramienta opera bajo un flujo de datos unidireccional que parte de la entrada del evaluador en la hoja Matriz Integrada y se propaga automáticamente hacia todas las demás hojas a través de referencias cruzadas y fórmulas de agregación. El siguiente esquema describe el flujo:



Ilustración 5

IV. Metodologia de calificación

A. *Fundamento de la escala de hallazgos:*

El núcleo metodológico de la herramienta es la escala de calificación estandarizada, conocida como Catálogo de Hallazgos, que define nueve códigos de clasificación agrupados en cinco categorías: Cumple, Oportunidad de Mejora, No Conformidad Menor, No Conformidad Mayor Y No Aplica. Este sistema de clasificación es consistente con la terminología utilizada en la práctica de auditoría bajo los lineamientos de la norma.

La siguiente tabla presenta el catálogo completo de hallazgos con su código, categoría, interpretación y porcentaje de conformidad asociado

CÓDIGO	TIPO HALLAZGO	INTERPRETACIÓN	% CONFORMIDAD
C-01	CUMPLE	Requisito implementado y documentado	100%
C-02	CUMPLE	Evidencia completa y actualizada	100%
OM-01	OPORTUNIDAD DE MEJORA	Documento desactualizado	80%
OM-02	OPORTUNIDAD DE MEJORA	Evidencia parcial	70%
NCm-01	NO CONFORMIDAD MENOR	Registro faltante	50%
NCm-02	NO CONFORMIDAD MENOR	Aplicación parcial	40%
NCM-01	NO CONFORMIDAD MAYOR	No existe procedimiento	0%
NCM-02	NO CONFORMIDAD MAYOR	Incumplimiento total	0%
NA-01	NO APLICA	Fuera de alcance	

Ilustración 6

La escala fue diseñada bajo los siguientes principios:

- Gradualidad: la calificación contempla distintos niveles de conformidad, reconociendo que el cumplimiento puede ser total, parcial con oportunidad de mejora, o deficiente en distintos grados.
- Objetividad: cada código tiene una interpretación clara y predefinida que reduce la subjetividad del evaluador.
- Cuantificabilidad: a cada código se asocia un porcentaje de conformidad numérico que permite el cálculo estadístico de indicadores de desempeño.
- Trazabilidad: los códigos permiten identificar, contar y gestionar los distintos tipos de hallazgos de manera diferenciada.

Es importante destacar que el código NA-01 (No Aplica) excluye el requisito del cálculo del porcentaje de conformidad, dado que no sería justo penalizar a una organización por no cumplir un requisito que genuinamente está fuera de su alcance. El porcentaje global se calcula únicamente sobre los requisitos efectivamente evaluados, excluyendo los marcados como No Aplica.

B. *Escala de nivel del sistema*

Basándose en el porcentaje global de conformidad y en la presencia o ausencia de no conformidades mayores, la herramienta determina automáticamente el nivel de madurez del sistema integrado de gestión. La siguiente tabla describe los niveles definidos:



Ilustración 7

V. DESCRIPCIÓN DETALLADA DE COMPONENTES

La pestaña nombrada Matriz Iintegrada es el componente central y de entrada de datos de la herramienta. Contiene los 76 requisitos normativos identificados mediante el análisis comparativo de las normas mencionadas anteriormente, organizados por capítulo normativo (del 1 al 10) y presentados en forma de filas de evaluación que el auditor o evaluador debe completar con sus hallazgos.

La estructura de columnas de la Matriz Integrada fue diseñada para ser intuitiva, progresiva y eficiente. Las primeras cinco



Ilustración 8

columnas contienen información de referencia normativa (solo lectura), las columnas centrales son de entrada de datos por parte del evaluador, y las últimas columnas son campos de texto libre para la documentación del hallazgo y el plan de gestión.

A. Lista desplegable de hallazgos

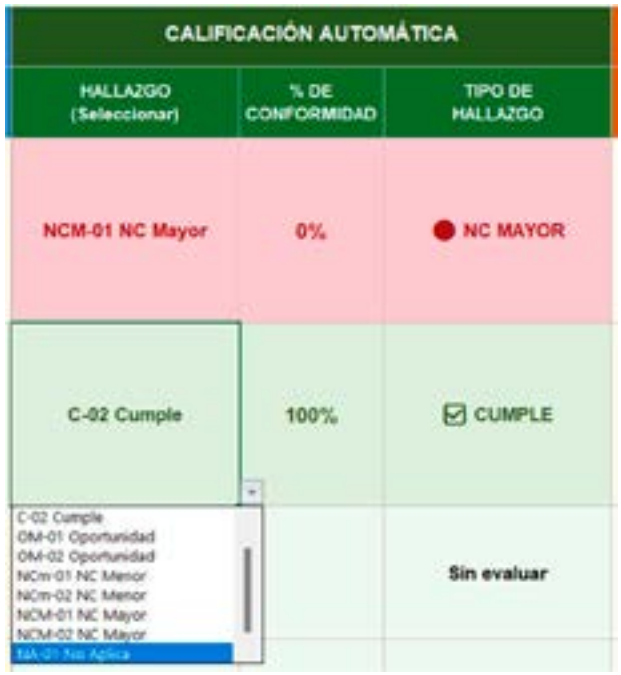


Ilustración 9

Hallazgo: implementa una validación de datos mediante lista desplegable que presenta al evaluador los nueve códigos del Catálogo de Hallazgos en un formato amigable. La validación fue configurada con mensajes de error que impiden el ingreso de valores fuera del catálogo, garantizando la integridad de los datos y la consistencia de los cálculos automáticos.

El uso de listas desplegables estandarizadas tiene tres ventajas metodológicas fundamentales: primero, elimina la variabilidad en la nomenclatura de hallazgos que suele ocurrir cuando los evaluadores registran sus observaciones en texto libre; segundo, habilita los cálculos automáticos de porcentaje de conformidad al crear una correspondencia directa entre el código seleccionado y su valor numérico; y tercero, facilita la agregación estadística de hallazgos.

% de conformidad: traduce automáticamente el código seleccionado en la “Hallazgos” a su porcentaje de conformidad correspondiente. También implementa una regla de escala de colores (color scale) que pinta automáticamente cada celda en una gradiente que va del rojo (0%) al amarillo (50%) y al verde (100%), ofreciendo al evaluador una representación visual inmediata del nivel de conformidad de cada requisito sin necesidad de leer el valor numérico.

Tipo de hallazgos: nos muestra una descripción textual del tipo de hallazgo, enriquecida con iconos Unicode que facilitan la lectura visual rápida del estado de cada requisito. Arrojando los siguientes resultados:
'Sin evaluar' (campo vacío), ' CUMPLE', ' OPORTUNIDAD', ' NC MENOR', ' NC MAYOR' o ' NO APLICA', según el código registrado.

Se establecen esquemas de color diferenciados según la categoría del hallazgo: verde para cumplimientos, amarillo para oportunidades de mejora, naranja para no conformidades menores y rojo para no conformidades mayores. Este sistema de semáforo visual permite identificar de un vistazo el estado de cada requisito sin necesidad de leer los valores individuales, reduciendo el tiempo de análisis e interpretación.

VI. HOJA DASHBOARD

El Dashboard es la hoja de presentación ejecutiva de la herramienta. Está diseñado para ser la primera hoja que visualiza la dirección o el responsable del sistema de gestión al abrir el archivo, ofreciendo en una sola pantalla todos los indicadores clave de desempeño del sistema integrado. Todos los valores del Dashboard se actualizan automáticamente cada vez que se ingresa o modifica un hallazgo en la Matriz_Integrada.
El Dashboard está compuesto por cinco secciones funcionales diferenciadas:

- Sección 1 — Tarjetas KPI: Cinco indicadores clave presentados en tarjetas visuales con código de color. Incluyen el total de requisitos evaluados, el porcentaje global de conformidad, el número de no conformidades mayores, el número de no conformidades menores y el número de oportunidades de mejora. Cada tarjeta utiliza un color de fondo y un color de fuente que corresponde al nivel de riesgo asociado al indicador.
- Sección 2 — Nivel del Sistema: Una tarjeta de diagnóstico que muestra el nivel de madurez del sistema (Crítico, Deficiente, En Desarrollo, Básico, Aceptable o Excelente) que evalúa la presencia de NC Mayores, NC Menores y el porcentaje global de conformidad.
- Sección 3 — Tabla por Capítulo: Una tabla de resumen que muestra, para cada uno de los siete capítulos normativos (4 al 10), el número total de requisitos, la cantidad de cumplimientos, oportunidades, NC menores, NC mayores y no aplica, el porcentaje de conformidad del capítulo y una columna de prioridad de acción (Crítica, Alta, Media o Controlado) calculada automáticamente.
- Sección 4 — Guía de Uso Rápido: Un cuadro informativo con las instrucciones de uso de la herramienta en tres pasos, orientado a nuevos usuarios que acceden al diagnóstico por primera vez.

Esta parte de la herramienta es dinámica y responde instantáneamente a cualquier cambio en la Matriz_Integrada, sin necesidad de intervención manual ni de actualización de tablas dinámicas, lo que garantiza que el Dashboard siempre refleje el estado actual del diagnóstico.

VII. HOJA RESUMEN POR CAPITULO

Esta hoja presenta un desglose analítico del cumplimiento organizado por capítulo normativo. Para cada uno de los siete capítulos auditables de las normas (4 — Contexto de la Organización, 5 — Liderazgo, 6 — Planificación, 7 — Apoyo, 8 — Operación, 9 — Evaluación del Desempeño, y 10 — Mejora), la hoja calcula y presenta el número de requisitos evaluados, la distribución de hallazgos por categoría y el porcentaje de conformidad del capítulo.



Ilustración 10

Las fórmulas de esta hoja utilizan referencias a rangos específicos de la Matriz_Integrada correspondientes a cada capítulo, calculando los conteos mediante SUMPRODUCT con condiciones múltiples y los porcentajes mediante la misma lógica de ponderación descrita en la metodología general. Una fila de totales al final de la tabla agrega los valores de todos los capítulos y recalcula el porcentaje global.

VIII. HOJA OPORTUNIDADES DE MEJORA

Esta hoja proporciona un espacio estructurado para el registro, gestión y seguimiento de los hallazgos que requieren acción, específicamente las Oportunidades de Mejora, las No Conformidades Menores y las No Conformidades Mayores identificadas durante el diagnóstico. Funciona como un plan de acción o registro de mejoras que complementa la Matriz_Integrada.



Ilustración 11

La tabla está diseñada con filas y contiene las siguientes columnas: Literal del requisito afectado, Criterio de Auditoría, Tipo de Hallazgo (con lista desplegable), Descripción del Hallazgo, Oportunidad de Mejora, Responsable, Fecha Compromiso y Estado (con lista desplegable que permite seleccionar entre Pendiente, En Proceso, Cerrada o Verificada). La columna de Estado con lista desplegable permite hacer seguimiento del ciclo de vida de cada acción de mejora, desde su identificación hasta su cierre y verificación de eficacia,

soportando así el ciclo PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar) que subyace ambas normas.

IX. BASE NORMATIVA DE LA MATRIZ DE INTEGRACIÓN

A. Distribución de requisitos por capítulo

La matriz integrada tiene un total de 76 requisitos normativos distribuidos entre los diez capítulos de las normas. La distribución por capítulo refleja la complejidad y extensión de cada sección normativa, siendo el Capítulo 8 (Operación) el más extenso con 27 requisitos, seguido por el Capítulo 7 (Apoyo) con 15.



Ilustración 12

B. Lógica de integración normativa

Cada fila de la Matriz Integrada representa un par de requisitos integrados: el requisito de ISO 9001:2015 y su equivalente o complementario en ISO 45001:2018. La columna de Criterio de Auditoría ofrece una guía integrada de evaluación que sintetiza ambos requisitos, indicando al evaluador qué aspectos verificar en campo para determinar el nivel de cumplimiento del requisito integrado.

Esta lógica de integración tiene fundamento en la Estructura de Alto Nivel compartida por ambas normas, que establece que los requisitos de contexto, liderazgo, planificación, apoyo y mejora son esencialmente los mismos en ambos sistemas, diferenciándose únicamente en el objeto sobre el que aplican (la calidad del producto o servicio en ISO 9001 versus la seguridad y salud de los trabajadores en ISO 45001).

En los casos donde un requisito de ISO 9001:2015 no tiene un equivalente directo en ISO 45001:2018 (principalmente en el Capítulo 8: Operación, que habla de los requisitos específicos de diseño, trazabilidad y liberación de productos propios de la gestión de calidad), se conserva el requisito de ISO 9001 con la indicación de que predomina dicha norma, con un criterio integrador que orienta al evaluador sobre cómo relacionar ese requisito con el contexto general de SST cuando aplique.

X. APORTES, LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

A. Aportes de la herramienta al campo de la gestión.

La herramienta aporta beneficios concretos en tres aspectos fundamentales: técnico, metodológico y organizacional. Desde el punto de vista técnico, integra en un solo instrumento todos los requisitos de dos normas internacionales de alta complejidad, facilitando su análisis de manera estructurada. Además, incluye criterios de evaluación específicos para cada requisito, elaborados a partir de un estudio detallado del contenido normativo. La automatización incorporada no solo garantiza la coherencia en los cálculos, sino que también reduce significativamente los errores que suelen presentarse cuando los diagnósticos se realizan de forma manual.

En el ámbito metodológico, la herramienta propone una escala de evaluación gradual y ponderada que supera los enfoques tradicionales de tipo binario (cumple/no cumple). Reconoce que el cumplimiento de una norma no es un estado absoluto, sino un proceso continuo que puede avanzar desde niveles iniciales de implementación hasta el cumplimiento completo con evidencias sólidas. Esta forma de evaluación permite obtener diagnósticos más precisos y diseñar planes de mejora mejor alineados con la realidad de la organización.

B. Limitaciones de la herramienta

Como todo instrumento de diagnóstico, la herramienta presenta limitaciones que el evaluador debe tener en cuenta para interpretar correctamente sus resultados:

- Dependencia de la experticia del evaluador: La calidad del diagnóstico depende en última instancia del juicio del evaluador al seleccionar el código de hallazgo apropiado. La herramienta no sustituye el conocimiento normativo ni la experiencia en auditoría.
- Ausencia de ponderación diferencial entre requisitos: La herramienta trata todos los requisitos con igual peso en el cálculo del porcentaje global, cuando en la práctica ciertos requisitos como el liderazgo de la alta dirección o la identificación de peligros tienen mayor impacto sistémico que otros.
- Cobertura normativa estática: La herramienta refleja los requisitos de las versiones vigentes de las normas al momento de su desarrollo. Futuras revisiones o nuevas ediciones de las normas requerirán una actualización del instrument.
- Limitación a dos normas: La herramienta está específicamente diseñada para ISO 9001:2015 e ISO 45001:2018. La incorporación de otras normas como ISO 14001:2015 requeriría una expansión estructural del instrumento.

C. Recomendaciones para el uso efectivo

- Realizar el diagnóstico con un equipo multidisciplinario que incluya personas con conocimiento de calidad y de SST para garantizar la adecuada evaluación de todos los requisitos.

- Complementar los datos de la herramienta con entrevistas al personal, revisión de documentos y observación en campo antes de asignar el código de hallazgo a cada requisito.
- Usar la herramienta periódicamente (mínimo anual) para hacer seguimiento a la evolución del sistema y medir el impacto de las acciones de mejora implementadas.
- Involucrar a la alta dirección en la revisión del Dashboard ejecutivo para asegurar que las decisiones de mejora cuenten con el respaldo y los recursos necesarios.
- Actualizar la herramienta cuando se realicen cambios en el alcance del sistema de gestión, en la estructura organizacional o en los procesos evaluados.

XI. CONCLUSIONES

La herramienta de diagnóstico del Sistema Integrado de Gestión desarrollada para las normas ISO 9001:2015 e ISO 45001:2018 constituye un instrumento técnico de alto valor para las organizaciones que buscan evaluar, documentar y mejorar el nivel de implementación de su sistema integrado de gestión de manera sistemática, objetiva y automatizada.

La integración de las dos normas responde a una necesidad, la ausencia de herramientas prácticas que faciliten el diagnóstico integrado sin requerir instrumentos separados para cada norma, eliminando duplicidades y generando coherencia en los hallazgos.

La automatización implementada para el cálculo automático del (%) porcentaje de conformidad, clasificación de hallazgos, agregación por capítulo, diagnóstico del nivel del sistema y visualización en la pestaña de Dashboard, representa un salto cualitativo respecto a los instrumentos de diagnóstico tradicionales basados en matrices estáticas, al convertir el instrumento en una herramienta dinámica que responde en tiempo real a la información ingresada por el evaluador.

La escala de calificación de nueve niveles, con porcentajes ponderados diferenciados para cada categoría de hallazgo, proporciona un grado de precision que supera los modelos binarios y permite diagnósticos más precisos, planes de mejora mejor estructurados y una medición más fiel del estado real del sistema integrado de gestión.

En conclusión, la herramienta desarrollada no solo cumple con los objetivos propuestos, sino que establece las bases para una gestión sistemática y basada en evidencias del Sistema Integrado de Gestión, contribuyendo al fortalecimiento de la cultura de calidad y seguridad en las organizaciones que la adopten.

XII. BIBLIOGRAFÍA

[1] C. L. M. Rodriguez, *EJECUCION DE AUDITORIA INTERNA CON HERRAMIENTA DIAGNOSTICA PARA VALIDAR EL GRADO DE CUMPLIMIENTO DE LOS DEBERES NORMATIVOS DEL SISTEMA DE GESTION EN LA EMPRESA RECURSOS HIDRAULICOS SAS, BASADOS EN LAS NORMAS ISO 9001:2015 E ISO 45001:2015 EN BOGOTA,* BOGOTA: UNIVERSIDAD COOPERATIVA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA DE INGENIERIA INDUSTRIAL, 2020.

[2] J. R. V. Díaz, *Propuesta de diseño de un modelo de sistema integrado de gestión para la mejora del control operacional del proceso de ensamblaje de motocicletas basado en los estándares internacionales ISO 9001:2015 e ISO 45001:2018,* Quito, 2021.

Building a satellite catalog and SDA system from publicly available sources

Juan Camilo Beltrán-Garnica
Systems and Computing
Engineering Department
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
jc.beltrang1@uniandes.edu.co

Danna Lucia Castillo-Palacios
Systems and Computing
Engineering Department
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
d.castillop@uniandes.edu.co

David Camilo Ocaña
Jefatura de Operaciones
Espaciales
Fuerza Aeroespacial Colombiana
Cali, Colombia
david.ocana@fac.mil.co

Mateo Cubides
Jefatura de Operaciones
Espaciales
Fuerza Aeroespacial Colombiana
Cali, Colombia
mateo.cubides@fac.mil.co

Mario Linares-Vásquez
Systems and Computing
Engineering Department
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia
m.linaresv@uniandes.edu.co

***Abstract*—Given ongoing technological advancements and strong economic incentives, space has become increasingly accessible to both governmental and private actors. In this evolving landscape, characterized by a growing number of objects in Earth's orbit, a comprehensive understanding of the space environment is essential for any nation. However, publicly available data sources are often fragmented, heterogeneous, and partially redundant, making the construction of unified and reliable space assets catalogs a challenging task.**

In operational contexts such as the ones conducted by the Colombian Aerospace Force (COLAF), this data integration process is currently performed manually, requiring analysts to consult multiple sources and then consolidate information, which limits scalability and increases the risk of inconsistencies. To address this problem, this work presents the design and implementation of a satellite catalog (SATCAT) by integrating multiple open sources, including Space-Track, CelesTrak, SatNOGS, SATDB, Nanosats, and DISCOSWeb, into a centralized architecture.

The proposed system implements an automated data processing pipeline that includes data extraction through APIs and web scraping, parsing and normalization of heterogeneous formats, deduplication based on identifiers such as NORAD ID, and storage in a PostgreSQL database, with access provided through a queryable API. The resulting architecture provides a scalable foundation for SDA systems based on publicly available data, supporting technological autonomy and contributing to space sovereignty.

***Index Terms*—Space Domain Awareness (SDA), Satellite Catalog (SATCAT), data extraction.**

I. Introduction

Since the mid-2010s, Earth's orbital environment has experienced a sustained and rapid increase in the number of active satellites, growing from fewer than two thousand operational spacecraft to more than ten thousand within less than a decade. This expansion reflects the broader growth of the global space sector, driven by economic incentives and the increasing reliance on space-based services. As satellite-enabled capabilities, such as communications, navigation, Earth observation, and scientific research, continue to demonstrate value across multiple domains, a diverse range of actors, including universities, research institutions, and private corporations, have progressively expanded its share in space activities over recent years [3].

In addition to economic and strategic motivations, this sustained growth is driven by a combination of technological and operational developments. The refinement and standardization of small satellite platforms, including nanosatellites and *CubeSats*, have significantly reduced both production costs and development timelines, enabling more frequent and accessible access to space. In parallel, a shift in mission architecture toward distributed systems has promoted the deployment of large-scale satellite constellations in place of traditional single-satellite approaches. This paradigm is exemplified by the emergence of commercial megaconstellations led by major industry actors, such as *Starlink*, which have substantially increased launch rates and on-orbit satellite density. Collectively, these developments have led to a significant increase in the density and complexity of the orbital environment [3].

The significant increase on space assets orbiting the Earth (see Figure 2) has led to some challenges; for instance, the elevated probability of collisions, which contributes to the continued accumulation of space debris and further intensifies orbital congestion. There are other aspects inherent to satellite operations, such as launch and re-entry activities, gain increasing relevance as their frequency rises, introducing additional risks like those associated with uncontrolled re-entries and their potential impact. These trends are accompanied by emerging environmental considerations, especially concerning atmospheric emissions and material deposition resulting from sustained space activity. As the orbital environment becomes progressively more constrained and congested, with hundreds of millions of untracked debris fragments traveling at velocities exceeding 7 km/s in LEO orbit, the risk of collision

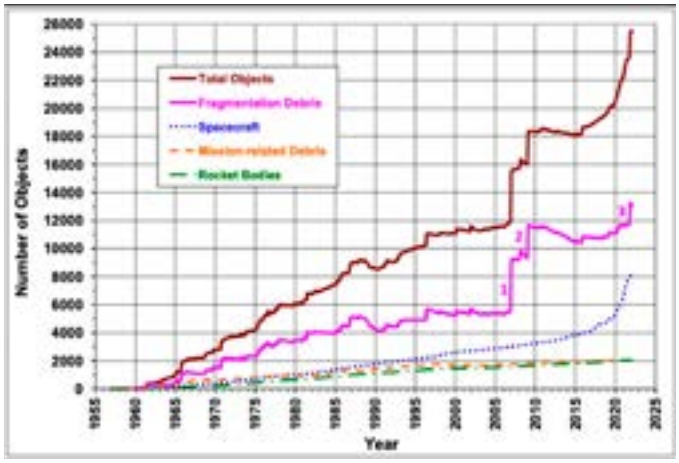


Fig. 1. Historical increase of the cataloged objects.

cascades and the operational burden of collision avoidance maneuvers increase substantially, raising both the cost and technical difficulty of mission planning and the continued operation of space assets [2].

In this context, nations are responsible for ensuring the safe and sustainable conduct of space activities carried out under their jurisdiction, encompassing both governmental and non-governmental actors. This responsibility entails continuous monitoring of the space environment to ensure operational safety. These functions are traditionally associated with Space Situational Awareness (SSA), which focuses on the detection and tracking of objects in orbit [2]. This concept can be further extended to Space Domain Awareness (SDA), which emphasizes the integration of diverse data sources to support decision-making processes by providing timely and actionable information for identifying, characterizing, and attributing threats and hazards within the space domain [8].

In Colombia, the responsibility for these functions lies within the *Colombian Aerospace Force* (COLAF), which is tasked with ensuring that SDA activities are conducted reliably, continuously, and with high data integrity. This includes the systematic acquisition, verification, and processing of information from multiple sources to support operational decision-making. In practice, this requires the continuous monitoring and validation of available data, which serves as a key input for maintaining an accurate and up-to-date understanding of the space environment.

Currently, many of these activities rely heavily on manual processes, resulting in increased operational workload, higher costs, and longer processing times. This reliance on manual intervention not only introduces inefficiencies but also increases the likelihood of human error, potentially affecting the reliability and timeliness of the derived information. Furthermore, the need to dedicate significant resources to routine tasks limits the ability of the COLAF to expand their operational capabilities or to focus on higher-level analytical functions.

The data landscape itself also presents significant limitations. Although numerous open-source data repositories are available, they are often fragmented, heterogeneous, and lack standardization, complicating their integration into cohesive operational workflows. While commercial platforms offer alternative solutions, they frequently rely on "black-box" architectures that limit transparency and hinder rigorous data auditing. Moreover, such solutions can introduce structural dependencies, exposing national space operations to external licensing constraints and the potential risk of unilateral service disruptions.

To address these limitations, the COLAF and *Universidad de los Andes* proposes the *Orion* initiative, an SDA software platform that will provide support SDA tasks with automatic open-source data ingestion and processing. In this paper, we present the design and development of the satellite catalog (SATCAT) module within *Orion*. SATCAT refers to a structured repository of space objects and their associated orbital and descriptive metadata. This module enables the characterization, tracking, and grouping of space objects, serving as a foundational component for subsequent SDA functionalities.

The *Orion* system incorporates an automated data processing pipeline that ingests information from multiple open sources, followed by normalization and deduplication of heterogeneous records. By consolidating these data into a centralized SQL database, the platform ensures consistent and reliable data for decision-making. *Orion* is implemented in Rust to leverage its high-level programming abstractions, computational efficiency, and security, which are essential for quick development while handling high-volume data, such as thousands of daily new orbital elements. The Front-end was developed on the React framework using Figma's AI agents for design and Figma-to-code tool to enable rapid prototyping. Furthermore, its in-house development ensures transparency and auditability in data processing workflows, while reducing reliance on external commercial solutions and strengthening national operational and technological autonomy.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 provides the operational context of SDA, including its core functions and requirements; Section 3 reviews existing open sources, tools and SDA systems, including both public and commercial solutions; Section 4 describes the architecture and implementation process of the SATCAT module, it details the development methodology, data processing pipeline, and key design decisions underlying the implementation; Section 5 presents the outcomes of the system implementation, including code quality observations and practical insights; finally, Section 6 outlines future extensions and improvements to the platform, including scalability considerations, additional functionalities, and integration with other SDA components.

II. Context

The implementation of SDA within the COLAF represents a strategic shift toward autonomous and continuous supervision of national space activities. Rather than a mere extension of tracking protocols, this capability serves as an essential framework for identifying, characterizing, and attributing events that impact the orbital environment [2], [8]. To operationalize this

oversight, SDA integrates heterogeneous data sources through a continuous process of fusion and analytical assessment. This approach reconciles disparate inputs into a consistent representation of the orbital population, providing the necessary depth to distinguish between environmental hazards and man-made actions, thereby transforming technical observations into actionable situational knowledge.

From an operational standpoint, SDA is defined as comprehensive knowledge and characterization of the space environment that encompasses the ability to detect, track, identify and understand the nature of any factor that could impact space operations. This discipline is structured around a continuous operational assessment cycle through three primary pillars: multi-source integration, data fusion, and analytical assessment [8]. Integration involves systematic acquisition of data, while fusion reconciles these inputs to maintain a consistent and high-fidelity representation of the orbital population [2]. The analytical layer, in turn, encompasses the tasks of understanding the given context to help decision-making processes. This framework is executed through a series of interconnected operational tasks that address specific facets of the space domain.

Within this operational structure, the satellite catalog (SATCAT) constitutes a dynamic and centralized repository tasked with maintaining an authoritative registry of all artificial objects deployed into Earth's orbit. Modern technical standards, informed by the practices of NASA, the European Space Agency (ESA), and USSPACECOM, dictate an inclusive scope that extends beyond active payloads to incorporate spent rocket bodies, mission-related hardware, and fragmentation debris. To maintain global traceability in an increasingly congested environment, each entry is uniquely identified through standardized sequential markers, such as the NORAD ID, and assigned an international COSPAR designator. The SATCAT inventory must integrate high-fidelity technical content, including traditional Two-Line Elements (TLE), comprehensive launch metadata, and parameters necessary for the holistic characterization of space assets [5], [9]. The operational utility of a modern catalog depends on a robust data fusion architecture capable of reconciling fragmented and heterogeneous records from disparate sources into standardized, interoperable structures. The classification of objects based on their functional status, mission health, and orbital behavior provides the foundation required for strategic assessment and the responsible supervision of the space domain [10].

Complementing object tracking, Space Weather monitoring addresses dynamic environmental factors that directly influence orbital behavior and hardware integrity. This involves the continuous observation of solar phenomena, such as solar flares and Coronal Mass Ejections (CMEs), which induce thermospheric heating and increase atmospheric density in Low Earth Orbit (LEO) [12], such variations can alter satellite trajectories through increased drag. In addition, operational assessments enable the prediction of high-energy particle events to mitigate hardware risks such as Single Event Upsets (SEUs) and solar array degradation [11], [14].

Also in a SDA context, the operational management of re-entry events ins relevant; it addresses the atmospheric return of decommissioned spacecraft and spent rocket bodies as a critical safety task. These events are categorized into controlled re-entries—executed through directed propulsion—and uncontrolled re-entries driven by natural orbital decay [15]. Tracking of altitude loss, the estimation of atmospheric entry windows and geographical impact zones, which require tight integration with space weather data to account for variable drag conditions.

A comprehensive SDA capability also incorporates Casualty Risk Assessment (CRA) through the modeling of fragmentation and ablation processes to determine the survivability of large components during atmospheric descent. This operational cycle concludes with notification protocols and post-event verification, ensuring compliance with international liability frameworks and the protection of terrestrial assets, Together, these functions constitute a fundamental component of the operational responsibilities carried out by national space agencies and organizations responsible for space operations [16].

Another critical component of SDA is the evaluation of potential threats, which focuses on the identification and characterization of orbital anomalies, proximity operations, and collision risks. By providing early warnings of conjunction events, this capability supports the timely coordination of collision avoidance maneuvers, thereby protecting strategic space-based infrastructure. This commitment fosters international transparency and mutual assistance, reinforcing the collective duty to safeguard the space domain as a global common for long-term sustainability.

Among the threats present within the electromagnetic spectrum domain, the need to monitor GNSS integrity has become increasingly critical due to the growing impact of radio-frequency interference and electronic jamming on space-enabled services. These spectral disruptions can severely degrade or disable system performance without direct physical interaction [6]. Consequently, monitoring and attribution capabilities are essential for maintaining the continuity of precise positioning and timing services, ensuring their resilience against unintentional interference or deliberate electronic countermeasures.

The integration of these functional pillars ranging from the maintenance of authoritative records to the predictive analysis of environmental and mission specific risks constitutes a fundamental component of modern SDA and space operations. As orbital activity continues to increase, the growing complexity of the space environment demands the continuous correlation and analysis of heterogeneous data sources to support the identification of threats, the assessment of operational risks, and the characterization of orbital behaviors. In this context, the effective management and exploitation of space domain data provide decision makers with a reliable and auditable understanding of the operational environment, strengthening the capacity to anticipate hazards, protect critical assets, and support resilient space operations at the national and interna-

tional levels.

III. Related Work

A. Data Sources and Repositories

The efficacy of SDA is inherently dependent on the quality, diversity, and integration of the underlying data. Current efforts to characterize the orbital environment rely on a multifaceted ecosystem comprising sensor-fed repositories, institutional registries, and specialized community databases, as summarized in Table I. Although these sources provide essential inputs, ranging from foundational orbital elements to detailed metadata, they often vary significantly in technical scope, update frequency, and structural consistency.

At the core of this ecosystem, primary orbital data is fundamentally anchored by governmental and military providers, where Space-Track [9], leveraging the global *Space Surveillance Network* (SSN), serves as the authoritative repository for legacy Two-Line Elements (TLE) and modern Orbit Mean-Motion Messages (OMM). To bridge the gap between military restricted data and public research requirements, CelesTrak [29], managed by the *Center for Space Standards & Innovation* (CSSI), acts as a critical node for data standardization. Beyond redistributing SSN elements, CelesTrak provides high-reliability datasets including space weather indices and supplemental orbital data for special-interest constellations, offering open access through standardized REST interfaces that facilitate automated retrieval. While these datasets provide the baseline for positional characterization, institutional repositories such as the ESA DISCOSweb [30] and the NASA NSSDC Master Catalog [31] provide the technical granularity required for debris mitigation and safety assessments. These archives offer detailed metadata like launch vehicles and physical cross-sections.

Beyond positional data, the strategic characterization of orbital assets is further refined through curated datasets. The Union of Concerned Scientists (UCS) Satellite Database provides high-fidelity metadata on ownership, operational intent, and orbital classification specifically for active spacecraft [19]. By cross-referencing information from official registries and industry announcements, it enables the identification of actors and the assessment of functional health, which are essential for the attribution of orbital events. These strategic insights are increasingly integrated with regulatory data from the International Telecommunication Union (ITU), which serves as the global authority for electromagnetic spectrum management. Accessing ITU filings is critical for spectral coordination and the identification of "electronic debris", objects that, while physically intact, are operationally incapacitated due to frequency interference or lack of license compliance [3].

In parallel, the commercial sector introduces higher-precision data products that complement traditional catalogs. Specialized providers such as LeoLabs offer a high-fidelity alternative to legacy government datasets by providing radar-derived state vectors and Vector Covariance Messages (VCM). These commercial data streams address the inherent precision gaps of traditional TLEs by incorporating the uncertainty quantification necessary for rigorous collision probability assessments and proximity analysis. However, a primary technical and operational hurdle is the accessibility of these products. Unlike public-access repositories, commercial platforms operate under proprietary Software-as-a-Service (SaaS) models. Access to high-precision orbital products, including specialized ephemerides and real-time maneuver alerts, is strictly restricted behind tiered membership structures and subscription-based APIs, requiring formal contracts or non-disclosure agreements (NDAs).

Complementing these sources, community-driven and research-based initiatives provide a critical layer of transparency and specialized technical depth for specific orbital niches. The NanoSAT Database [20] archives comprehensive parameters such as mission status, technical classification (e.g., 1U, 3U), and launch mass, alongside specific deployer information. By the other hand, sources like the ETH Zürich SATDB serves as an orbital element archive, performing the hourly collection and archival of Two-Line Elements (TLE) retrieved from CelesTrak to maintain a robust historical series of orbital states since March 2023 [21]. These are further supplemented by initiatives like the SatNOGS Network [28] , which provides crowdsourced radio-frequency observations and decoded telemetry, offering an independent layer of operational transparency for validating satellite health through decentralized ground station networks.

B. Existing Solutions

The current landscape of software solutions is characterized by a clear divide between high-fidelity commercial platforms, specialized institutional systems, and modular open-source initiatives. While industrial-grade tools provide comprehensive capabilities for mission design and analysis, their high cost and closed-source nature limit their adaptability for the development of autonomous aerospace systems. In contrast, community-driven solutions and decentralized repositories offer more accessible alternatives for real-time tracking and ground station operations. Analyzing these existing tools helps identify both the functional requirements and the limitations that shape current SDA software ecosystems.

Among high-fidelity simulation platforms, Ansys Systems Tool Kit (STK) is widely recognized as an industry standard for multi-domain mission analysis. STK provides advanced capabilities for orbit propagation, link budget analysis, and sensor coverage modeling, enabling detailed visualization of interactions between space, ground, and atmospheric segments. Its computational framework supports high-precision numerical propagators and complex maneuver modeling, making it suitable for mission planning and operational validation. However, its proprietary nature, high licensing costs, and steep learning curve limit its accessibility, particularly in academic or resource-constrained environments. These factors reduce its suitability for rapid prototyping and for the development of flexible, extensible SDA architectures [22].

In the context of institutional and defense-oriented systems, the Holistic Risk and Uncertainty Reduction System (HO-

TABLE I
CLASSIFICATION OF DATA SOURCES

Provider / Source	Category	Access Method	Primary Data Contribution
Space-Track (USSPACECOM)	Governmental	API (REST)	Authoritative TLE/OMM, SATCAT, and Decay Events
CelesTrak (CSSI)	Institutional	API / Web	Standardized TLEs, Space Weather, and Supplemental data
ESA DISCOSweb	Institutional	API (OAuth2)	Launch vehicles, object relationships, and design specs
UNOOSA	International	Web / Bulk	Official treaty registration and state notifications
ITU (SpaceExplorer)	International	Web / SNS	Radio-frequency filings and orbital slot coordination
LeoLabs	Commercial	API (REST)	High-precision radar state vectors and covariance matrices
UCS Satellite Database	NGO / Curated	Bulk (XLS/TXT)	Operational status, intent, and operator metadata
SatNOGS DB	Crowdsourced	API (REST)	Community-driven RF observations and telemetry data
NanoSAT DB	Research	Web / Bulk	Comprehensive CubeSat and nanosatellite specifications
SATDB (ETH Zürich)	Academic	API (REST)	Historical TLE time-series and frequency archives
NASA NSSDCA	Governmental	Web / Dataset	Scientific mission metadata and master catalog archive

RUS), developed by the Brazilian defense company Saipher, represents a specialized platform for SSA and SDA. The system integrates multi-source data to support decision-making processes related to both Space-Earth and Space-Space operations, with a focus on risk mitigation and uncertainty reduction. Its architecture includes modules for civil aviation safety and military threat detection, enabling the identification of anomalies and potentially hostile activities in orbit. However, due to its classification as a strategic defense product, access to HORUS is restricted under B2B and B2G contractual frameworks, primarily serving governmental and military entities. This restricted access limits its integration into independent or open SDA systems [6].

Within the open-source ecosystem, Gpredict is a widely used application for real-time satellite tracking and orbit prediction. Based on SGP4/SDP4 propagation models and TLE data, it enables the visualization of multiple satellites simultaneously in a modular environment. Its integration with the *Hamlib* library allows direct interaction with ground station hardware, including antenna rotators and radio systems, supporting automated Doppler correction and tracking. Despite its accessibility and low computational requirements, Gpredict lacks the analytical depth required for advanced SDA applications. In particular, its reliance on TLE data and simplified models limits its use for high-precision tasks such as maneuver detection or collision risk assessment [23].

Additional community-driven efforts focus on the automation of ground station operations. One example is the Ground Station framework developed by S. Goudelis, which provides a Python-based orchestration system for satellite tracking and signal acquisition. By integrating Software-Defined Radio (SDR) interfaces with antenna control systems, the framework enables automated reception and decoding of telemetry data from satellites such as NOAA and Meteor. While this approach demonstrates high flexibility for localized data acquisition, it is limited in scope and does not address the broader challenges of multi-source data integration and normalization required for comprehensive SDA systems. Nevertheless, it highlights the potential of low-cost, modular architectures for extending access to space data and supporting distributed sensing capabilities [24].

C. Libraries

There are several libraries for performing high-precision astrodynamics calculations. Within the Python ecosystem, Skyfield [7] has emerged as a high-precision library for astronomy and satellite tracking, distinguished by its adherence to modern standards and independence from legacy C-based dependencies. Developed by Brandon Rhodes, Skyfield implements the *Fundamental Arguments* of the *International Astronomical Union* (IAU) and leverages NASA JPL ephemerides for planetary computations. For orbital monitoring, it provides a robust implementation of the SGP4 propagation model, enabling transformations between the *True Equator Mean Equinox* (TEME) frame and terrestrial reference systems such as ITRS. A key technical advantage lies in its rigorous handling of time scales, including UTC, TAI, and TT, ensuring that the microsecond-level precision required for ground station synchronization is preserved throughout the propagation pipeline [7].

In contrast, for high-performance mission analysis and navigation, Nyx Space represents a state-of-the-art astrodynamics library implemented in Rust. Nyx leverages the safety guarantees and concurrency model of the Rust type system to provide a high-fidelity computational engine capable of executing large-scale simulations and orbital determination processes. Compared to Python-based frameworks, Nyx is optimized for execution efficiency and thread safety, making it well-suited for backend systems that require real-time processing of large datasets. The library supports advanced force models, including high-order gravity fields, atmospheric drag, and solar radiation pressure, providing the numerical stability required for both deep-space navigation and precise Low Earth Orbit (LEO) propagation. Its modular architecture further enables the integration of custom force models, supporting the development of extensible and auditable aerospace software systems [25].

IV. DESIGN AND DEVELOPMENT PROCESS

Within *Orion*, the implemented SATCAT module provides a centralized environment for the visualization, management, and analysis of orbital object information. It incorporates authentication and authorization mechanisms to ensure controlled access to system functionalities and data. Through

an interactive catalog interface, operators can explore the complete registry of tracked objects, access detailed information for individual entries, and perform advanced filtering operations through backend-supported query mechanisms. The system includes integrated scripts for loading static information repositories like the UCS Satellite Database or the Two-Line-Element (TLE) historic database from Space-Track, while actively retrieving information from six open sources, CelesTrak, Space-Track, SATDB (ETH Zürich), SatNOGS, NanoSAT DB and ESA DISCOSweb, it also maintainis traceability of all updates and modifications applied to each object. Furthermore, it supports orbital propagation using the most recent orbital element sets available in the database and provides pass prediction capabilities relative to any location on Earth.

Development was conducted in close collaboration with both technical team members and end-users, enabling continuous feedback throughout the process. This iterative approach facilitated the refinement of requirements and ensured that the system remained aligned with operational needs. As a result, the evolving design consistently reflected practical use cases and prioritized the delivery of actionable value for COLAF operators. From an implementation perspective, the system was developed incrementally from the ground up. The process began with the creation of database artifacts, followed by a detailed examination of each selected data source to determine access methods and data structures. This included identifying whether data could be retrieved via APIs or required web scraping techniques, as well as defining standardized mechanisms for data ingestion. Subsequently, data provider components and the data access layer were implemented, enabling structured interaction with the underlying database. Finally, an orchestration component was developed to coordinate data flows across the system, alongside frontend prototyping efforts used to validate functionality and support iterative testing.

The system adopts a modular, microservices-based architecture, in which individual functional components are developed as independent services. Every module exposes it's services as a set of APIs for interoperability across modules and enabling their integration within a unified frontend interface. This API driven design promotes flexibility in service composition as well as their technology stack, while ensuring that individual components can evolve independently without impacting the overall system.

A. SATCAT architecture

The module follows a layered architecture that separates data acquisition, orchestration, and persistence (See Figure 2. Data ingestion is handled by a set of provider components, each responsible for interfacing with a specific external source. These providers implement a service adapter pattern, exposing a unified API while transforming heterogeneous source data into a common internal format. The processed data is managed through a dedicated data access layer connected to a PostgreSQL database, selected for its strong data integrity, reliability, and structured querying. While certain NoSQL

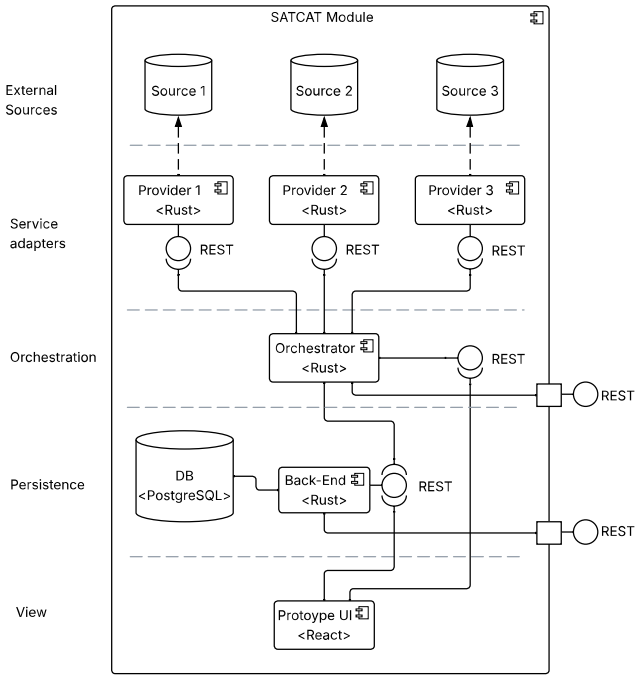


Fig. 2. Component diagram of the SATCAT module.

alternatives may offer performance advantages in specific scenarios, an SQL-based approach was preferred due to the highly structured nature of the data and the need for consistent relational integrity.

An orchestration component coordinates the overall data flow, implementing scheduled tasks for periodic data retrieval and processing. This design aligns with an ETL-inspired architecture, in which data is extracted from multiple sources, transformed into a standardized representation, and loaded into a centralized repository, a sequence diagram for the update of an object from a given provider is in Figure 3. Additionally, the orchestrator decouples data acquisition from downstream system components, including the frontend. This architecture design greatly simplifies the addition of other sources with new providers in the future and minimal integration in the orchestrator component. A component diagram of the whole module can be seen in Figure 2.

All back-end components were implemented using a standard Rust-based technology stack for the `axum` web service framework [27]. It was selected due to its ease of development and strong integration within the Rust ecosystem. These characteristics facilitate rapid development while maintaining high performance, characteristic of the Rust programming language, making it well-suited for this specific use-case.

Each provider follows a structure that separates request handling, data retrieval, and data transformation concerns into different logical submodules. The interface submodule is implemented through a set of handler functions and a router, defined within a dedicated handler folder, which expose HTTP endpoints. These handlers are responsible for processing incoming requests and coordinating interactions with the

underlying layers, as well as processing errors and setting appropiate HTTP status on response.

Data acquisition is encapsulated within a query service submodule, which utilizes the `reqwest` library to perform HTTP requests to external sources. It defines a generalized query function, along with wrappers tailored to different API endpoints or web resources, thereby abstracting the specifics of each different endpoint and providing a consistent interface for data retrieval.

Finally, data transformation is handled within a parser submodule, which implements the logic required to convert external data into a standardized internal representation. This includes mapping raw responses into strongly typed Rust structures, ensuring consistency and type safety. For sources that require web scraping, `scraper` is employed as an HTML parsing tool, based on CSS selector querying mechanisms to extract all relevant information. This separation of concerns improves the maintainability and extensibility of each provider.

The orchestrator follows a similar separation-of-concerns design as the provider components, while extending it to support additional functional requirements related to coordination and system control. It incorporates analogous submodules for request handling, data retrieval, and processing, but also introduces specialized interfaces for managing orchestration-specific configurations. These include endpoints for defining automated task schedules, configuring provider-specific settings, and selecting active data sources.

The data retrieval functionality follows the same structural pattern as in the providers, however, in this context, the query service submodule interacts exclusively with provider APIs rather than external sources. In addition, a dedicated repository submodule is introduced to encapsulate all interactions with the data access layer, providing a clear abstraction over database operations and reinforcing separation between business logic and persistence concerns.

The orchestrator also exposes a Server-Sent Events (SSE) interface to enable real-time communication with the front-end. This mechanism allows operators to monitor the execution of long-running automated tasks and seeing eventual errors such as processing errors, source unavailability, or changes in external data formats. Event generation and management are encapsulated within a dedicated submodule. Furthermore, the Data Transfer Object (DTO) pattern is employed to standardize data structures across component boundaries, facilitating the consistent transformation of entities from providers through all components.

Task execution is managed through a dedicated scheduling submodule responsible for coordinating periodic data updates. These tasks are categorized based on update frequency and data characteristics, enabling differentiated handling of high-frequency and low-frequency information updates. Tasks can be triggered automatically according to predefined schedules or initiated manually by operators through exposed endpoints, following a fire-and-forget execution model.

The data access component is implemented using the `SeaORM` framework [26], which provides an abstraction layer

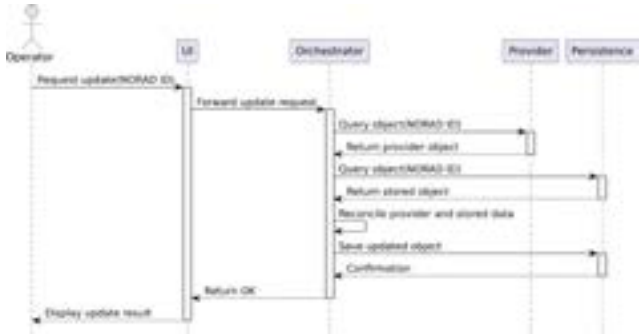


Fig. 3. Update an object from a source scenario sequence diagram through module layers.

for constructing and executing queries over the underlying SQL database. It's design follows a conventional data access layer architecture, organized into handler, service, and persistence tiers, with the latter implemented through Data Access Objects (DAOs) provided by the ORM. `SeaORM` was selected for its support of dynamic query construction and its alignment with established ORM frameworks, such as `SQLAlchemy`.

Both the data access layer and the orchestrator incorporate authentication and authorization mechanisms based on JSON Web Tokens (`JWT`), with role-based access control assigned to each user. Middleware components are employed to parse cookie contents, validate tokens, and enforce access control policies at the endpoint level. User state, token issuance and validation are handled by the data acces component, while the orchestrator just performs token verification using a shared `JWT` secret.

B. *Front-end development*

The front-end of *SATCAT module* is a Single Page Application (SPA) developed with `react 18` and `vite`, utilizing a component-driven architecture based on `radix UI` and `tailwind CSS`. To optimize the UI/UX, the development followed an AI-assisted workflow; initial mockups were designed in Figma, and the foundational React boilerplate was generated via Figma Make. This allowed for rapid iteration and a modular layout that integrates seamlessly with the back-end.

The system offloads heavy computational tasks to the client-side by embedding the `satellite.js` library, which executes SGP4 orbital propagation to calculate real-time coordinates, ground tracks, and visibility passes. Geospatial visualization is implemented through `react-leaflet`, using custom hooks for map state synchronization and interactive overlays for ground assets. Navigation and security are managed via React Router, with JWT-based authentication enforcing role-based access control (RBAC) across all modules. This architecture effectively decouples data visualization from backend orchestration, ensuring low latency during high-frequency satellite tracking and complex analytical tasks.

V. Results

The results of this work include the development of multiple architectural artifacts and corresponding codebases for the

proposed module, which complies with every functional and non-functional requirement defined in earlier stages. Each component incorporates comprehensive endpoint documentation generated using the `utoipa` library, enabling Swagger-compatible visual interfaces for API exploration and validation. Some views of the prototype UI are showcased in Figure 4 allong with some current database metrics in Figure 5.



Fig. 4. SATCAT interface views: SATCAT list (1); task panel (2); ISS detail (3); and orbital propagation module(4).

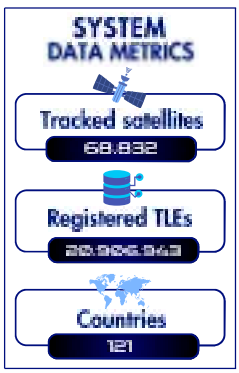


Fig. 5. Database metrics (May 10th, 2026): tracked assets, compiled orbital elements, and international coverage.

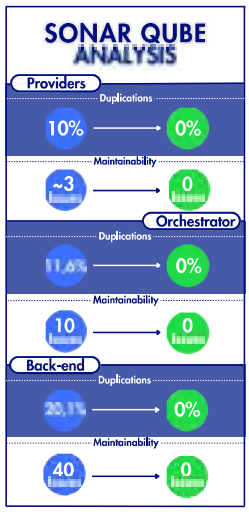


Fig. 6. SonarQube metrics summary for the SATCAT module.

Code quality assessment was conducted using the SonarQube Community Edition tool on all Rust-based components. This analysis leverages the `clippy` linting tool to identify common issues, suggest structural improvements, and enforce best practices. Additional quality attributes, including security, reliability, and maintainability, were also evaluated. Each component was analyzed independently, and all identified issues were addressed to ensure compliance with SonarQube quality gate standards, with the exception of code coverage metrics.

The performed analyses reported no security or reliability issues across any of the evaluated components. The primary findings were associated with code duplication and maintainability concerns. In particular, duplicated code was identified in several query and request handling structures shared across providers. Due to the relatively small size of some components, even limited repetition resulted in comparatively high duplication percentages. Additional maintainability issues were detected in functions exhibiting elevated cognitive and cyclomatic complexity, primarily on the data access layer and orchestration routines.

These issues were addressed through the introduction of higher levels of abstraction and the consolidation of repeated logic into reusable structures and utilities. This refactoring process reduced code repetition, improved readability, and simplified control flow, contributing to a more maintainable and extensible codebase overall. The code quality improvements are summarized in Figure 6.

Finally, the system was validated through end-user testing on representative operational use cases. This validation process confirmed the practical applicability of the module and its ability to support SDA-related tasks in realistic scenarios.

VI. Future Work and Conclusions

While the developed module incorporates static code analysis practices, a comprehensive testing strategy remains to be fully implemented. Work in the near future will focus on the development of a complete testing suite, including unit, integration, system and acceptance tests. This is particularly

relevant given the high degree of interdependence between system components, where reliable interaction across modules is critical, particularly for system mantainability. The introduction of systematic testing will not only improve many software attributes but also enhance static analysis processes through the incorporation of code coverage metrics.

From a performance perspective, further work will be directed toward micro-optimization of the codebase, particularly in the context of long-running and resource-intensive tasks. Optimizing data processing routines, improving concurrency handling, and reducing overhead in scheduling and orchestration mechanisms are expected to enhance overall system efficiency and scalability.

Another important aspect is the deployment of the system within on-site operational infrastructure. This phase will enable validation under real-world conditions, allowing for the identification of issues that may not emerge in development or controlled testing environments. In particular, deployment will enables the evaluation of system performance, reliability, and interoperability with existing infrastructure.

As previously discussed, the SATCAT module serves as a foundational component for other system modules by enabling core functionalities related to precise space object tracking, information on foreign space assets capabilities and re-entry analysis. Consequently, ongoing efforts will be directed toward the continued development and integration of additional modules within the same framework, with multiple teams contributing in parallel to expand system capabilities.

The front-end, while currently implemented as a high-level prototype, requires further refinement in terms of visual design and structural consistency. Further work relies on improving interface organization, interaction patterns, and the adoption of coherent design metaphors to enhance usability and user experience. Establishing a unified design language across the initiative is also an objective, ensuring consistency and intuitiveness as additional modules and functionalities are integrated.

This project emphasizes not only real-time analysis but also the collection and management of historical data, future developments could also focus on extending analytical capabilities. In particular, the availability of structured historical datasets is expected to support the implementation of more advanced and accurate predictive models, enhancing the system's ability to characterize and anticipate space domain behaviors.

In summary, this work presents the design and implementation of a SATCAT platform that fulfills the defined functional and operational requirements for SDA in this category. Beyond its immediate contributions, the developed system establishes a robust foundation for the continued evolution of SDA capabilities. By emphasizing modularity, transparency, and the use of open-source data, the platform supports the development of scalable and auditable solutions, contributing to increased technological autonomy. Furthermore, the architectural and methodological approaches adopted in this work provide a basis for future extensions, facilitating the integration of additional modules, advanced analytical tools, and enhanced decision-support capabilities. Collectively, these contributions represent a step toward strengthening national capacity in the space sector.

References

[1] Secure World Foundation, *Handbook for New Actors in Space*, 2nd ed., 2024.
[2] World Economic Forum, "Space Situational Awareness (SSA) Data and Information Sharing Principles," Briefing Paper, Sep. 2024.
[3] International Telecommunication Union (ITU), *Handbook on Small Satellites*, 2023 ed.
[4] R. Schmude, Jr., *Artificial Satellites and How to Observe Them*. Springer, 2012.
[5] NASA Orbital Debris Program Office, "Measurement and Modeling of the Orbital Debris Environment," NASA Technical Report, 2024.
[6] Saipher ATC, "HORUS: Space Traffic Management System Technical Overview," White Paper, 2023.
[7] B. Rhodes, "Skyfield: High precision research-grade astronomy for Python," 2026. [Online]. Available: https://rhodesmill.org/skyfield/ [Accessed: May 4, 2026].
[8] M. Jah, "Space Surveillance, Tracking, and Information Fusion for Space Domain Awareness," NATO Science and Technology Organization, STO-EN-SCI-292, 2016.
[9] U.S. Space Command, "Space-Track.org: The Source for Space Surveillance Data," 2024. [Online]. Available: https://www.space-track.org/ [Accessed: May 4, 2024].
[10] CCSDS, "Orbit Data Messages," Blue Book 502.0-B-3, 2023.
[11] NOAA, "Space Weather Prediction Center (SWPC) Operational Scales," 2024. [Online]. Available: https://www.swpc.noaa.gov/ [Accessed: May 4, 2024].
[12] JAPCC, "Space Weather as a Core Capability for Space Domain Awareness," 2023.
[13] ESA, "Space Weather Service Network: Protecting Infrastructure," 2024. [Online]. Available: https://swe.ssa.esa.int/
[14] NASA, "Space Weather Program: Science and Applications for Prediction," 2024.
[15] ESA, "Space Safety Programme: Re-entry and Debris Mitigation Guidelines," 2024. [Online]. Available: https://www.esa.int/Space-Safety
[16] U.S. Space Command, "Re-entry Assessment Protocols and Global Notification Procedures," Fact Sheet, 2024.
[17] U.S. Space Command, "Launch Collision Avoidance (LCOA) Analysis and Notification Procedures," 2024.
[18] FAA, "Integration of Space Operations into the National Airspace System," 2024.
[19] Union of Concerned Scientists (UCS), "Satellite Database," 2026. [Online]. Available: https://www.ucs.org/resources/satellite-database
[20] E. Kulu, "Nanosatellite & CubeSat Database," 2026. [Online]. Available: https://www.nanosats.eu [Accessed: May 4, 2026].
[21] ETH Zürich, "Satellite Database (SATDB)," 2026. [Online]. Available: https://satdb.ethz.ch
[22] Ansys Inc., "Systems Tool Kit (STK) Analysis Software," 2026. [Online]. Available: https://www.ansys.com/products/missions/ansys-stk
[23] A. Cucinotta, "Gpredict: Real-time satellite tracking and orbit prediction," 2026. [Online]. Available: https://gpredict.oz9aec.net
[24] S. Goudelis, "Ground-Station: Low cost satellite ground station with automated tracking and receiving," 2026. [Online]. Available: https://github.com/sgoudelis/ground-station
[25] C. Rabotin, "Nyx: High-fidelity astrodynamics library in Rust," 2026. [Online]. Available: https://github.com/nyx-space/nyx
[26] SeaQL, "SeaORM v2.0.0-rc," GitHub Repository, 2026. [Online]. Available: https://github.com/seaql/sea-orm
[27] Tokio Contributors, "Axum v0.8," GitHub Repository, 2026. [Online]. Available: https://github.com/tokio-rs/axum
[28] Libre Space Foundation, "SatNOGS", 2026. [Online]. Available: https://satnogs.org/ [Accessed: May 5, 2024].
[29] T. S. Kelso, "CelesTrack", 2026. [Online]. Available: https://celestrak.org/ [Accessed: May 5, 2024].
[30] ESA, "DISCOSweb", 2026. [Online]. Available: https://discosweb.esoc.esa.int/ [Accessed: May 5, 2024].
[31] NASA, "National Space Science Data Center Master Catalog", 2025. [Online]. Available:https://data.nasa.gov/dataset/national-space-science-data-center-master-catalog [Accessed: May 5, 2024].

Diseño e implementación de un nodo inteligente para monitoreo distribuido de variables microambientales en cultivos mediante comunicación LoRa P2P

Brian Alejandro Corredor León
Facultad de Ingeniería Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
bacorredorl@itc.edu.co

Juan Sebastian Freire Vargas
Facultad de Ingeniería Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
jsfreirev@itc.edu.co

Mateo Alejandro Daza García
Facultad de Ingeniería Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
madazag@itc.edu.co

***Resumen*—La formación en ingeniería requiere experiencias de aprendizaje que integren conocimientos teóricos con el desarrollo de competencias prácticas en contextos reales. En este marco, los proyectos de semillero de investigación constituyen una estrategia pedagógica que favorece el aprendizaje activo, el pensamiento crítico y la resolución de problemas con impacto social y tecnológico. El presente trabajo describe el proceso formativo y los resultados obténidos en el desarrollo de un sistema de monitoreo distribuido de variables microambientales en cultivos en sustrato, implementado por estudiantes de la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central. El proyecto articuló competencias de programación de sistemas embebidos, diseño de redes de sensores inalámbricos, comunicación LoRa peer-to-peer y visualización de datos en plataformas IoT, integrando saberes de diversas áreas de la ingeniería en una solución funcional orientada al sector agrícola. Metodológicamente, el equipo siguió un enfoque de aprendizaje basado en proyectos, transitando por etapas de diseño, implementación, prueba y análisis de resultados, lo que permitió a los estudiantes enfrentarse a problemas propios del ejercicio profesional. Los resultados evidenciaron no solo la viabilidad técnica del sistema con una tasa de recepción LoRa del 94 % y monitoreo simultáneo de diez puntos de cultivo, sino también el desarrollo de habilidades de investigación, trabajo en equipo y pensamiento sistémico en los participantes. La experiencia demuestra que la investigación formativa articulada con problemáticas reales fortalece significativamente el perfil de egreso en programas de ingeniería, aportando al desarrollo de competencias profesionales y a la generación de soluciones tecnológicas pertinentes para el contexto nacional.**

***Index Terms*—Ingeniería en la educación; aprendizaje basado en proyectos; investigación formativa; IoT; LoRa.**

I. Introducción

La formación en ingeniería enfrenta el reto de desarrollar profesionales con capacidades técnicas y analíticas que les permitan responder a problemáticas complejas en entornos reales. No obstante, los modelos tradicionales de enseñanza suelen centrarse en la transmisión teórica del conocimiento, limitando las oportunidades de aplicación práctica y contextualizada de los saberes adquiridos en el aula.

En este contexto, la investigación formativa y el aprendizaje basado en proyectos han emergido como estrategias pedagógicas que favorecen el desarrollo de competencias profesionales mediante la participación activa de los estudiantes en procesos de diseño, experimentación y resolución de problemas reales. Particularmente, los semilleros de investigación constituyen espacios académicos donde los estudiantes pueden fortalecer competencias técnicas, investigativas y transversales mediante el desarrollo de proyectos aplicados.

De manera paralela, el sector agrícola demanda soluciones tecnológicas orientadas a la optimización de procesos productivos y al monitoreo eficiente de variables ambientales que inciden en el rendimiento de los cultivos. En este sentido, tecnologías como Internet de las Cosas (IoT) y redes de sensores inalámbricas basadas en LoRa representan herramientas de alto potencial para aplicaciones de agricultura de precisión.

El presente trabajo describe una experiencia de investigación formativa desarrollada en la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, en la cual estudiantes de ingeniería diseñaron e implementaron un sistema distribuido de monitoreo microambiental para cultivos en sustrato. El objetivo es analizar tanto la viabilidad técnica de la solución desarrollada como su aporte al fortalecimiento de competencias profesionales en ingeniería.

II. Metodología

II-A. Enfoque Pedagógico

El proyecto se desarrolló bajo una metodología de aprendizaje basado en proyectos en el marco de un semillero de investigación institucional. Este enfoque permitió a los estudiantes participar activamente en todas las etapas del proceso de desarrollo tecnológico, promoviendo la apropiación práctica

de conocimientos disciplinares y la resolución colaborativa de problemas.

II-B. Diseño del Sistema de Monitoreo

Se diseñó una arquitectura distribuida de monitoreo conformada por múltiples nodos sensores instalados en diferentes puntos de cultivo en sustrato. Cada nodo fue equipado con sensores de temperatura, humedad ambiental y humedad del sustrato, utilizando un microcontrolador ESP32 y un módulo LoRa E220-900T22D de EBYTE para la transmisión de datos en la banda de 915 MHz.

El módulo E220-900T22D integra el chip LoRa SX1262 y una antena de alto rendimiento, ofreciendo una potencia de transmisión de hasta 22 dBm y una sensibilidad de hasta -148 dBm, lo que mejora significativamente el alcance y la robustez del enlace. La comunicación entre el ESP32 y el módulo se realiza mediante interfaz UART, simplificando la implementación de la capa física.

La comunicación entre nodos y la estación central (gateway) se implementó mediante LoRa en configuración peer-to-peer (P2P). El gateway recibe los paquetes de todos los nodos y los envía a la plataforma IoT Ubidots a través de una conexión Wi-Fi, utilizando peticiones HTTP POST con el token de la API. La Figura **??** muestra el esquema general.

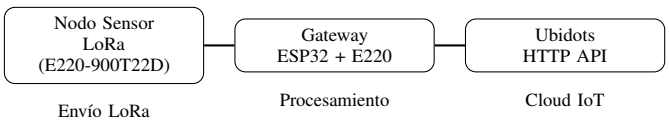


Figura 1. Nodo sensor LoRa (E220-900T22D) → Gateway (ESP32 + E220) → Ubidots (HTTP API).

Cada nodo envía una trama cada 10 minutos que incluye: ID del nodo, temperatura, humedad relativa, humedad del sustrato y un checksum. El gateway al recibir la trama, la valida y reenvía los datos a Ubidots, donde se crean variables (dispositivos) para cada nodo y cada variable.

II-C. Fases de Desarrollo

El desarrollo del proyecto se estructuró en las siguientes etapas:

1. Diseño conceptual del sistema: Definición de requerimientos funcionales y arquitectura general.
2. Implementación de prototipos: Integración de hardware, sensores y firmware embebido (comunicación UART con el E220).
3. Pruebas experimentales: Evaluación de desempeño del sistema en condiciones operativas.
4. Análisis de resultados: Validación técnica y análisis del proceso formativo desarrollado.

III. Resultados y Discusión

III-A. Resultados Técnicos

El sistema desarrollado logró monitorear simultáneamente diez puntos de cultivo distribuidos en la infraestructura experimental, permitiendo la adquisición y transmisión continua de variables microambientales.

Las pruebas de comunicación inalámbrica se realizaron durante 15 días, con una distancia máxima de 600 metros entre el nodo más lejano y el gateway (aprovechando la mayor sensibilidad del E220-900T22D). Se enviaron un total de 2160 paquetes por nodo (intervalo de 10 minutos). La Tabla III-A resume los resultados.

Métrica	Valor	Observación
Tasa general de recepción	94 %	Promedio 10 nodos
Nodo más cercano (30 m)	99 %	Sin obstáculos
Nodo más lejano (600 m)	89 %	Con vegetación y edificaciones bajas
RSSI promedio	-102 dBm	Umbral de sensibilidad -148 dBm

La integración con la plataforma Ubidots fue exitosa: cada nodo se registró como un dispositivo y las variables se actualizaron en tiempo real. El dashboard permitió visualizar gráficas de evolución temporal, establecer alertas por umbrales (por ejemplo, humedad de sustrato menor al 30 %) y exportar datos históricos. La Figura 2 muestra un ejemplo del dashboard.



Figura 2. Visualización de temperatura y humedad de sustrato para un nodo.

III-B. Resultados Formativos

Desde la perspectiva educativa, la participación en el proyecto permitió a los estudiantes desarrollar competencias técnicas en áreas como:

- Programación de sistemas embebidos (ESP32).
- Configuración y manejo de módulos LoRa avanzados (E220-900T22D) vía UART.
- Diseño de redes de sensores inalámbricos con LoRa P2P.
- Integración de dispositivos con plataformas IoT (Ubidots).

Asimismo, se fortalecieron habilidades transversales relacionadas con:

- Trabajo colaborativo interdisciplinario.
- Gestión de proyectos tecnológicos.
- Pensamiento sistémico.
- Competencias investigativas y experimentales.

Mediante encuestas de autoevaluación, los estudiantes reportaron una mejora significativa en su confianza para abordar proyectos reales de IoT, así como una mayor comprensión del ciclo de vida de un sistema embebido (desde la captura de sensores hasta la visualización en la nube).

III-C. Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la participación en proyectos de investigación formativa orientados a la solución

de problemáticas reales favorece la integración efectiva entre teoría y práctica en la educación en ingeniería.

La experiencia permitió que los estudiantes enfrentaran desafíos similares a los del ejercicio profesional, promoviendo procesos de toma de decisiones técnicas, validación experimental y trabajo colaborativo en escenarios interdisciplinarios.

El uso del módulo E220-900T22D simplificó la capa física gracias a su interfaz UART y su elevada sensibilidad, lo que extendió el alcance efectivo de la red en comparación con módulos básicos como el SX1278. Esto resultó en una mayor flexibilidad para ubicar los nodos en el terreno de cultivo.

Adicionalmente, el desarrollo de una solución tecnológica con aplicación en el sector agrícola fortaleció la comprensión del rol social de la ingeniería como disciplina orientada a la transformación del entorno.

IV. Conclusiones

El desarrollo del sistema distribuido de monitoreo microambiental para cultivos en sustrato permitió validar la viabilidad técnica de una arquitectura basada en sensores distribuidos, comunicación LoRa P2P con módulos E220-900T22D e integración con la plataforma IoT Ubidots para aplicaciones de monitoreo agrícola.

Desde el componente formativo, la experiencia demostró que la investigación formativa enmarcada en metodologías de aprendizaje basado en proyectos constituye una estrategia efectiva para fortalecer competencias técnicas, investigativas y profesionales en estudiantes de ingeniería.

Se concluye que la articulación de procesos de investigación estudiantil con problemáticas reales del entorno productivo contribuye significativamente al fortalecimiento del perfil de egreso de los programas de ingeniería y a la generación de soluciones tecnológicas pertinentes para el contexto nacional.

Como trabajo futuro se propone ampliar la escalabilidad del sistema desarrollado (más nodos y mayor área de cobertura), incorporar funcionalidades de automatización (riegos controlados por relevadores) y continuar evaluando el impacto de este tipo de experiencias en los procesos de formación de ingenieros.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central por el apoyo logístico y a los docentes del semillero de investigación por su orientación durante el proyecto.

Referencias

[1] J. R. Savery, “Overview of problem-based learning: Definitions and distinctions,” *Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning*, vol. 1, no. 1, pp. 9–20, 2006.

[2] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiró, B. Martínez, J. Melià-Seguí, and T. Watteyne, “Understanding the limits of LoRaWAN,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, 2017.

[3] EBYTE, “E220-900T22D User Manual,” [Online]. Available: https://www.ebyte.com/en/product-view-news.aspx?id=110. Accedido: 28-Feb-2026.

[4] Ubidots, “Developer API documentation,” [Online]. Available: https://ubidots.com/docs/api/. Accedido: 28-Feb-2026.

[5] M. A. Zamora-Izquierdo, J. Santa, J. A. Martínez, V. Martínez, and A. F. Skarmeta, “Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing,” *Biosystems Engineering*, vol. 177, pp. 4–17, 2019.

[6] L. M. Jiménez and C. A. Rodríguez, “Los semilleros de investigación como estrategia pedagógica en ingeniería,” *Educación en Ingeniería*, vol. 14, no. 28, pp. 25–32, 2019.

Diseño de un CubeSat para el Monitoreo de Variables Ambientales y la Protección de Carga Crítica

1st Cristian Stiven Suárez Palma
line 2: *Ingenieria Mecatronica*
Escuela Tecnologica Instituto Tecnico Central
Bogota D.C, Colombia
cssuarezp@itc.edu.co

2 st Julian Mateo Hernandez Cavadia
Ingenieria Mecanica
Escuela Tecnologica Instituto Tecnico Central
Bogota D.C, Colombia
jumhernandezc@itc.edu.co

***Abstract*— This document describes the development of a low-cost CubeSat platform oriented toward the acquisition and real-time transmission of environmental variables, while ensuring the integrity of a sensitive payload during operation. The project is relevant for its educational impact and for the development of accessible technologies applicable to environmental monitoring. Its cost-effective design integrates, within a compact system, environmental monitoring capabilities, real-time data transmission, and autonomous operation during ascent and descent trajectories.**

Keywords— CubeSat, satellite, monitoring, telemetry, transmission.

I. I. Introducción

Actualmente, la degradación y contaminación ambiental representan uno de los mayores retos del siglo XXI. La contaminación del aire constituye un riesgo crítico para la salud pública, ya que el material particulado presente en la atmósfera causa afectaciones respiratorias y cardiovasculares graves, con consecuencias que en los casos más severos pueden resultar fatales. Se estima que en 2019 la contaminación del aire ambiente (exterior) provocó en todo el mundo 4,2 millones de muertes prematuras [1].

A pesar de la gravedad de esta problemática, el monitoreo continuo de variables ambientales sigue siendo limitado en regiones con escasos recursos tecnológicos y financieros. Existe información que respalde lo anterior como el estudio de ETH Zurich (2026) analizó más de 10.000 áreas urbanas de países de ingreso bajo y medio, encontrando que en casi el 90% de ellas no se identificó ninguna actividad de monitoreo de calidad del aire [2].

Además de esto las plataformas satelitales convencionales presentan costos significativos que restringen su uso a organismos institucionales.

En este contexto, el desarrollo de tecnologías accesibles de bajo costo para la adquisición y transmisión de datos ambientales en tiempo real se convierte en una necesidad urgente. El formato CubeSat, ampliamente adoptado en proyectos académicos a nivel mundial, ofrece una alternativa para adoptar alternativas de monitoreo ambiental de forma aérea o aeroespacial además de aportar un alto impacto educativo y científico [12].

Para definir los CubeSat son una clase de naves espaciales de investigación llamadas nanosatélites. Estos satélites, con forma de cubo, tienen un tamaño de nave espacial en unidades estandarizadas [3][4].

La importancia de este proyecto radica en la necesidad de desarrollar dispositivos que, a pesar de su reducido tamaño, sean capaces de realizar mediciones precisas de variables ambientales y soportar condiciones extremas durante su lanzamiento, vuelo y aterrizaje. Asimismo, el satélite debe garantizar la integridad de una carga crítica (un huevo de gallina y agua) que simboliza la capacidad de supervivencia de elementos biológicos ante condiciones adversas [11].

A. *Pregunta problema.*

¿Cómo desarrollar un CubeSat de bajo costo con capacidad de recopilar y transmitir variables ambientales, y proteger una carga sensible durante una misión de lanzamiento y aterrizaje controlado?

II. Objetivos

A. *Objetivo general*

Desarrollar un CubeSat que permita recopilar y transmitir variables ambientales en tiempo real y asegure la integridad de una carga sensible durante su despegue y aterrizaje.

B. *Objetivos especificos*

- Fabricar una estructura compacta tipo CubeSat 2U utilizando materiales ligeros pero resistentes que garanticen la resistencia mecánica con bajo costo de fabricación.
- Diseñar un sistema de desaceleración y amortiguamiento que permita reducir la velocidad de caída y proteger la carga útil durante el aterrizaje.
- Desarrollar el sistema electrónico de adquisición de datos, telemetría y procesamiento de información para un CubeSar de monitoreo ambiental, integrando computadora de vuelo, sensores, comunicación inalámbrica y visualización de datos.
- Validar experimentalmente el funcionamiento del satélite mediante pruebas de lanzamiento en un rango de 300 a 400m sobre el nivel del suelo,

III. II. Metodología

El desarrollo siguió un enfoque de ingeniería de sistemas estructurado en cinco fases iterativas. Cada fase incluyó

revisiones de interfaces y criterios de aceptación antes de avanzar a la siguiente, basada en los estándares de diseño de sistemas aeroespaciales y adaptada a los requerimientos del mundial CanSat 2026 organizado por el Programa Espacial Universitario de la UNAM. Cada fase produjo entregables verificables que condicionaron el inicio de la siguiente, garantizando trazabilidad entre requerimientos, diseño e implementación.

- Definición de requerimientos
- Arquitectura del sistema y selección de componentes
- Diseño mecánico y análisis estructural
- Diseño electrónico y sistema de potencia
- Firmware y software de la estación terrestre
- Integración y pruebas
- Verificación y validación de resultados

A. Definición de requerimientos

Los requerimientos de dimensiones y masa fueron establecidos según los estándares de la NASA CubeSat Launch Initiative [3][6]. Se identificaron 10 requerimientos técnicos clasificados cada uno por nivel de prioridad siendo 1 la máxima prioridad y 3 de menor prioridad.

TABLA 1. Requerimientos.



TABLA 2. Análisis de riesgos.



Se identificaron 7 riesgos técnicos clasificados por subsistema. Cada riesgo tiene una acción de mitigación concreta que se implementa en el diseño o en los protocolos de prueba.

B. Arquitectura del sistema y selección de componentes

La arquitectura del sistema se describe en el siguiente mapa que integra distintos subsistemas como mecánico y electrónico.

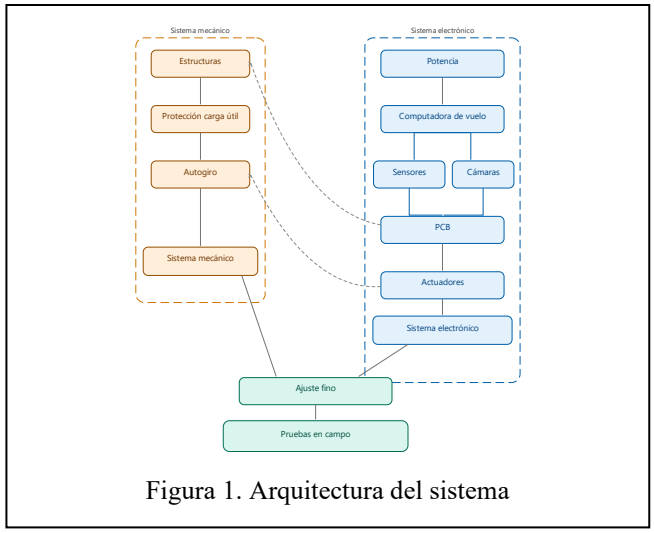


Figura 1. Arquitectura del sistema

En esta arquitectura se describe la arquitectura del sistema electrónico, definiendo la computadora de vuelo O. B. C sensores, actuadores, y métodos de comunicación.

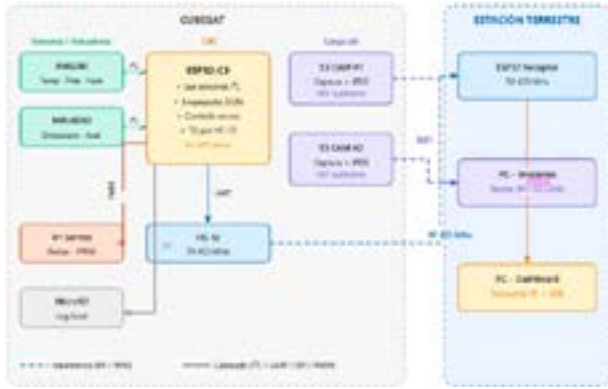


Figura 2. Arquitectura electrónica

TABLA 3. Componentes.



Los componentes se seleccionaron bajo tres criterios: peso mínimo (límite CanSat: 450 g), voltaje de operación compatible (3.3 V / 5 V) y función específica dentro del sistema, además de esto se realizó una cotización sobre los componentes.

C. Diseño mecánico y análisis estructural

La estructura mecánica fue modelada en SolidWorks. El modelo integra un cuerpo externo, un cuerpo interno y un sistema de desaceleración tipo autogiro con aspas superiores e inferiores, accionadas por cuatro servomotores MG90S mediante un mecanismo de leva y empujadores.

TABLA 4. Lista de componentes a fabricar

Lista de componentes a fabricar por el equipo				
Nombre de pieza	Cantidad	Material	Proceso de fabricación	Estado
Carcasa huevo A	1	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Carcasa huevo B	1	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Cuerpo servomotores A	1	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Cuerpo servomotores B	1	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Cuerpo autogiro A	1	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Cuerpo autogiro B	1	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Unión cuerpo exterior A	1	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Unión cuerpo exterior B	1	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Placas ferrosas 25×15 mm	4	Acero AISI 1020	Mecanizado por fresado convencional	Fabricado
Imanes 25×6 mm	4	Neodimio	Mecanizado por fresado convencional	Fabricado
Espuma EPE A	1	EPE	Corte térmico por hilo caliente	Fabricado
Espuma EPE B	1	EPE	Corte térmico por hilo caliente	Fabricado
Alerones	4	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Placas horizontales (PCB)	4	Baquelita (FR-2)	Mecanizado CNC (fresado de PCB)	Sin fabricar
Cuerpo externo A	4	Aluminio 1100 H14	Corte láser CNC	Sin fabricar
Cuerpo externo B	4	Acetato translúcido	Corte manual / corte por cuchilla	Fabricado
Gancho A	1	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Gancho B	1	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Gancho C	1	PET-G	Manufactura aditiva por deposición de material fundido (FDM)	Fabricado
Pala autogiro A	4	Fibra de vidrio	Mecanizado por corte y acabado manual	Sin fabricar
Pala autogiro B	4	Fibra de vidrio	Mecanizado por corte y acabado manual	Sin fabricar
Pala autogiro C	4	Fibra de vidrio	Mecanizado por corte y acabado manual	Sin fabricar
Anclaje pala A	4	Fibra de vidrio	Mecanizado por corte y acabado manual	Sin fabricar
Anclaje pala B	4	Fibra de vidrio	Mecanizado por corte y acabado manual	Sin fabricar
Correas	16	Cinta de polipropileno	Corte manual	Fabricado

En la Tab.4 se describen los componentes necesarios para la fabricación de la estructura mecánica del CubeSat, El sistema estructural del CubeSat se fabrica mayoritariamente mediante métodos convencionales, priorizando rigidez, precisión y repetibilidad dimensional.

Se usaron placas de aluminio de 0.5 mm para el cuerpo externo e interno y se produjeron por corte y mecanizado convencional. Las varillas roscadas 1/8" y elementos de fijación corresponden a componentes comerciales estándar. Para las palas de autogiro se usan láminas de fibra de carbono (1.5 mm) y los elementos textiles como las correas se obtienen mediante corte convencional.

La manufactura aditiva (ABS) se emplea únicamente en piezas de geometría compleja u optimizada: soportes de actuadores, cuerpo central del autogiro y uniones estructurales específicas.

El número de piezas fabricadas por impresión 3D es inferior al 50% del total estructural.

D. Diseño electrónico y sistema de potencia

TABLA 5. Cálculo de corriente y potencia.

Subsistema	Voltaje(V)	CU	Corriente CU(mA)	Corriente (mA)	Potencia (W)	Notas
ESP32 S3 MINI CAM SENSE	5	2	400	800	4	Transmisión + captura
ESP32 C3 (control)	5	1	400	400	2	Control general
BME280	3.3	1	0.0036	0.0036	0.00011188	Despreciable
MPU6050	3.3	1	5.1	5.1	0.01683	Acelerómetro giroscopio
HC-12	5	1	200	200	1	Transmisión
Servos MG90S	5	4	300	1200	6	Movimiento promedio
TOTAL	-	-	1305.9036	2605.9036	13.0169419	

Consumo total del sistema en operación normal es de 13,01 W (2605 mA a 5 V), con una autonomía operativa segura de 15 a 18 minutos. Los servomotores representan el 46% del consumo total y se activan únicamente cuando la velocidad angular supera el umbral definido por el MPU6050.

TABLA 6. Autonomía calculada

Parámetro	Valor	Descripción
Número de baterías	2	Conectadas en paralelo
Energía total	7.4 Wh	Energía combinada
Eficiencia del sistema	0,7	Pérdidas por calor y ruido
Energía útil	5.2 Wh	Energía disponible
Potencia del sistema	13.017 W	Consumo total
Tiempo teórico	34 min	Sin pérdidas
Tiempo real	18 – 22 min	Condiciones reales
Tiempo seguro	15 – 18 min	Operación estable

E. Firmware y software de la estación terrestre

En la fase de firmware y software se estableció un diagrama de flujo de datos, esto se realizó ya teniendo en cuenta la arquitectura electrónica y los componentes electrónicos previamente seleccionados.



Figura 3. Diagrama de flujo del firmware

El firmware del OBC fue implementado en Arduino/PlatformIO sobre el ESP32-C3. Ejecuta las siguientes tareas: lectura simultánea de sensores por I²C del sensor BME280: temperatura, presión y humedad relativa; MPU6050: aceleración y giro, cálculo de altitud por fórmula barométrica, empaquetado de datos en formato JSON y transmisión UART al HC-12. Los servomotores operan en tarea paralela independiente siendo controlados mediante la ESP32-C3, se planea aplicar un control por variables de estado para lograr controlar la dirección del descenso del satélite. Las cámaras S3 operan de forma completamente autónoma capturando y comprimiendo fotogramas JPEG que transmiten vía HTTP POST por WiFi a la estación terrestre. La estación terrestre fue desarrollada en Python utilizando PyQt5 y permite mostrar en tiempo real gráficas dinámicas de temperatura, presión, altitud, datos IMU.

IV. III. Resultados

A. Subsistema mecánico

Se obtuvo un prototipo CubeSat 2U con masa total de 422 g, dentro del límite de 450 g establecido, y un costo total de USD 309,44. La estructura mecánica, documentada en los planos de fabricación elaborados en SolidWorks integra el cuerpo externo y el cuerpo interno “Fig.4”, el sistema de amortiguamiento “Fig. 5” y el mecanismo autogiro de despliegue “Fig. 6”.

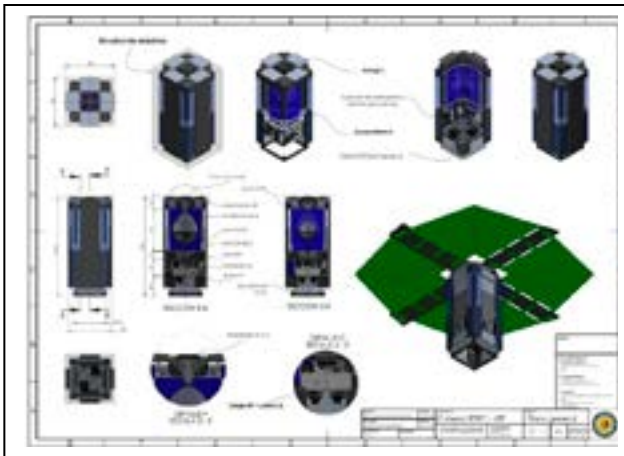


Figura 4. Plano diseño completo CubeSat

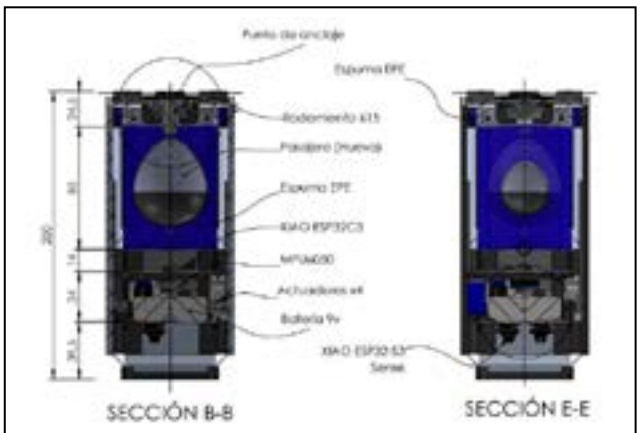


Figura 5. Plano sistema de amortiguamiento

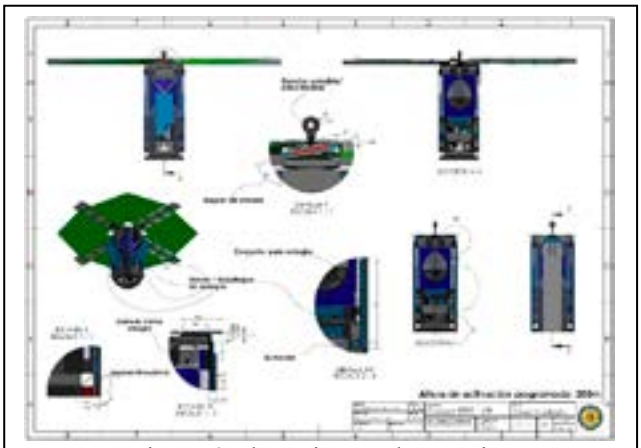


Figura 6. Plano sistema de autogiro

B. Subsistema electrónico

Las tres PCBs diseñadas fueron fabricadas por un proveedor local y ensambladas manualmente siguiendo lineamientos de

montaje superficial (SMD) para los reguladores y through-hole para los conectores.
La PCB de potencia entrega regulación estable de 9 V a 5 V para todos los subsistemas de forma independiente. Se alimentan los servomotores desde un regulador de voltaje independiente, esto para evitar caídas de voltaje y picos de corriente que afecten la O. B. C.
Se utilizan otros 2 reguladores de voltaje para alimentar la O. B. C. y para alimentar las ESP32-S3 CAM.

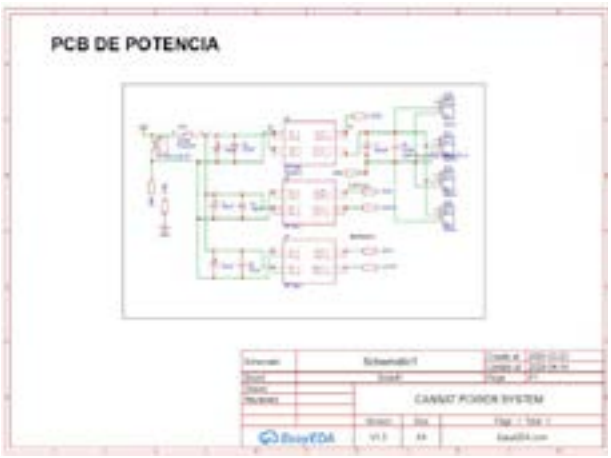


Figura 7. Esquemático potencia

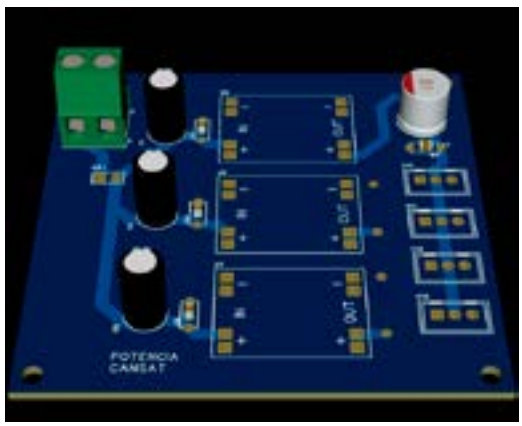


Figura 8. Diseño PCB Potencia 3D



Figura 9. PCB Fabricada

La PCB de control O. B. C. integra en una sola tarjeta el ESP32-C3, los sensores BME280 y MPU6050, y el módulo HC-12, con plano de tierra en capa inferior que minimiza el ruido en la transmisión RF a 433 MHz.

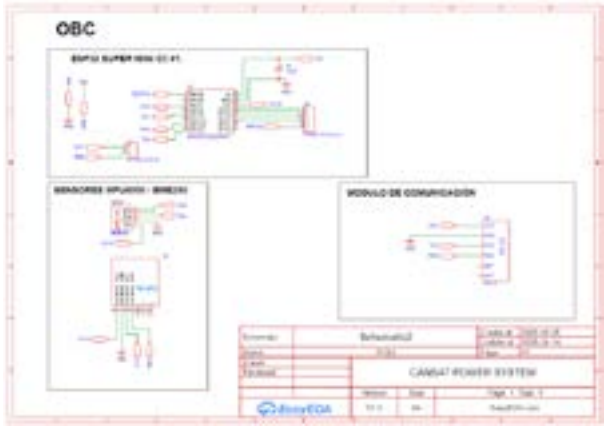


Figura 10. Esquemático O. B. C.

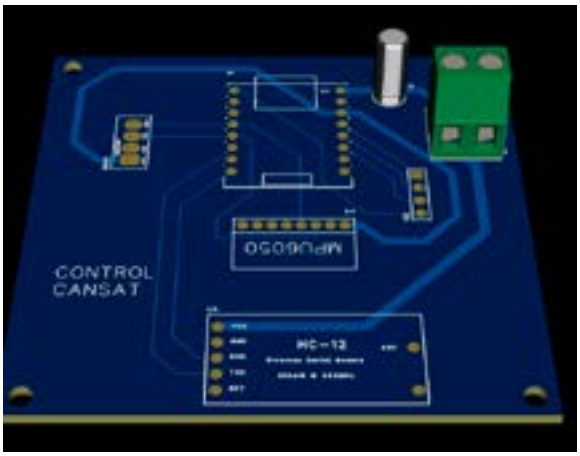


Figura 11. Diseño PCB O. B. C.

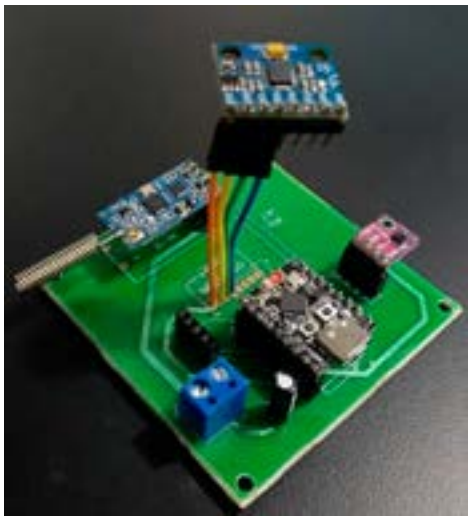


Figura 12. PCB O. B. C. Fabricada

La PCB que se encarga de capturar imágenes monta las dos cámaras XIAO ESP32-S3 en configuración estereoscópica para captura de imágenes con profundidad de campo.

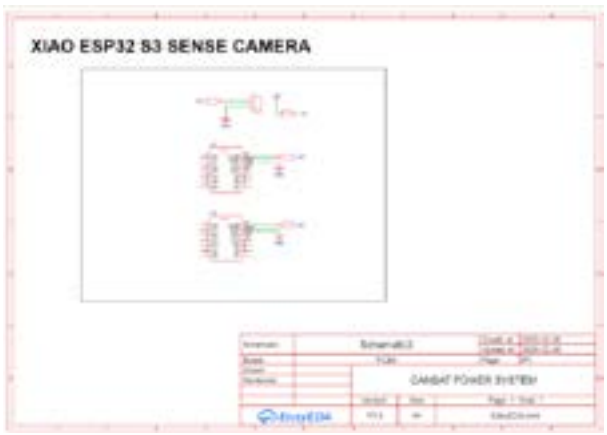


Figura 16. Esquemático ESP32-S3 CAM

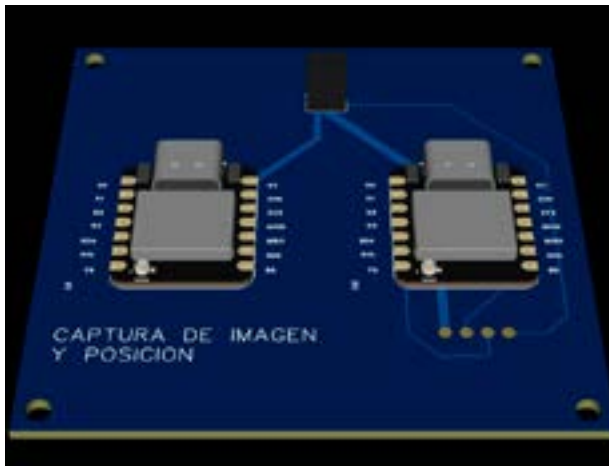


Figura 17. Diseño 3D PCB ESP32-S3 CAM

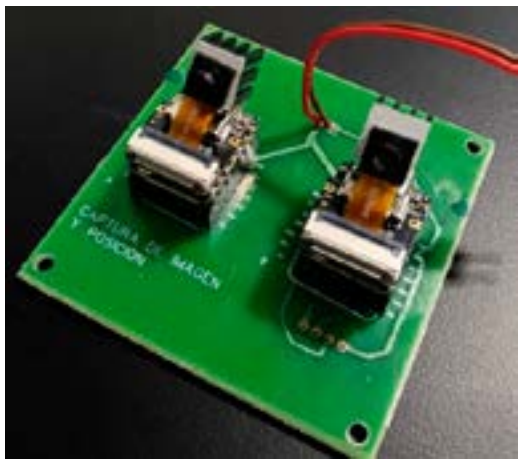


Figura 18. PCB ESP32-S3 CAM Fabricada

C. Firmware y software de la estación terrestre

La arquitectura de comunicaciones implementa dos canales independientes. El canal de telemetría transmite datos ambientales e inerciales empaquetados en JSON vía RF a 433 MHz desde el HC-12 del O. B. C. hacia el ESP32 receptor de la estación terrestre y existe otro canal dedicado para recibir las imágenes transmitidas mediante Wi-Fi.

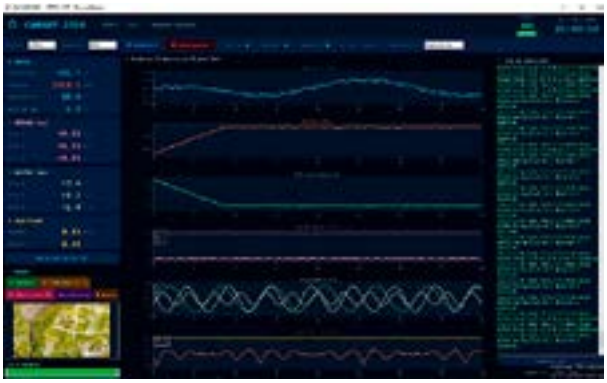


Figura 19. Interfaz grafica

D. Subsistema de visión estereoscópica

Se realizaron pruebas en tierra del sistema de captura de imagen, validando el funcionamiento simultáneo de los dos módulos XIAO ESP32-S3 Sense en configuración estereoscópica. Las imágenes fueron transmitidas vía Wi-Fi y procesadas en la estación terrestre, confirmando la viabilidad del canal de imagen independiente del canal de telemetría RF.



Ilustración 20. Imágenes

E. Integración y pruebas

Se integraron todos los sistemas una vez comprobado y asegurado su funcionamiento e integridad física de forma independiente. Obteniendo como resultado el CubeSat de 2U ensamblado completamente con sistema de amortiguamiento, sistema de autogiro y su sistema eléctrico.



Figura 21. Sistemas del CubeSat

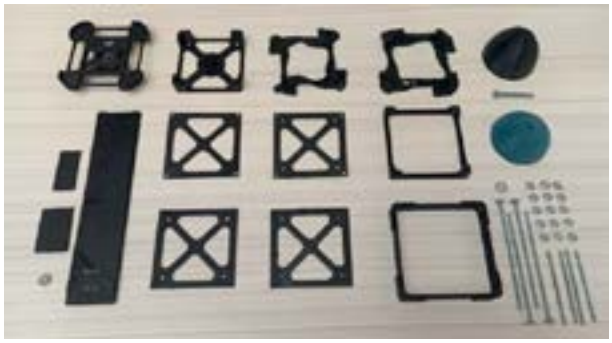


Figura 22. Componentes estructura mecánica

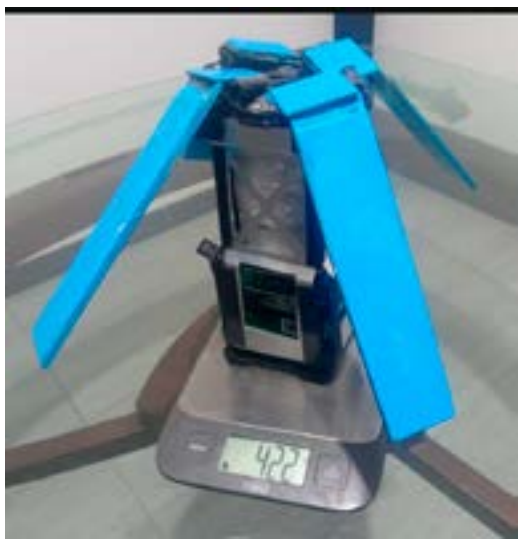


Figura 23. CubeSat Completo

F. *Estado actual*

Al momento de este reporte el proyecto se encuentra en la fase de Verificación y validación de resultados, con fabricación de las PCB completada, ensamble completo e integración de código completa. Esta fase que incluye ajustes finales, pruebas de caída controlada y el lanzamiento con dron a 300 m de altura, está programada como etapa siguiente según el cronograma enero–agosto 2026.

V. IV. Conclusiones

Se diseñó e implementó un prototipo CubeSat de bajo costo de USD 310 aproximadamente con capacidad de monitoreo ambiental, demostrando la viabilidad del formato CubeSat como plataforma educativa accesible para instituciones académicas con recursos limitados.

La arquitectura electrónica basada en microcontroladores ESP32 C3 y S3, comunicación RF a 433 MHz y comunicación Wi-Fi permitió satisfacer los requerimientos de masa ≤ 450 g, autonomía energética 15–18 min en operación estable y disponibilidad de enlace ≥ 95% establecidos para la misión, con un margen de masa de 2 g respecto al límite.

El procesamiento de imágenes resulta ser deficiente al ser desarrollado por las ESP32-S3 CAM en vuelo, por lo cual debe ser desarrollado en la computadora terrestre.

El proyecto demuestra el potencial de la integración multidisciplinaria entre ingeniería mecánica, mecatrónica y electrónica en el desarrollo de tecnologías espaciales de bajo costo. La plataforma CubeSat es aplicable a futuros proyectos educativos por su diseño de bajo costo y modular.

VI. Referencias

[1] Organización Mundial de la Salud, “Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud,” OMS, 24 oct. 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health. [Accedido: 10-may-2026].

[2] M. Schoch et al., “Large gaps in monitoring urban air pollution in low- and middle-income countries associated with economic conditions and political institutions,” PLOS ONE, ene. 2026. DOI: 10.1371/journal.pone.0321358.

[3] NASA Launch Services Program, “CubeSat launch initiative,” NASA. [En línea]. Disponible en: https://www.nasa.gov/kennedy/launch-services-program/cubesat-launch-initiative/. [Accedido: 6-mar-2026].

[4] H. Heidt, J. Puig-Suari, A. Moore, S. Nakasuka y R. J. Twiggs, “CubeSat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation,” en Proc. 14th Annual AIAA/USU Conf. on Small Satellites, 2000.

[5] R. J. Twiggs, “The origin of CubeSat,” Stanford University, 2003.

[6] NASA, CubeSat 101: Basic concepts and processes for first-time CubeSat developers. NASA CubeSat Launch Initiative, 2011.

[7] Programa Espacial Universitario – UNAM, “Reportes técnicos finales del concurso CanSat UNAM 2013,” PEU-UNAM, 2013.

[8] Programa Espacial Universitario – UNAM, “Reportes técnicos finales del concurso CanSat UNAM 2014,” PEU-UNAM, 2014.

[9] Universidad Autónoma de Tamaulipas, Manual para la generación de documentación para una misión espacial. [En línea]. Disponible en: https://peu.unam.mx/files/Manual%20para%20la%20generaci%C3%B3n%20de%20documentaci%C3%B3n%20para%20una%20misi%C3%B3n_V3.pdf. [Accedido: 6-mar-2026].

[10] Universidad Politécnica de Atlacomulco, “Diseño y construcción de un satélite enlatado para competencia,” Reporte de estadía. [En línea]. Disponible en: https://peu.unam.mx/files/cansat/est_efcm-irt.pdf. [Accedido: 6-mar-2026].

[11] G.-R. Liu, G. Chen y S.-Y. Duan, “Towards total protection from impact: A viability study using EPE foam to protect falling eggs,” (s.f.).

[12] World Meteorological Organization, “Low-cost sensors can improve air quality monitoring and people’s health,” jun. 13, 2024. [En línea]. Disponible en: https://wmo.int/news/media-centre/low-cost-sensors-can-improve-air-quality-monitoring-and-peoples-health. [Accedido: 6-mar-2026].

[13] Seeed Studio, “Getting started with Seeed Studio XIAO ESP32S3 (Sense),” Seeed Wiki. [En línea]. Disponible en: https://wiki.seeedstudio.com/xiao_esp32s3_getting_started/. [Accedido: 6-mar-2026].

Análisis sistemático de la literatura sobre el uso de Sargassum como adición cementante: Una revisión bajo el enfoque PRISMA

1st Juan Diego Rentería Hernándeza
Estudiante Programa Ingeniería Industrial
Institución Universitaria Antonio José Camacho,
Cali, Colombia
jdiegorenteria@estudiante.uniajc.edu.co

2nd Niyireht Sandoval Filigrana
Estudiante Programa Ingeniería Industrial
Institución Universitaria Antonio José Camacho,
Cali, Colombia
nsandovalf@estudiante.uniajc.edu.cob

3rd Lizeth Castro Mercado
Docente Ocasional Tiempo Completo Programa Ingeniería Industrial
Institución Universitaria Antonio José Camacho,
Cali, Colombia
lizethcastro@profesores.uniajc.edu.co

4th Pedro Mattey Centeno
Docente Ocasional Tiempo Completo Programa Ingeniería Industrial
Institución Universitaria Antonio José Camacho,
Cali, Colombia
pmattey@profesores.uniajc.edu.co

***Abstract*—The increasing accumulation of sargassum in coastal areas worldwide has generated significant environmental, economic, and social impacts, drawing the attention of researchers toward the search for sustainable alternatives for its utilization. In this context, its potential use as a cementitious component in construction materials has emerged as a promising alternative. This study presents a systematic literature review under the PRISMA approach, aiming to evaluate the current state of knowledge, technical properties, feasibility, and potential of sargassum (Sargassum) as an additive or precursor in the production of cementitious materials. The methodology focused on a screening process and inclusion criteria, such as the behavior of the algae in concrete and mortar, as well as its physicochemical composition. As a result, 25 selected scientific articles were analyzed, allowing the identification that its incorporation as a cement additive significantly improves the thermal insulation properties and internal cohesion of the mixtures containing it. The findings derived from the literature review reveal that, through controlled calcination and desalination processes, sargassum ash acts as an active pozzolan (a binding material that reacts with lime from cement and water at room temperature), enhancing the chemical reaction of Type I (Portland) cement and increasing paste density at different curing ages. Likewise, the review highlights that the use of biopolymers extracted from the algae functions as a rheology-modifying agent, reducing the need for synthetic additives. In conclusion, the review suggests that the utilization of sargassum in cementitious materials represents a low-carbon-footprint alternative and proposes a pathway for transforming large volumes of this waste into a valuable resource for sustainable construction.**

Keywords Algae, valorization, green concrete.

Introducción

La proliferación masiva de macroalgas pelágicas del género *Sargassum* (principalmente *S. fluitans* y *S. natans*) ha dejado de ser un fenómeno biológico estacional para convertirse en una crisis ambiental y socioeconómica desde la aparición del Gran Cinturón de Sargassum del Atlántico en 2011 [1], los costos de limpieza estimados en 210 millones de dólares en 2018 por el Fondo Regional de Pesca del Caribe [2]. La acumulación de esta biomasa en las costas del Caribe y el Golfo de México, la cual tiene una concentración de metales (aluminio, vanadio, cromo, hierro, cobalto, níquel, cobre, arsénico, cadmio, mercurio y plomo) e hidrocarburos (aromáticos y alifáticos) en sus lixiviado generado por la descomposición de Sargassum, genera procesos de descomposición que liberan gases tóxicos como el sulfuro de hidrógeno, afectando la salud de las personas, sus medios de subsistencia y la biodiversidad marina (provocando hipoxia y mortalidad de especies) [3]

El Sargassum se ha recolectado en playas y costas principalmente para su uso en alimento animal y fertilizante, sin embargo, el gran volumen de esta alga desafía a los investigadores a encontrar nuevas aplicaciones para este material disponible [4]. Paralelamente, la industria de la construcción se enfrenta al desafío de la descarbonización, dado que la producción de cemento Portland representa aproximadamente el 8% de las emisiones globales de dióxido de carbono ($CO2$) [5]. En este contexto, la búsqueda de materiales cementantes suplementarios y agregados alternativos se ha vuelto una necesidad [6] Este estudio evalúa el estado del conocimiento, las propiedades técnicas, la viabilidad de su uso y el potencial del sargazo (Sargassum) como adición o precursor en la generación de materiales cementantes

I. Metodología

Para garantizar la transparencia metodológica y la reproducibilidad, esta investigación se estructuró bajo la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) 2020. Se definió la pregunta de investigación utilizando el formato PICOS, dónde Población: Materiales de construcción; Intervención: Adición de derivados de Sargassum; Comparación: Mezclas de control con Cemento Portland Tipo I; Resultados: Propiedades mecánicas, térmicas y químicas; y Diseño de Estudio: Revisiones y artículos experimentales

La Fig. 1, presenta el paso a paso de la metodología PRISMA utilizada y los resultados en cada una de sus fases. Las ecuaciones de búsqueda en cada base de datos: Scopus: 93 artículos con la ecuación TITLE-ABS-KEY (Sargassum AND (concrete OR mortar OR cement OR construction)), para Web of Science: 63 resultados con la ecuación TITLE-ABS-KEY (Sargassum AND (construction OR concrete OR mortar) y en Science Direct: 5 artículos, TITLE-ABS-KEY ("Sargassum" AND "thermal properties" AND "sustainable construction").

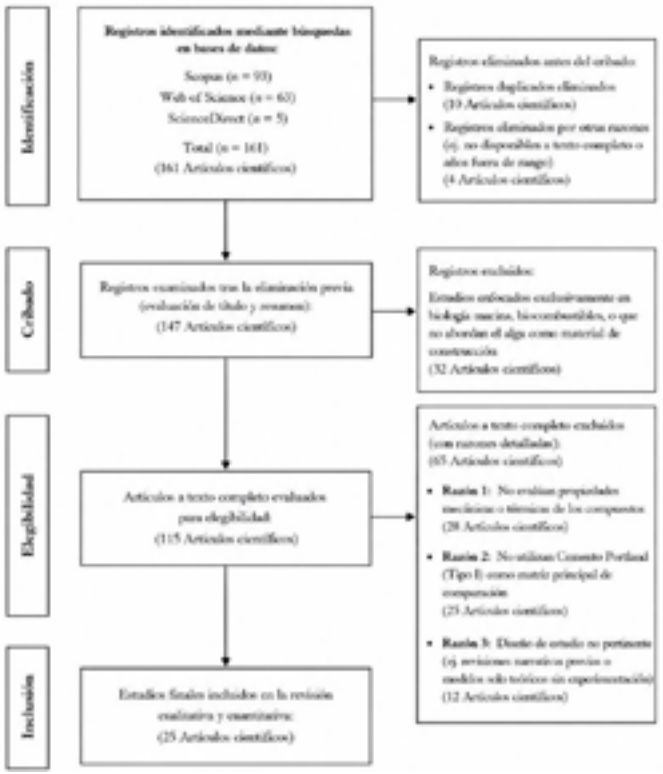


Fig. 1. Estrategia de selección de documentos adaptada al enfoque PRISMA.

II. RESULTADOS

A. *Caracterización del Sargassum como Material Cementante*

El comportamiento del sargassum en matrices cementicias depende estrechamente de su estructura biológica, la cual se divide en dos grandes aportes:

1) Composición Bio-química y Modificación Reológica

El componente orgánico más crítico del Sargassum es el alginato, un biopolímero aniónico presente en sus paredes celulares que representa entre el 12.9% y el 30% de la masa seca [7]. El alginato de sodio extraído de Sargassum polycystum tiene un peso molecular promedio de viscosidad de 4,73 ± 0,001 × 10 4 g/mol y una relación M/G de 2,87 [8]. Varios autores [7], [8], [9]coinciden en que los biopolímeros del alga funcionan como un agente modificador de reología que mejora la cohesión interna y reduce la necesidad de aditivos sintéticos. Además, estos biopolímeros mejoran la capacidad de regulación de humedad (buffer higroscópico) en los materiales, lo que favorece el confort térmico en interiores.

2) Composición Mineral y Debate sobre su Puzolanicidad

Al someter el sargazo a calcinación (comúnmente a 500 °C) [10], se obtiene una ceniza rica en óxidos de calcio (CaO), azufre (SO3) y sodio (Na2O), que en conjunto superan el 58% de su composición total [11]. Existe una interesante correlación y debate entre los autores respecto a su actividad puzolánica, dado que, los autores [12]indican que la ceniza calcinada a 600 °C y la ceniza calcinada a 800 °C presentaron una actividad puzolánica significativa, la ceniza del Sargassum spp no puede considerarse un material puzolánico, por su parte, los autores [13] argumentan que en lugar de absorber cal, las cenizas parecen aumentar la alcalinidad de la solución debido a su alto contenido de carbonatos y sulfatos, lo que invalida su función como puzolana reactiva. También, el estudio [14] mediante el test de Chapelle y difracción de rayos X, demuestran que las cenizas carecen de la cantidad de sílice necesaria para reaccionar como material puzolánico. Mientras que, una investigación preliminar [15] sugiere que la ceniza de sargazo desalinizada actúa como una puzolana activa que mejora la reacción química del cemento Portland. Por lo tanto, la literatura consultada coincide en que su uso es altamente efectivo, pero principalmente bajo el rol de material de carga (filler) inerte o agregado fino, que favorece el empaquetamiento de las partículas y el efecto de nucleación. Por lo cual, se podría sugerir que la falta de sílice observada en algunos estudios podría deberse a las temperaturas específicas de calcinación o a la madurez del alga recolectada.

III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. *Resistencia Mecánica (Compresión y Flexión)*

La incorporación del sargazo requiere control en los porcentajes de sustitución para no comprometer la integridad estructural. En una investigación [16]demostraron que, al sustituir agregado fino por ceniza de sargazo, la resistencia a la compresión tiende a disminuir a medida que aumenta el porcentaje de alga; sin embargo, para sustituciones del 5% y 10%, los resultados a los 63 días de curado no presentan diferencias estadísticas significativas respecto al mortero de referencia, manteniendo una resistencia óptima. Por otro lado, cuando se utiliza la fibra natural del sargazo, tratamientos químicos previos son vitales. Los autores [17] encontraron que tratar la fibra con hidróxido de calcio ($Ca(OH)2$) elimina extractivos superficiales, mejorando notablemente la adherencia fibra-matriz y alcanzando resistencias a la compresión superiores a los 13.35 MPa.

B. *Propiedades de Aislamiento Térmico*

Una de las correlaciones más encontradas en la literatura es la mejora sustancial en las propiedades de aislamiento térmico. El sargazo crudo posee una alta porosidad (hasta 61.13%) y una conductividad térmica sumamente baja, en el rango de 0.041 a 0.045 W/mK. Al integrarse en compuestos a base de plantas y cemento, el material compuesto logra reducir su conductividad

térmica a rangos entre 0.565 y 0.685 W/mK, lo que representa una disminución superior al 54% en comparación con el concreto convencional (el cual ronda 1.5 W/mK) [10], [15], [17]
En un estudio [2] en el que se realizaron tableros multicapas con Sargassum, encontraron que la porosidad de los compuestos fabricados con biomasa de Sargassum varía significativamente según los parámetros de procesamiento.

C. Microestructura (XRD y TGA)

El análisis microestructural valida el comportamiento macroscópico. Las pruebas de termogravimetría (TGA) indican que la fibra de sargazo es térmicamente estable hasta los 150-200 °C, momento en el que comienza la degradación de biopolímeros como la hemicelulosa [16], [18]. Los análisis de Difracción de Rayos X (XRD) confirman la presencia de fases cristalinas como la calcita (*CaCO*3) y sales como la halita (*NaCl*) [11]. En este sentido, como lo expresan los autores [19]aunque la desalinización es necesaria para evitar la corrosión, este proceso consume grandes cantidades de agua dulce, lo cual es una limitación práctica que debe ponerse en una balanza con respecto al beneficio ambiental.

D. Consideraciones Ambientales y de Sostenibilidad (LCA)

Para validar la viabilidad del sargazo como material sostenible, se aplicaron enfoques de Análisis de Ciclo de Vida (LCA). Por su parte, los autores [20] cuantificaron que al dejar el sargazo descomponiéndose de forma natural en las playas tiene un impacto negativo para las categorías de cambio climático y el aporte en exceso de nutrientes inorgánicos, en este caso de nitrógeno, fosforo y silicio.
Por otra parte, la conversión de sargazo en cenizas para la construcción generaría cierto nivel de material particulado por la combustión, pero reduciría drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida del alga, disminuyendo su contribución al cambio climático desde un 47% hasta valores inferiores al 2% o 6% [21]. Adicionalmente, el Análisis del ciclo de vida también demostró que el transporte del sargazo, que es una biomasa, es una variable de mayor impacto ambiental; por lo tanto, convendría realizar los procesos de transformación cerca de los lugares de generación [22]. Además, la composición química del alga puede variar según la temporada de recolección o la zona del Caribe [21], [23], por lo tanto, representaría un reto para la estandarización industrial.

IV CONCLUSIONES

Aunque el nivel de sustitución adecuado de agregado fino por ceniza de sargazo se encuentra entre el 5% y el 10%, rango en el cual se preservan las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión a 63 días) y se obtienen beneficios ecológicos significativos, la logística de recolección y transporte se debe considerar para que esta tecnología sea competitiva frente al cemento tradicional.

Bien sea en forma de ceniza o como fibra tratada, el sargazo aporta un valor agregado, mejorando el aislamiento térmico de los morteros y actuando como un modificador reológico natural gracias a su importante contenido de alginatos.

Un desafío futuro para el uso del sargassum en el sector de la construcción, sería la perspectiva del usuario frente a materiales basados en residuos, y la necesidad de mayor conciencia ambiental en las personas y la creación de normativas técnicas que respalden el uso de estas mezclas en vivienda real

Transformar esta biomasa que se produce a gran escala en un recurso para la infraestructura no solo contribuye a mitigar una crisis ecológica y de salud en las costas, sino que provee a la ingeniería industrial de una herramienta para la obtención de materiales alternativos.

ACKNOWLEDGMENT

Este trabajo fue apoyado por la Institución Universitaria Antonio José Camacho, en el semillero SEGESTOP, del grupo de investigación INTELIGO

REFERENCIAS

[1] E. Asiedu, P. Paa, K. Yalley, A. Nii, and N. Dowuona, “A review of sargassum seaweeds’ application in the development of eco-friendly building materials,” *Sustainable Engineering Materials*, vol. 2025, no. 2, 2025, doi: 10.54113/j.suem.2025.000012.

[2] T. T. Stanislas, K. Bilba, C. O. Potiron, and M. A. Arsène, “Assessment of the valorisation of Sargassum seaweed in the production of PLA-based multilayer particleboards,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 515, p. 145649, Mar. 2026, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2026.145649.

[3] R. E. Rodríguez-Martínez, E. G. Torres-Conde, J. Rosellón-Druker, N. Cabanillas-Terán, and U. Jáuregui-Haza, “The Great Atlantic Sargassum Belt: Impacts on the Central and Western Caribbean–A review,” *Harmful Algae*, vol. 144, p. 102838, Apr. 2025, doi: 10.1016/J.HAL.2025.102838.

[4] T. T. Stanislas, K. Bilba, C. O. Potiron, and M. A. Arsène, “Effect of desalination of Sargassum algae on its potential use as a stabilizer in sustainable earth-based bricks,” *Algal Res.*, vol. 82, p. 103625, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.ALGAL.2024.103625.

[5] S. Barbhuiya, F. Kanavaris, B. B. Das, and M. Idrees, “Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development,” *Journal of Building Engineering*, vol. 86, p. 108861, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.JOBE.2024.108861.

[6] A. E. Landa Gómez, G. Fajardo San Miguel, D. Cruz Moreno, R. Orozco Cruz, and R. Galván Martínez, “Materiales cementantes suplementarios como alternativa para la disminución del fenómeno de corrosión en estructuras de concreto reforzado,” *Nova Scientia*, Aug. 2022, doi: 10.21640/NS.V14I29.3027.

[7] J. Cruz, K. G. Uitz, https://dialnet.unirioja.es/servlet/autor?codigo=6247820, and https://dialnet.unirioja.es/servlet/autor?codigo=6247821, “Use of sargassum and other organic substitutes in the construction industry. A review,” *Métodos y materiales, ISSN-e 2215-4558, ISSN 2215-342X, Vol. 14, Nº. 14 (Enero - Diciembre 2024 (Open number)), 2024, págs. 1-12*, vol. 14, no. 14, pp. 1–12, 2024, Accessed: May 08, 2026. [Online]. Available: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9324389&info=resumen&idioma=ENG

[8] B. Alallam, E. Abd Kadir, F. R. P. Dewi, Y. K. Yong, and V. Lim, “Extraction and characterization of sodium alginate from native Malaysian brown seaweed Sargassum polycystum,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 287, p. 138552, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2024.138552.

[9] Ö. İpsalalı, B. Esim, and F. Uğur Nigiz, "Extraction of alginate from the brown seaweed using Response Surface Method (RSM) and utilization for developing films with halloysite nanotube and thyme essential oil," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 51, p. 102428, Jun. 2026, doi: 10.1016/J.SCP.2026.102428.

[10] A. Closse, C. Onesippe Potiron, M.-A. Arsene, and K. Bilba, "Attempt to The Valorization of Brown Algae Sargassum sp. in Cement Mortar Composites for Housing or Building Purposes," *International Journal of Current Science Research and Review*, vol. 8, no. 3, 2025, doi: 10.47191/ijcsrr/V8-i3-52.

[11] G. P. Lyra, A. L. Colombo, A. J. F. P. Duran, I. M. da S. Parente, C. Bueno, and J. A. Rossignolo, "The Use of Sargassum spp. Ashes Like a Raw Material for Mortar Production: Composite Performance and Environmental Outlook," *Materials*, vol. 17, no. 8, p. 1785, Apr. 2024, doi: 10.3390/MA17081785.

[12] C. A. Ramírez-Pinto *et al.*, "Development of Sargassum spp. ash as filler material on cement composites with low carbon dioxide production," *Magazine of Concrete Research*, vol. 77, no. 9–10, pp. 580–590, Apr. 2025, doi: 10.1680/jmacr.24.00325.

[13] J. Javed *et al.*, "Predicting CO2 emissions and strength of FA-SF geopolymer mortar: An ANN approach for sustainable construction," *PLoS One*, vol. 21, no. 4, p. e0336654, Apr. 2026, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0336654.

[14] K. Bilba, C. Onésippe Potiron, and M. A. Arsène, "Invasive biomass algae valorization: Assessment of the viability of Sargassum seaweed as pozzolanic material," *J. Environ. Manage.*, vol. 342, p. 118056, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2023.118056.

[15] G. Yuan, Q. Zhou, A. Caggiano, N. Generowicz-Caba, and J. Kulczycka, "LCA of Cement with Alternative Additives: Pathways to Sustainable Production," *Materials 2025, Vol. 18, Page 3057*, vol. 18, no. 13, p. 3057, Jun. 2025, doi: 10.3390/MA18133057.

[16] G. P. Lyra, A. L. Colombo, A. J. F. P. Duran, I. M. da S. Parente, C. Bueno, and J. A. Rossignolo, "The Use of Sargassum spp. Ashes Like a Raw Material for Mortar Production: Composite Performance and Environmental Outlook," *Materials 2024, Vol. 17, Page 1785*, vol. 17, no. 8, p. 1785, Apr. 2024, doi: 10.3390/MA17081785.

[17] F. Rosas-Díaz, A. M. Arreguin, J. C. Hernández, C. A. Juárez-Alvarado, S. A. Galindo-Rodríguez, and D. G. García-Hernández, "Compatibility study of sargassum-based aggregate in Portland cement-based cementitious matrix," *Journal of Construction*, vol. 24, no. 1, pp. 25–42, Apr. 2025, doi: 10.7764/RDLC.24.1.25.

[18] C. Rojas-Herrera, J. P. Cárdenas-R, and M. Soto-Acuña, "Physical characterization of two Native Chilean Macroalgae: Luga (Sarcothalia crispata) and Sargazo (Sargassum) for their use as thermal insulation material in sustainable housing," *Advances in Bio-Based Materials for Construction and Energy Efficiency*, pp. 499–511, Jan. 2025, doi: 10.1016/B978-0-443-32800-8.00001-9.

[19] T. T. Stanislas, K. Bilba, C. O. Potiron, and M. A. Arsène, "Effect of desalination of Sargassum algae on its potential use as a stabilizer in sustainable earth-based bricks," *Algal Res.*, vol. 82, p. 103625, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.ALGAL.2024.103625.

[20] C. Bueno *et al.*, "Life Cycle Assessment Applied to End-of-Life Scenarios of Sargassum spp. for Application in Civil Construction," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/SU15076254.

[21] "Reducción de las emisiones de CO_2 | Organización Meteorológica Mundial." Accessed: May 08, 2026. [Online]. Available: https://wmo.int/es/site/frontline-of-climate-action/climate-change-mitigation/cutting-co2

[22] Md. S. Hossain *et al.*, "Microalgae for sustainable energy: Techno-economic and life cycle insights into biodiesel and biohydrogen production," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 30, p. 101840, May 2026, doi: 10.1016/J.ECMX.2026.101840.

[23] J. Bauta *et al.*, "Global Chemical Characterization of Sargassum spp. Seaweeds from Different Locations on Caribbean Islands: A Screening of Organic Compounds and Heavy Metals Contents," *Phycology 2024, Vol. 4, Pages 190-212*, vol. 4, no. 2, pp. 190–212, Apr. 2024, doi: 10.3390/PHYCOLOGY4020011.

Diseño y Validación de una Metodología para la Renovación del Registro Calificado en la Universidad del Magdalena

Lauris Jadilath Romero Lopez
Programa de Ingenieria Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
lcromeroc@unimagdalena.edu.co

Maria Isabel Fernandez Pinto
Programa de Ingenieria Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
mfernandezpi@unimagdalena.edu.co

Zaine Lorena Manjarres Morrón
Programa de Ingenieria Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
zmanjarres@unimagdalena.edu.co

Nestor Enrique Caicedo Solano
Programa de Ingenieria Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
ncaicedo@unimagdalena.edu.co

Rick Keevin Acosta Vega
Programa de Ingenieria Industrial
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
racosta@unimagdalena.edu.co

***Resumen*—El Registro Calificado de programas de educación superior es un elemento fundamental para garantizar la calidad educativa en Colombia, en cumplimiento del Decreto 1330 de 2019. Este proceso exige a las instituciones implementar estrategias de autoevaluación y mejora continúa orientadas a fortalecer sus funciones esenciales. En este contexto, esta investigación propone una metodología que permite estandarizar el proceso de renovación del Registro Calificado para programas académicos.**

El estudio se desarrolló mediante un enfoque metodológico estructurado en tres fases. En la primera fase, se caracterizó el proceso mediante la aplicación de una encuesta validada a directores de programas de pregrado presencial. Esto permitió identificar factores críticos y analizar las relaciones entre las variables que influyen en el proceso de autoevaluación. En la segunda fase, se estandarizó el proceso mediante la elaboración de diagramas de flujo, la aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Fallo (AMFE) para la identificación de riesgos y la formulación de una guía metodológica para la autoevaluación, con sanciones por incumplimiento en la renovación de la matrícula.

Finalmente, en la tercera fase, la metodología se validó mediante su implementación en un programa académico, demostrando mejoras en la organización, eficiencia y control del proceso. Los resultados contribuyen a la reducción de retrabajos, la mitigación de riesgos y el fortalecimiento de la garantía de calidad, consolidando un modelo replicable para instituciones de educación superior.

Palabras claves—Registro Calificado, garantía de calidad, autoevaluación institucional, gestión de procesos, mejora continua, Decreto 1330 de 2019.

I. Introducción

En el contexto de la educación superior en Colombia, el aseguramiento de la calidad se ha consolidado como un elemento fundamental para garantizar la pertinencia, la coherencia y la mejora continua de los programas académicos. Desde esta perspectiva, el proceso de regulación del registro calificado, reglamentado en el Decreto 1330 de 2019, exige a las instituciones de educación superior desarrollar ejercicios de autoevaluación que permitan evidenciar el cumplimiento de las condiciones de calidad establecidas.

Ahora bien, en la práctica, estos procesos suelen enfrentar diversas dificultades, tales como la ausencia de metodologías estandarizadas, la dispersión de la información y la falta de herramientas que faciliten la organización y el seguimiento de las actividades requeridas. Estas limitaciones pueden afectar la eficiencia del proceso y la calidad de los resultados obtenidos.

En respuesta a esta problemática, la presente investigación se orienta al diseño de una guía de autoevaluación que sirva como instrumento de apoyo para las instituciones de educación superior, especialmente las universidades públicas, en el desarrollo del proceso de renovación del registro calificado. Esta guía se construye a partir de la revisión de los lineamientos normativos vigentes y de la estructuración de un conjunto de herramientas prácticas que permiten organizar, de manera sistemática, las diferentes etapas del proceso.

El desarrollo de la propuesta contempla la integración de elementos como la definición de responsabilidades, la planificación de actividades, la recolección y el análisis de información, así como la incorporación de instrumentos complementarios, entre los que se destacan fichas resumen y

matrices de validación y seguimiento. Dichos anexos permiten fortalecer la trazabilidad del proceso y facilitar la verificación del cumplimiento de las condiciones de calidad.

De esta manera, la presente investigación aporta una herramienta metodológica que busca facilitar la gestión de la información, optimizar los procesos de autoevaluación y contribuir al fortalecimiento del aseguramiento de la calidad en la educación superior.

II. Marco Teorico

El aseguramiento de la calidad en la educación superior en Colombia se basa en un conjunto de normas que orientan cómo se crean, funcionan y evalúan los programas académicos. En este contexto, el registro calificado constituye un requisito obligatorio para la oferta de programas, el cual debe renovarse periódicamente mediante procesos de autoevaluación que permitan verificar el cumplimiento de las condiciones de calidad establecidas [1].

La Ley 30 de 1992 establece las bases del sistema de educación superior en Colombia, definiéndola como un servicio público de carácter cultural orientado al desarrollo integral de la persona y al fortalecimiento del conocimiento [2].

Por su parte, el Decreto 1075 de 2015, como decreto único reglamentario del sector educativo, compila y organiza la normativa vigente, estableciendo lineamientos generales para la gestión académica, administrativa y de calidad en las instituciones de educación superior [3].

Ahora bien, el Decreto 1330 de 2019 introduce una visión actual del aseguramiento de la calidad, estableciendo condiciones específicas que deben cumplir los programas para obtener o renovar el registro calificado. Este decreto hace énfasis en la importancia de realizar procesos de autoevaluación bien estructurados, orientados a evidenciar el cumplimiento de condiciones de calidad relacionadas con aspectos curriculares, docentes, investigación, infraestructura y relación con el entorno.

En este contexto, la autoevaluación se entiende como un proceso continuo y organizado mediante el cual las instituciones revisan su propio desempeño, identifican aspectos por mejorar y fortalecen la calidad de sus programas académicos.

Estructura del proceso

El proceso de autoevaluación para la renovación del registro calificado se fundamenta en el análisis de múltiples condiciones de calidad definidas en la normativa vigente, particularmente en el Decreto 1330 de 2019 [1]. Estas condiciones abarcan diferentes dimensiones del programa académico, entre ellas:

- Organización de las actividades académicas y del proceso formativo.
- Investigación, innovación y creación.
- Relación con el sector externo.
- Profesores.
- Medios educativos.
- Infraestructura física y tecnológica.

Cada una de estas condiciones implica la recopilación, el análisis y la presentación de información específica que permita evidenciar el cumplimiento de los criterios establecidos. Por ejemplo, en la condición relacionada con la organización de las actividades académicas, se debe demostrar la coherencia entre el plan de estudios, los resultados de aprendizaje y las actividades formativas. Además, se realiza seguimiento a indicadores clave como la deserción, la permanencia y la graduación.

De igual forma, en las condiciones asociadas a la investigación y la relación con el entorno, es necesario evidenciar la participación en actividades científicas, la articulación con el sector productivo y el desarrollo de proyectos que aporten al contexto social y económico.

En este contexto, estas exigencias evidencian la necesidad de contar con sistemas organizados de gestión de la información [4].

El anexo B, guía institucional de autoevaluación, define una estructura metodológica para llevar a cabo el proceso, estableciendo etapas que van desde la recolección de información hasta la consolidación del documento final.

En este sentido, el proceso contempla:

- Recolección de información desde las diferentes áreas institucionales.
- Organización y clasificación de las evidencias.
- Análisis de datos tanto cualitativos como cuantitativos.
- Consolidación del documento de autoevaluación.
- Validación interna y externa antes de su radicación.

Además, la guía plantea la necesidad de realizar una verificación interna rigurosa del documento antes de su entrega, así como la consolidación de anexos que respalden la información presentada.

Este enfoque deja claro que el proceso de autoevaluación no es solo descriptivo, sino que implica un manejo organizado y sistemático de la información, basado en criterios de análisis y validación que garanticen la calidad del resultado final.

III. Metodología

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, de tipo descriptivo y aplicado, orientado al diseño de una herramienta metodológica que facilite el proceso de autoevaluación con fines de renovación del registro calificado en programas académicos de educación superior. Para su desarrollo, se estructuró un enfoque metodológico en tres fases que integran el análisis normativo, la caracterización del proceso y la estandarización de la gestión.

En la primera fase, se realizó la revisión y el análisis de los lineamientos normativos vigentes relacionados con el

aseguramiento de la calidad en la educación superior, especialmente los establecidos en el Decreto 1330 de 2019, lo que permitió identificar las condiciones de calidad, los requerimientos de información y las estructuras necesarias para el proceso de autoevaluación. De manera complementaria, se llevó a cabo la caracterización del proceso mediante el diseño y la aplicación de una encuesta validada, dirigida a directores de programas de pregrado presencial, garantizando la confiabilidad y pertinencia de la información recolectada. Asimismo, se empleó un enfoque sistémico para analizar las relaciones entre variables de decisión, así como las principales causas y efectos que inciden en el desarrollo del proceso.

En la segunda fase, se orientó la estandarización del proceso, incluyendo la elaboración de flujogramas para la descripción de actividades, la aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF) para la identificación y priorización de riesgos, y la formulación de una guía metodológica para la autoevaluación. Adicionalmente, se diseñaron instrumentos de apoyo, como fichas resumen, matrices de validación y seguimiento, y formatos estructurados para la recolección y sistematización de evidencias, los cuales fortalecen la trazabilidad y la gestión de la información.

Finalmente, en la tercera fase, la metodología fue validada mediante su implementación en un programa académico de pregrado, evidenciando mejoras en la organización, eficiencia y control del proceso. La propuesta se consolida como un modelo flexible y adaptable a diferentes contextos institucionales

Los roles involucrados en el proceso se presentan en la "Tabla I"

TABLA I. ROLES EN EL PROCESO DE AUTOEVALUACIÓN

Rol	***Responsabilidad***
Dirección de programa	Liderar el proceso de autoevaluación
Equipo de autoevaluación	Ejecutar las actividades definidas
Líderes por condición	Analizar y consolidar la información
Oficina de calidad	Brindar acompañamiento metodológico
Actores institucionales	Suministrar información requerida

Fuente: Elaboración del autor

IV. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

La metodología propuesta para la renovación del registro calificado se desarrolla como un modelo que integra fases, actividades e instrumentos operativos, con el fin de garantizar la organización, trazabilidad y control del proceso de autoevaluación.

Esta propuesta responde a la ausencia de herramientas estandarizadas que orienten a las instituciones en la gestión del proceso de autoevaluación, dado que la normativa vigente establece los requisitos y condiciones de calidad, pero no define instrumentos específicos para su implementación.

En este sentido, la metodología se construye a partir de la sistematización de referentes normativos nacionales e institucionales, garantizando que cada fase, actividad e instrumento responda directamente a exigencias regulatorias.

Fundamentación normativa de la propuesta

La construcción de la metodología se basa en la revisión y análisis de normas de referencia que regulan el sistema de educación superior en Colombia y los lineamientos institucionales de la Universidad del Magdalena.

A nivel nacional, se consideran disposiciones que establecen el marco general de la educación superior, la calidad académica y los procesos de evaluación, mientras que a nivel institucional se incorporan lineamientos que orientan la gestión académica y administrativa.

Como se muestra en la "Tabla II", estos referentes normativos se articulan directamente con la propuesta metodológica.

TABLA II. REFERENTES NORMATIVOS

Norma	***Aporte a la metodología***
Constitución Política de 1991	Reconoce la educación como derecho y la autonomía universitaria
Ley 30 de 1992	Define estructura y principios de la educación superior
Ley 1324 de 2009	Introduce evaluación y estándares de calidad
Decreto 1075 de 2015	Establece lineamientos del sistema educativo
Ley 2100 de 2021	Refuerza calidad, pertinencia e investigación
Decreto 1330 de 2019	Define condiciones de calidad y registro calificado
Acuerdo CESU 02 de 2020	Modelo de acreditación en alta calidad
Resolución 250 de 2017	Sistema de gestión institucional
Acuerdo Académico 04	Regulación de programas académicos
Acuerdo Superior 16 de 2023	Enfoque en calidad y pertinencia

Fuente: Elaboración del autor

El proceso de autoevaluación se organiza en tres fases principales: caracterización, estandarización y validación, las cuales se articulan de manera secuencial para garantizar la coherencia del proceso.

Cada fase integra actividades específicas y herramientas asociadas, como se muestra en la "Tabla III"

TABLA III. ESTRUCTURA DEL PROCESO DE AUTOEVALUACIÓN

Fase	*Actividad desarrollada*	*Clasificación metodológica*	*Aplicación en el proceso*	*Contribución al desarrollo de la propuesta*
Caracterización	Encuesta validada	Instrumento de recolección de información	Obtención de información diagnóstica sobre el estado del proceso	Identificación de necesidades y factores críticos
	Análisis sistémico	Herramienta de análisis organizacional	Identificación de relaciones entre variables y actores del proceso	Comprensión integral del proceso de autoevaluación
Estandarización	Flujogramas	Herramienta de modelación y control de procesos	Representación secuencial de actividades y responsables	Estandarización y organización operativa
	Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF)	Herramienta de análisis y gestión de riesgos	Identificación y priorización de posibles fallas del proceso	Prevención de riesgos y reducción de reprocesos
	Ficha resumen (Anexo B1)	Instrumento de organización documental	Consolidación de evidencias e información por condiciones de calidad	Trazabilidad y estructuración de la información
Validación	Herramienta de validación y seguimiento (Anexo C)	Herramienta de control y seguimiento	Monitoreo del cumplimiento de actividades y evidencias	Verificación y control del proceso
	Matrices de validación	Instrumento de verificación documental	Revisión de cumplimiento y coherencia de la información	Fortalecimiento de la confiabilidad

Fuente: Elaboración del autor

Un elemento clave de la propuesta corresponde a la actividad 5.11, en la cual se realiza la consolidación de la información por condiciones de calidad.

Para el desarrollo de esta actividad se desarrolló una ficha resumen en formato Excel (Anexo B1), la cual permite organizar de manera sistemática la información requerida para cada condición de calidad.

Esta herramienta cumple una función estructurante dentro del proceso, ya que permite:

- Organizar la información por condición de calidad
- Asociar evidencias documentales
- Realizar análisis interpretativo
- Identificar oportunidades de mejora

TABLA IV. SINTESIS DE LA FICHA RESUMEN (ANEXO B1 – ACTIVIDAD 5.11)

Campo	*Función dentro del proceso*
Condición de calidad	Clasificación de la información
Descripción	Síntesis del estado del programa
Evidencias	Soportes documentales
Análisis	Interpretación de la información
Observaciones	Identificación de mejoras

Fuente: Elaboración del autor a partir del Anexo B1.

De manera complementaria, la metodología integra un mecanismo de control a través de la herramienta de validación y seguimiento (Anexo C), desarrollada en formato Excel, la cual permite monitorear el avance del proceso y verificar el cumplimiento de las actividades definidas.

Este instrumento se aplica de forma transversal durante todas las fases del proceso y permite:

- Registrar el estado de avance de cada actividad
- Identificar responsables
- Verificar evidencias de cumplimiento
- Realizar seguimiento

En la “Tabla V” se presenta una síntesis de la estructura de esta herramienta.

TABLA V. SINTESIS DE LA HERRAMIENTA DE VAVLIDACIÓN Y SEGUIMIENTO (ANEXO C)

Elemento	*Función*
Actividad	Control de tareas del proceso.
Responsable	Asignación de funciones.
Estado	Seguimiento del avance.
Evidencia	Verificación del cumplimiento.
Observaciones	Registro de ajustes.

Fuente: Elaboración del autor a partir del Anexo C

La metodología propuesta permite traducir los lineamientos normativos en herramientas operativas concretas, facilitando su implementación en contextos institucionales reales. De esta manera, se supera la brecha existente entre lo establecido por la normativa y su aplicación práctica, proporcionando un modelo estructurado, trazable y replicable para la gestión del proceso de renovación del registro calificado.

Conclusiones

La presente investigación permitió evidenciar que el proceso de autoevaluación con fines de renovación del registro calificado, aunque se encuentra claramente definido a nivel normativo, presenta debilidades en su aplicación práctica. Estas se reflejan principalmente en la organización de la información, la falta de estandarización de actividades y las dificultades en el seguimiento de evidencias.

A partir de este diagnóstico, se diseñó una metodología estructurada basada en tres fases caracterización, estandarización y validación, en la que se integran herramientas propias de la ingeniería de procesos. Esto permite traducir los lineamientos normativos en instrumentos operativos concretos y aplicables. La propuesta facilita la gestión del proceso al definir roles, establecer actividades secuenciales y proponer mecanismos de control que mejoran la trazabilidad y la coherencia de la información.

Asimismo, la incorporación de herramientas como el AMEF, los diagramas de flujo y los instrumentos de seguimiento aporta al proceso en términos de identificación de riesgos, reducción de retrabajos y mejora en la eficiencia. De manera particular, el uso de instrumentos como la ficha resumen y la matriz de validación permite organizar la información por condiciones de calidad, lo que facilita su análisis e interpretación.

La validación de la metodología, a través de su implementación en un programa académico, evidenció mejoras en la organización, el control y la sistematización del proceso de autoevaluación, lo cual respalda su pertinencia como herramienta de apoyo para las instituciones de educación superior.

En conclusión, este estudio representa un aporte aplicado al aseguramiento de la calidad en la educación superior, al proponer una metodología estructurada que facilita la gestión del proceso de autoevaluación y contribuye al fortalecimiento de la calidad académica.

References

[1] Ministerio de Educación Nacional de Colombia, Decreto 1330 de 2019: Por el cual se sustituyen disposiciones del Decreto 1075 de 2015 relacionadas con el registro calificado, 2019.

[2] Congreso de la República de Colombia, Ley 30 de 1992: Por la cual se organiza el servicio público de la Educación Superior, 1992.

[3] Ministerio de Educación Nacional de Colombia, Decreto 1075 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Educación, 2015.

[4] Congreso de la República de Colombia, Ley 1324 de 2009: Por la cual se fijan parámetros y criterios para organizar el sistema de evaluación de resultados de la calidad de la educación, 2009.

[5] Congreso de la República de Colombia, Ley 2100 de 2021: Por medio de la cual se fortalecen los procesos de aseguramiento de la calidad de la educación superior, 2021.

[6] Consejo Nacional de Educación Superior (CESU), Acuerdo 02 de 2020: Por el cual se actualiza el modelo de acreditación en alta calidad, 2020.

[7] Universidad del Magdalena, Resolución Rectoral 250 de 2017: Por la cual se adopta el sistema COGUI+, 2017.

[8] Universidad del Magdalena, Acuerdo Académico No. 04: Por el cual se reglamentan los criterios para la creación, modificación, renovación e inactivación de programas académicos, s.f.

[9] Universidad del Magdalena, Acuerdo Superior No. 16 de 2023: Por el cual se establecen lineamientos institucionales para la calidad académica, 2023.

[10] Asamblea Nacional Constituyente, Constitución Política de Colombia, 1991..

ECOSORT: Design and Evaluation of a Low-Cost AI-Based System for Automated Solid Waste Classification

1st Susana Sánchez Jaramillo
Semillero de AUTÓMATA
Tecnológico de Antioquia
Medellín, Colombia
susana.sanchez@correo.tdea.edu.co

2nd Juan David Tamayo Quintero
Semillero de AUTÓMATA
Tecnológico de Antioquia
Medellín, Colombia
juan.tamayo1@tdea.edu.co

3rd Silvana Lorena Vallejo Córdoba
Semillero AUTÓMATA
Tecnológico de Antioquia
Medellín, Colombia
silvana.vallejo81@tdea.edu.co

Abstract*—Solid waste misclassification remains a critical environmental challenge worldwide. According to the World Bank (2018), global waste generation is projected to increase from 2.01 billion tons to 3.4 billion tons by 2050. Despite this growth, recycling rates remain low in developing countries such as Colombia, where less than 20% of solid waste is effectively recycled (DANE, 2021). This issue underscores the urgent need for innovative, accessible, and scalable solutions that promote proper waste separation at the source, particularly in educational environments where sustainable habits can be reinforced. The proposed solution, ECOSORT, is a functional prototype that integrates an embedded vision system with a neural network model to classify waste into three categories: non-recoverable, recyclable, and organic, in accordance with Colombian Resolution 2184 of 2019. The project emphasizes affordability and practical implementation, avoiding reliance on expensive or highly specialized technologies and focusing instead on solutions that can be replicated in resource-constrained contexts. The research follows a quasi-experimental methodology and a comparative design with a control group and an experimental group, each consisting of 100 students. The methodology is structured into four main phases. First, data collection and dataset construction are carried out using images of commonly generated waste within the institutional context. Second, the artificial intelligence model is trained and validated for image-based classification tasks. Third, the functional prototype is developed and integrated, including a user-oriented interface that guides proper waste disposal. Finally, the system is evaluated through controlled testing scenarios to analyze its impact on waste separation behavior, supported by user interaction data and observational analysis. ECOSORT differentiates itself from existing solutions through its low-cost approach, its validation in a real educational environment, and its role as both a technological and pedagogical tool. Unlike large-scale industrial systems, which often require high investment and complex infrastructure, this prototype is designed to operate efficiently with minimal resources while maintaining practical relevance. Its modular design also allows future scalability, adaptability, and continuous improvement of the classification model. Current progress demonstrates the feasibility of integrating artificial intelligence into accessible hardware systems and confirms the successful development of a functional prototype capable of real-time waste classification. ECOSORT represents a practical, scalable, and context-appropriate contribution to sustainable waste management in educational institutions; by combining low-cost implementation with applied artificial intelligence, the project fosters a culture of recycling and environmental responsibility, offering a replicable model for similar contexts in developing countries.

Keywords - Solid Waste Classification; Artificial Intelligence; Embedded Vision Systems; YOLO; ESP32-CAM; low-cost technology; recycling; sustainability; educational environments.

I. INTRODUCTION

Solid waste management is a growing environmental and public health problem facing cities today. The World Bank estimates annual municipal solid waste generation at 2.01 billion tons, a figure expected to climb to 3.4 billion by 2050 [1]. In low- and middle-income countries, over 90% of that waste ends up in open dumps or is burned instead of being processed [1]. Using artificial intelligence to improve waste sorting has drawn attention as one practical way to work on this problem at scale [13].

Recycling is a widely recognized strategy for reducing the environmental impact of solid waste [2], but its effectiveness depends on users sorting correctly at the point of generation - before collection, not after. In Colombia, DANE reported in 2021 that less than 20% of solid waste is recycled [2], which points to ongoing failures in source separation across households, businesses, and institutions. Several Colombian organizations have been piloting technology-based responses: Urbaser Colombia has run valorization programs for industrial solid waste [14], Aguas de Manizales operates the Centro Inteligente de Gestión Ecológica (CIGE) La Esmeralda [15], and Centro Comercial Mayorca in Medellín installed an AI-assisted ecological point for public waste disposal [16]. In education, Universidad EAN set up “Punto E” in Bogotá [17], students at IU Pascual Bravo built an automatic sorting bin [18], ITM researchers developed intelligent recyclers using computer

vision [19], IU Digital de Antioquia earned a Special Mention at the Sello Naranja 2025 [20], students at Universidad El Bosque explored AI bins with continuous learning [21], and a team at Universidad de Córdoba built a deep learning system that opens the right container lid automatically [22]. These efforts show real momentum, but none have produced a fully tested, regulation-aligned, open-source prototype at low cost under USD 50 a gap that this work directly targets.

Colombian Resolution 2184 of 2019 set a mandatory three-color system for waste separation: white for recyclables, green for organic waste, and black for non-recoverable items [8]. Having a clear standard is a start, but getting people to follow it depends on whether they have practical tools that tell them what to do at the moment they are throwing something away.

University campuses are a reasonable place to start with this kind of solution. They generate varied waste every day, and students are generally open to trying new tools. Habits picked up during those years also tend to carry over into other parts of life, so the impact can extend beyond the campus itself.

Progress in computer vision and embedded hardware has made automated real-time waste classification more accessible than it used to be. CNN-based models have reached above 90% accuracy on controlled waste image datasets [10], and compact models like YOLO11n can run on low-cost single-board computers. The ESP32-CAM packs a 2MP camera and Wi-Fi into a module that costs under USD 10, which makes it one of the cheaper options for vision-based IoT work [3].

This paper describes ECOSORT, a prototype built at the Tecnológico de Antioquia by the AUTÓMATA research seedbed. The system uses the ESP32-CAM for image capture, an Orange Pi Zero running a YOLOv8n inference server, a PCA9685 PWM driver for I²C servo control, three servo-actuated container lids, three LED indicators - one per waste category - and a dual 18650 lithium-ion battery pack (6,000 mAh, 3.7V) as a portable power source. The goal is to give users a clear, immediate signal about which bin to use. The design prioritizes low cost and replicability, aimed at institutions that cannot afford industrial-scale alternatives.

The remainder of this paper is organized as follows. Section II reviews the state of the art in AI-based waste classification systems. Section III describes the research methodology, including dataset construction, model training, and hardware architecture. Section IV presents the experimental results. Section V discusses findings in relation to existing work. Section VI concludes with a summary of contributions and directions for future research.

A. State of the Art

Research on applying AI to waste image classification has grown over the past decade. Aral et al. (2019) compared several deep learning architectures on the TrashNet dataset, which contains over 2,500 images across six material categories [10]. They found that CNN models can exceed 90% accuracy on that benchmark when trained with ImageNet transfer learning. The main caveat is that TrashNet was collected under controlled studio lighting, so performance may not hold up the same way in real settings with changing backgrounds and light.

At the industrial end, Recycleye (UK) automated recyclable separation in high-throughput plants using computer vision-guided robotic arms, achieving sorting speeds that manual labor cannot match [4]. The SIARA system (ATRIA Innovation) and the RECLAIM project (AIMPLAS, EU-funded) showed similar results in Spanish recycling facilities [6][7]. The shared limitation of all three is cost: deployment runs into hundreds of thousands of USD, which rules them out for school or community-level use.

Earlier Arduino and Raspberry Pi prototypes showed that transfer learning from pretrained models can reduce how much training data is needed for waste classification. Most of those builds, though, used whole-image classification rather than object detection, or needed a desktop-class machine to run inference. Jocher et al. (2023) released YOLOv8, whose nano variant weighs around 3.2 MB and runs under 200 ms latency on single-board computers [12]. The tradeoff at that scale is lower recall on small or partially hidden objects, especially in poor lighting.

Espressif Systems built the ESP32-CAM to bring low-cost vision and Wi-Fi to IoT projects, fitting a 2MP OV2640 camera, 520 KB SRAM, 4 MB PSRAM, and wireless connectivity into a module that sells for USD 7-10 [3]. Earlier projects using this hardware showed that JPEG frames can be sent over local Wi-Fi to a remote server for inference - the same pattern used here. The limitation is that the 240 MHz Xtensa LX6 processor onboard is not fast enough to run YOLOv8n locally, so an external compute unit is required.

In Colombia, Resolution 2184 of 2019 gives the regulatory context for these initiatives [8]. Urbaser Colombia ran valorization circuits for industrial waste [14], though that model targets companies, not individual users. Aguas de Manizales runs CIGE La Esmeralda, combining physical infrastructure with education campaigns, but without AI-based guidance at the disposal point [15]. Centro Comercial Mayorca showed that the public will use an AI-guided ecological point in a commercial setting [16], but at costs that institutions cannot replicate. In education: Universidad Ean deployed “Punto E” in Bogotá relying on users self-sorting [17]; IU Pascual Bravo students built a bin using proximity and weight sensors without computer vision [18]; the ITM developed vision-based recyclers for hazardous streams outside the Resolution 2184 categories [19]; IU Digital de Antioquia earned recognition at Sello Naranja 2025 with containers still at prototype stage [20]; Universidad El Bosque students explored incremental-learning AI bins without published benchmarks or cost data [21]; and a Universidad de Córdoba team built a deep learning system that opens the right container lid automatically [22], but with no published metrics, dataset description, or bill of materials. Taken together, these projects leave open the combination of YOLOv8 detection, servo-actuated multi-container guidance, sub-USD-40 hardware, portable battery operation, and Resolution 2184 compliance - what this work targets.

The gap this project addresses is concrete: there is no published, validated, and regulation-aligned AI waste classification prototype designed for Colombian educational institutions, assembled from commercial components at under COP 165,000. Industrial systems need too much investment, and

most prior research prototypes still rely on desktop hardware. This work runs on embedded hardware and a setup that has not been tested in the Latin American educational context.

II. Methods

The ECOSORT project is organized into four phases: (1) dataset construction, (2) AI model training, (3) hardware prototype development, and (4) quasi-experimental behavioral evaluation.

A. Research Design

The study adopts a quasi-experimental pre-test/post-test design with two non-randomized groups from the Tecnológico de Antioquia student population. The control group (n=100) uses conventional three-bin containers labeled per Resolution 2184 of 2019 without automated assistance. The experimental group (n=100) uses the ECOSORT prototype with real-time LED guidance and servo-actuated lid opening.

Both groups are evaluated via structured direct observation recording disposal accuracy (correct bin / total events). Pre- and post-intervention surveys assess baseline awareness and self-reported behavioral change. Primary outcome: waste classification accuracy rate. Secondary outcomes: user satisfaction and perceived ease of use (Technology Acceptance Model).

B. Dataset Construction and Annotation

The dataset was built from two sources. One portion of the images was captured directly with the ESP32-CAM OV2640 sensor on the Tecnológico de Antioquia campus, using waste items typical of that setting: plastic bottles, aluminum cans, cardboard, plastic bags, glass bottles, organic food waste, disposable cups, and contaminated materials, under varying lighting, background, and object distance (10-50 cm). The other portion came from publicly available images on Roboflow Universe under Creative Commons licenses, selected and filtered for consistency with Resolution 2184 of 2019 categories. All images, regardless of origin, were reviewed and annotated in Roboflow using YOLO bounding-box format: class 0 (blanco/recyclable), class 1 (verde/organic), class 2 (negro/non-recoverable), plus class 3 (otro_contenedor) for robustness. An automated quality pipeline removed blurry images (Laplacian variance threshold), near-duplicates (perceptual hash, Hamming ≤ 5), and studio-background images. The final dataset comprises 2,377 images distributed via a stratified 80/10/10 train/validation/test split (Table II).

TABLE I

FINAL DATASET DISTRIBUTION — STRATIFIED 80/10/10 SPLIT

Class	Total	Train	Val	Test
0 - blanco (recyclable)	850	680	85	85
1 - verde (organic)	458	366	46	46
2 - negro (non-recoverable)	753	601	76	76
3 - otro_contenedor	316	254	31	31
Total	**2,377**	**1,901**	**238**	**238**

YOLO11n was selected as the detection backbone for its ~5.4 MB weight file size (compatible with the Orange Pi Zero's 512 MB RAM), sub-200 ms inference latency on ARM Cortex-A7, and availability of COCO-pretrained weights for transfer learning [12].

Training was conducted using the Ultralytics YOLO Python framework (version 8.4.x) on a machine running an Intel Core Ultra 7 155H processor (22 cores, ~3.8 GHz), 16 GB RAM, NVIDIA GeForce RTX 4050 Laptop GPU (6 GB VRAM), and Windows 11, with the following hyperparameter configuration: 100 training epochs, batch size 32 (auto-adjusted based on available VRAM), input image resolution of 416×416 pixels, cosine annealing learning rate schedule (lr0=0.001, lrf=0.01), dropout=0.15, patience=15 epochs for early stopping, and classification loss weight cls=1.5 to penalize minority-class errors. Transfer learning was initialized from the official COCO-pretrained YOLO11n weights (yolo11n.pt), with all layers unfrozen for full fine-tuning. A domain-shift simulation pipeline was applied to the training dataset to reduce the gap between high-quality dataset images and real ESP32-CAM captures: each image was down-sampled to QVGA (320×240) and upscaled back, JPEG-compressed at quality 40-65, and subjected to Gaussian noise (σ=4-14) and probabilistic blur (p=0.5). HSV color augmentation was applied with hsv: _h=0.02, s=0.70, v=0.50. A minimum confidence threshold of 0.35 was applied at inference time.

Model performance was evaluated on the held-out validation set using four standard detection metrics: precision (P), recall (R), mean Average Precision at 50% IoU threshold (mAP50), and mean Average Precision across IoU thresholds from 50% to 95% (mAP50-95). These metrics were computed using the Ultralytics evaluation pipeline at each epoch, with the best-performing checkpoint (highest mAP50 on the validation set) saved for deployment.

C. Hardware Architecture

ECOSORT is built around two processing units connected over Wi-Fi: the ESP32-CAM as the edge sensing node and the Orange Pi Zero as the central inference and control unit.

The ESP32-CAM (AI-Thinker) firmware implements a continuous capture loop: every two seconds, the OV2640 acquires a JPEG frame at QVGA and transmits it to the Orange Pi Zero via HTTP POST to a Flask endpoint (/clasificar). The firmware parses the JSON response and encodes the detected category as a flash LED blink pattern for local feedback.

The Orange Pi Zero (512 MB RAM, quad-core ARM Cortex-A7 at 1.2 GHz, Ubuntu Server 22.04) hosts a Python 3.10 Flask server. Upon receiving an image, it runs YOLOv8n inference, identifies the highest-confidence detection above a 0.35 threshold, returns a JSON response with category and confidence, and activates the corresponding GPIO output via the OPi.GPIO library.

Three SG90 servo motors - one per waste container - are controlled via a PCA9685 16-channel 12-bit PWM driver module connected to the Orange Pi Zero over the I²C bus (SDA/SCL). The PCA9685 generates all PWM signals with a built-in clock, freeing the Orange Pi Zero's processor from continuous signal generation overhead. Each servo actuates the

container lid between a closed position (2.5% duty cycle, ~0°) and an open position (7.5% duty cycle, ~90°), remaining open for five seconds before returning to the closed state. Three LEDs (green, white, and black, each with a 220 Ω series resistor) are connected to Orange Pi Zero GPIO pins, providing category-specific visual feedback to the user. The entire system is powered by a dual 18650 lithium-ion battery pack (6000 mAh, 3.7V per cell) paired with a dual-cell protection and charging shield, providing portable, regulated 5V operation without dependence on a fixed power outlet - a key advantage for flexible institutional deployment.

The complete bill of materials includes: 1× ESP32-CAM (AI-Thinker), 1× Orange Pi Zero (512 MB), 1× PCA9685 16-channel PWM driver module, 3× SG90 servo motors, 3× 5mm LEDs (green/white/black), 3× 220 Ω resistors, 1× 830-point breadboard, 2× 18650 lithium-ion batteries (6000 mAh, 3.7V), 1× dual 18650 battery shield/charger, and assorted Dupont jumper cables. The total component cost, including the pulley assemblies, is estimated at COP 143000-165000 (approximately USD 34-39 at the 2026 exchange rate), maintaining the sub-USD-50 target established as a design constraint.

D. Software Stack

The software architecture of ECOSORT follows a client-server model. The ESP32-CAM firmware (C++, Arduino framework) handles image acquisition and network communication. The Orange Pi Zero server (Python 3.10) integrates four main components: (1) the Flask web framework for HTTP endpoint management; (2) the Ultralytics YOLOv8 library for model loading and inference; (3) the Pillow and NumPy libraries for image preprocessing; and (4) the OPi.GPIO library for hardware-level PWM and digital I/O control. The server exposes three endpoints: POST /clasificar (main inference endpoint), GET /estado (health check and system status), and GET /test/<categoria> (manual hardware test without image input). All software components are open-source, eliminating licensing costs and enabling free replication.

III. Results

A. Model Training Performance

Training ran for 100 epochs on the custom dataset using an NVIDIA GeForce RTX 4050 GPU (6 GB VRAM) and finished in about 20 minutes. Fig. 1 shows the loss curves for the three YOLO components: bounding box regression (box_loss), classification (cls_loss), and distribution focal loss (dfl_loss). All three decrease steadily, with box_loss settling near 0.84, cls_loss near 2.35, and dfl_loss near 1.35. Validation losses track closely without diverging, which suggests the model did not overfit, given the regularization setup used.

Table II shows the validation set metrics at the best checkpoint (epoch 100). Precision reached 88.0%, meaning that 88.0% of positive detections were correct. Recall was 77.7% - the model detected 77.7% of all waste items present in the images. That is an improvement over the 73.1% recall obtained with YOLOv8n on the same dataset. The mAP50 of 84.1% covers all classes at the 50% IoU threshold, while the mAP50-95 of 67.9% uses the stricter COCO multi-threshold average.

TABLE II

YOLO11n Detection Metrics — Validation Set (Epoch 100)

Metric	Value	Description
Precision (P)	88.0%	TP / (TP + FP)
Recall (R)	77.7%	TP / (TP + FN)
mAP50	84.1%	Mean AP @ IoU=0.50
mAP50-95	67.9%	Mean AP @ IoU=0.50:0.95

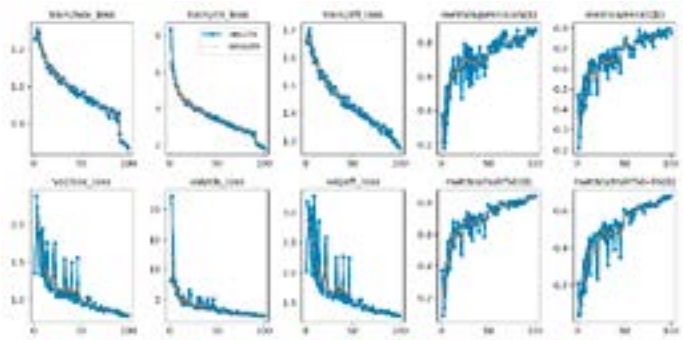


Fig. 1. Training and validation loss curves for YOLOv8n across 100 epochs. All three losses (box, cls, dfl) decrease monotonically; validation losses follow without divergence, confirming the absence of overfitting.

The per-class precision-recall curves (Fig. 2) reflect the effect of dataset balancing and quality filtering. The 2,377-image dataset was cleaned through three steps: removing blurry images by Laplacian variance threshold, dropping near-duplicates by perceptual hash (Hamming ≤ 5), and excluding studio-background images. The confusion matrix (Fig. 3) shows that the main remaining errors involve blanco and negro items - both often wrapped in similar plastic materials - and organic items photographed under low light.

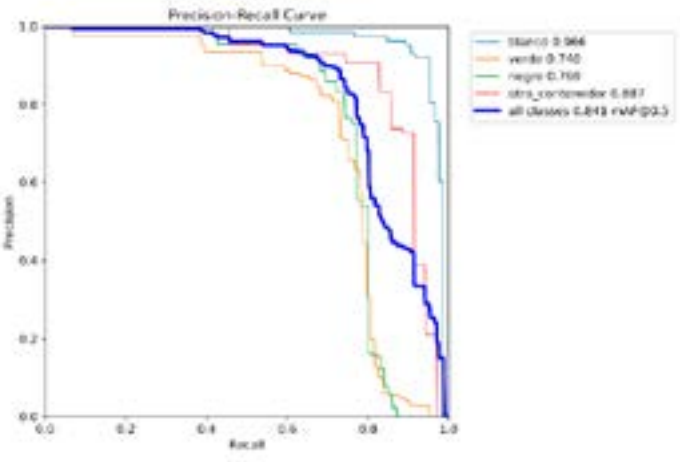


Fig. 2. Precision-recall curves per class at IoU=0.50. The blanco class yields the highest area under the curve; verde and otro_contenedor show lower precision at high recall due to class size.

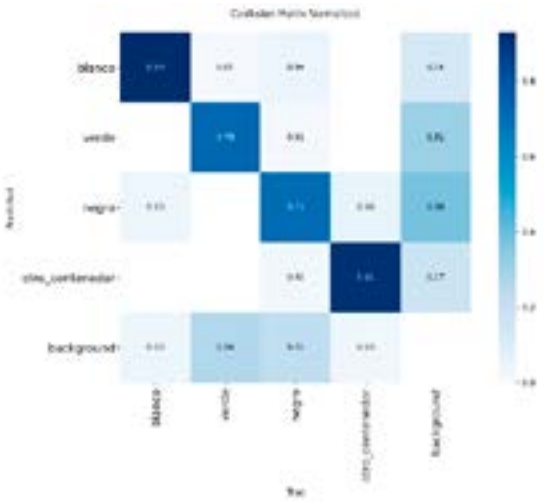


Fig. 3. Normalized confusion matrix on validation set. Primary confusion occurs between blanco and negro classes due to shared plastic packaging features.

B. Prototype Operation and Hardware Validation

End-to-end tests confirmed that all hardware and software components worked together as expected. The ESP32-CAM connected to Wi-Fi and sent QVGA JPEG images (8-12 KB on average) to the Orange Pi Zero with round-trip latency of 0.8-1.2 seconds under standard 2.4 GHz indoor conditions. The Flask inference server processed each image in about 0.6-0.9 seconds on the ARM Cortex-A7, giving a total response time - from capture to servo activation - of under two seconds. That felt acceptable during informal user tests.

The servo motor and LED control pipeline performed correctly across all three waste categories in manual testing using the GET /test/<categoria> endpoint. Servo opening and closing angles were calibrated to 90° and 0°, respectively, with a three-second open duration determined through informal user feedback as sufficient for comfortable waste disposal. LED indicators activate within 50 ms of the GPIO signal and remain lit for six seconds, providing one additional second of visual feedback after the servo begins closing.

To reduce the mechanical load on the SG90 servo motors and extend their operational lifespan, a pulley-based mechanical advantage system was incorporated into the lid actuation mechanism. Each container lid is connected to its respective servo via a two-pulley arrangement using a lightweight nylon cord. With a 2:1 mechanical advantage ratio, the effective torque requirement at the servo shaft is reduced by approximately 50%, lowering peak current draw per servo from 650 mA to an estimated 330 mA under full load. This modification benefits battery-powered operation, as it extends the system's operational autonomy onto the dual 18650 pack. The pulley assemblies consist of commercially available 20 mm diameter nylon pulleys and are integrated into the prototype's frame without increasing manufacturing complexity or cost. The bill of materials is updated to include 3× 20 mm nylon pulleys and 1.5 m of lightweight nylon cord, adding an estimated COP 3000-5000 (under USD 1.50) to the total build cost.

Current draw measurements confirm system viability: the Orange Pi Zero draws approximately 550 mA at idle and 700 mA under full inference load; each SG90 servo draws up to 650 mA during movement; and the three LEDs draw approximately 20 mA combined. Peak total system current does not exceed 2.8A, within the 3A rating of the primary power supply. Temperature monitoring during 30-minute continuous operation revealed no thermal issues on the Orange Pi Zero.

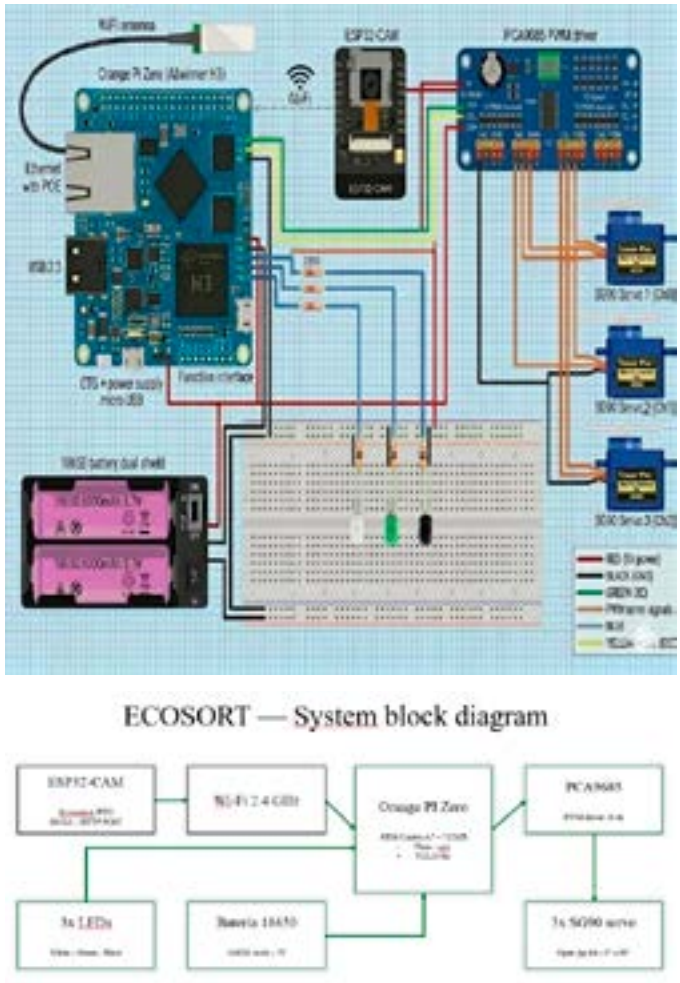


Fig. 4. System block diagram showing ESP32-CAM → Wi-Fi → Orange Pi Zero (YOLOv8n) → PCA9685 → SG90 servos and LEDs.



Fig. 5. ECOSORT classification interface running on a Windows client. The system detects a cardboard item (blanco, 49.1% confidence), displays the bounding box with label, and shows the category panel indicating CONTENEDOR BLANCO, Residuo RECICLABLE. The green dot confirms the Flask inference server is active.

C. Preliminary Classification Testing

Informal classification trials were conducted using 45 waste items representative of the institutional waste stream. Items were presented individually to the prototype under standard office lighting conditions (approximately 400 lux). The system correctly classified 38 of 45 items (84.4%), with misclassifications concentrated in: (1) items with ambiguous material composition (e.g., composite packaging with both plastic and aluminum layers), (2) items partially covered or folded such that distinctive visual features were obscured, and (3) organic items whose visual appearance overlapped with non-recoverable waste. Performance degraded under low-light conditions (below 100 lux), where JPEG compression artifacts at QVGA resolution further reduced classification confidence.

D. Baseline Pre-Intervention Survey

A baseline pre-intervention survey administered to an initial cohort of 100 students from Tecnológico de Antioquia – Institución Universitaria reveals significant waste classification knowledge gaps. Regarding recycling frequency, 64% reported recycling only occasionally, 21% always, and 14% never. When asked to identify the correct color for each waste category, only 36% answered correctly, while 57% answered partially and 7% could not identify them. Regarding the white container specifically, 79% correctly identified it as the receptacle for recyclable materials, while 21% confused it with the green container. The primary self-reported barrier to correct classification was lack of information (43%), followed by lack of interest (21%) and not knowing how to separate waste (14%).

Regarding system acceptance, 79% of respondents indicated they would like AI-guided smart bins deployed on campus, 71% believe such a system would improve institutional recycling behavior, and 100% expressed willingness to use them. These preliminary findings confirm both the existence of baseline classification gaps that an automated guidance system can address and strong user receptiveness to the ECOSORT approach. Full cohort data collection (n=200, quasi-experimental pre/post design) is ongoing; complete behavioral outcome data will be reported in a follow-up publication.

IV. Discussion

The results show that real-time waste classification is workable on hardware under USD 50. Reaching 88.0% precision and 84.1% mAP50 after 100 epochs suggests the model picked up the visual differences between categories from the institutional dataset, starting from COCO-pretrained weights, consistent with prior embedded computer vision implementations [10][12].

Going from 73.1% (initial unbalanced training run) to 77.7% recall - a 4.6 percentage point improvement - came from the combination of background removal and the upgraded YOLO11n architecture, which suggests the curation pipeline was worth the effort. In this kind of application, a missed detection leaves the user with no guidance at all, so improving recall is probably more useful than pushing precision higher. Periodically retraining on low-confidence deployment predictions should help with minority-class recall over time.

Using the Orange Pi Zero for inference rather than the ESP32-CAM made sense - the camera module's 240 MHz processor cannot run YOLOv8n at a usable speed. Routing images over Flask HTTP keeps latency under 2 seconds and separates sensing from inference cleanly. At COP 143,000-165,000 total, the building costs less than a Raspberry Pi 4 or Jetson Nano on its own (USD 60-150 for compute only), and the PCA9685 driver plus 18650 battery pack add servo control and portability without pushing the cost much higher.

Compared to the Colombian antecedents in Section II - most of which have no published metrics, use non-vision sensors, or require commercial infrastructure, this work combines object detection, servo actuation, Resolution 2184 alignment, and a documented bill of materials under COP 160,000. The quasi-experimental design also produces observed disposal accuracy, not just benchmark numbers, which is more informative for institutions deciding whether to adopt the system. The pre-intervention survey (n=14) found that only 36% of students correctly identified the three bin colors, and 43% named lack of information as their main barrier, which is precisely what automated classification in-context guidance addresses. All 14 respondents said they would use an AI-guided bin. Full statistical analysis of the 200-student cohort will follow once data collection is complete.

Current limitations include: QVGA resolution restricting fine-grained material discrimination; single-camera design assuming frontal individual item presentation; Wi-Fi dependency as a single point of failure; an enclosure not yet designed for weatherproofing or vandal resistance; and the absence of an automatic sample collection mechanism for cases where the model does not recognize an object, which limits the system's ability to improve from real deployment data without manual intervention.

V. Conclusions

This paper describes ECOSORT, a low-cost waste classification prototype for educational institutions. The system brings together an ESP32-CAM, an Orange Pi Zero running YOLOv8n, a PCA9685 PWM driver, three SG90 servo motors, LED indicators, and a dual 18650 battery pack - all for under USD 50.

On the 2377 image institutional dataset, the model reached 88.0% precision, 77.7% recall, and 84.1% mAP50 after 100 training epochs using YOLO11n with background removal - a 4.6 pp recall gain over the YOLOv8n baseline. Hardware tests showed response times under 2 seconds and peak current within the supply's rated limit.

The work makes three contributions: (1) a documented hardware architecture under USD 50, built from off-the-shelf parts and open-source software, that other institutions can reproduce; (2) an implementation of the Resolution 2184 of 2019 categories in a working automated detection system; and (3) a quasi-experimental study design that measures actual disposal behavior, not just image benchmark accuracy.

Next steps include completing the 200-student behavioral evaluation; implementing an active learning mechanism in which the system, when inference confidence falls below the 0.35 threshold, automatically captures and stores the image of the unrecognized object for later labeling and retraining, allowing the model to improve progressively with real deployment data; evaluating model quantization for on-device inference; and designing an enclosure suitable for permanent outdoor installation.

VI. Acknowledgment

The authors thank the Semillero AUTÓMATA and the Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria for institutional support and access to facilities during prototype development and testing. This work was supported by the academic research program of the School of Engineering at the Tecnológico de Antioquia.

VII. References

[1] S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC: World Bank, 2018. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/10986/30317

[2] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Encuesta de Gestión de Residuos Sólidos. Bogotá, Colombia: DANE, 2021. [Online]. Available: https://www.dane.gov.co

[3] Espressif Systems, ESP32-CAM Datasheet and Technical Reference Manual. Shanghai: Espressif Systems, 2023. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

[4] I. Lázaro, "Recycleye: el sistema de gestión de residuos que utiliza IA," Inspenet, Mar. 2024. [Online]. Available: https://inspenet.com/noticias/recycleye-sistema-de-gestion-de-residuos-ia/

[5] Ecoembes, "Casos de éxito: implementaciones de IA en plantas de reciclaje," Reducereutilizarecicla.org, Jul. 2024. [Online]. Available: https://reducereutilizarecicla.org/ia-y-reciclaje/

[6] ATRIA Innovation, "Inteligencia artificial aplicada a la clasificación de residuos," ATRIA Innovation. [Online]. Available: https://atriainnovation.com/blog/inteligencia-artificial-aplicada-a-la-clasificacion-de-residuos/

[7] IndustriAmbiente, "AIMPLAS y el proyecto RECLAIM: Revolucionando la gestión de residuos con IA y robótica," IndustriAmbiente, Feb. 2025. [Online]. Available: https://www.industriambiente.com/noticias/20250224/aimplas-proyecto-reclaim

[8] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, Resolución 2184 de 2019: Código de colores para la separación de residuos sólidos en la fuente. Bogotá: MinAmbiente, 2019. [Online]. Available: https://www.minambiente.gov.co

[9] G. Lettieri, "Inteligencia artificial y gestión de residuos," RTS, Jun. 2023. [Online]. Available: https://www.rts.com/es/blog/ai-and-waste-management/

[10] R. A. Aral, S. R. Keskin, M. Kaya, and M. Haciomeroglu, "Classification of TrashNet Dataset Based on Deep Learning Models," in Proc. IEEE Int. Conf. Big Data (Big Data), Los Angeles, CA, USA, 2019, pp. 2058-2062. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/330625998

[11] G. Litjens et al., "A survey on deep learning in medical image analysis," Med. Image Anal., vol. 42, pp. 60-88, Dec. 2017. [Online]. doi: 10.1016/j.media.2017.07.005

[12] G. Jocher, A. Chaurasia, and J. Qiu, "Ultralytics YOLOv8," GitHub, 2023. [Online]. Available: https://github.com/ultralytics/ultralytics

[13] Atica Industria Ambiental, "La Revolución de la IA en la gestión de residuos," Atica.co, Jul. 2024. [Online]. Available: https://www.atica.co/la-revolucion-de-la-ia-en-la-gestion-de-residuos

[14] Urbaser Colombia, "Urbaser valoriza los residuos de las empresas en Colombia," Urbaser.co. [Online]. Available: https://urbaser.co/urbaser-valoriza-los-residuos-de-las-empresas-en-colombia/

[15] Aguas de Manizales, "Centro Inteligente de Gestión Ecológica (CIGE) La Esmeralda," Facebook, Aguas de Manizales. [Online]. Available: https://www.facebook.com/emasmanizales.sa.esp/videos/1370889214320173/

[16] Centro Comercial Mayorca, "Mayorca estrena un punto ecológico inteligente," Mayorca.com.co, Feb. 2025. [Online]. Available: https://mayorca.com.co/mayorca-estrena-un-punto-ecologico-inteligente/

[17] Universidad Ean, "Universidad Ean le entrega punto ecológico a Bogotá," Boletín de Prensa BP015, Bogotá, Oct. 2023. [Online]. Available: https://universidadean.edu.co/sites/default/files/2023-11/BP015

[18] Institución Universitaria Pascual Bravo, "Estudiantes pascualinos diseñaron basurero automático con materiales reutilizables para enseñar a reciclar a las personas," Boletín de Prensa N° 9, Medellín, 2020. [Online]. Available: https://pascualbravo.edu.co/comunicaciones/index.php/boletines-prensa/2020/2367

[19] Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), "En el ITM desarrollaron recicladores inteligentemente sostenibles de residuos sólidos y peligrosos," ITM Noticias. [Online]. Available: https://www.itm.edu.co/noticias-principales/en-el-itm-desarrollaron-recicladores-inteligentemente-sostenibles-de-residuos-solidos-y-peligrosos/

[20] IU Digital de Antioquia, "IU Digital de Antioquia recibió Mención especial en el Sello Naranja 2025, por sus buenas prácticas ambientales," IU Digital Noticias, 2025. [Online]. Available: https://www.iudigital.edu.co/index.php/noticias/iu-digital-de-antioquia-recibio-mencion-especial-en-el-sello-naranja-2025-por-sus-buenas-practicas-ambientales

[21] Universidad El Bosque, "Exploramos la inteligencia artificial para el reciclaje y la sostenibilidad," Universidad El Bosque Noticias. [Online]. Available: https://www.unbosque.edu.co/centro-informacion/noticias/exploramos-inteligencia-artificial-reciclaje-sostenibilidad

[22] Universidad de Córdoba, "Estudiantes de Unicórdoba crean sistema automatizado para separar residuos a través de una neurona artificial," Unicórdoba Blog, Jun. 2021. [Online]. Available: https://unicordoba.edu.co/blog/estudiantes-de-unicordoba-crean-sistema-automatizado-para-separar-residuos-a-traves-de-una-neurona-artificia

Desarrollo de una Aplicación Web para la Predicción y Gestión de Pacientes con Diabetes en Clínicas de Barranquilla

1st Dominique Gondelbert Rios
Programa de Tecnología en Gestión de Sistemas Informáticos Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
dgondelbert@unibarranquilla.edu.co

2nd Manolo Castro Ramos
Programa de Tecnología en Gestión de Sistemas Informáticos Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
mcastror@unibarranquilla.edu.co

3rd Bryan Fernandez Ebrath
Programa de Ingeniería Telemática, Fac. de Ingenierías Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
bjfernandez@unibarranquilla.edu.co

4th Lourdes De Avila Gutiérrez
Programa de Ingeniería Telemática, Fac. de Ingenierías Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
ldeavila@unibarranquilla.edu.co

***Resumen*—La diabetes mellitus representa un importante desafío de salud pública debido al incremento de casos a nivel mundial y la necesidad de fortalecer los procesos de seguimiento y control en entornos clínicos. Organizaciones como la Organización Mundial de la Salud reportan que más de 830 millones de personas padecen diabetes, mientras que la UNESCO destaca el potencial de las tecnologías basadas en inteligencia artificial para fortalecer los servicios de salud y apoyar la toma de decisiones médicas. En este trabajo se presenta el desarrollo de una aplicación web orientada a la predicción y gestión de pacientes con diabetes en Barranquilla, integrando herramientas de inteligencia artificial y tecnologías web modernas. La solución propuesta permite la recolección, almacenamiento y análisis de datos clínicos para apoyar la identificación de riesgos y el seguimiento de pacientes. La metodología empleada se basó en un enfoque aplicado, incluyendo análisis de requerimientos, diseño del sistema, implementación de servicios, desarrollo de interfaces y pruebas funcionales. Como resultado, se obtuvo un prototipo funcional con módulos de gestión de información, dashboards interactivos y un sistema predictivo basado en inteligencia artificial. Los resultados evidencian la viabilidad técnica de la solución y su potencial para mejorar la gestión de información clínica y los procesos de atención en salud**

Palabras clave—Inteligencia artificial, diabetes mellitus, aplicación web, predicción, gestión de pacientes, sistemas de salud

I. Introducción

La diabetes mellitus se ha consolidado como una de las enfermedades crónicas de mayor impacto a nivel mundial debido a su alta prevalencia y a las complicaciones asociadas que afectan significativamente la calidad de vida de millones de personas y de acuerdo con la International Diabetes Federation (IDF), aproximadamente 589 millones de adultos entre 20 y 79 años vivían con diabetes en 2024, lo que representa cerca de 1 de cada 9 personas adultas a nivel mundial, con proyecciones que estiman un incremento superior a los 850 millones de casos para el año 2050 [1].

En consonancia con este panorama, la Organización Mundial de la Salud (OMS) advierte que la diabetes constituye una de las principales problemáticas de salud pública debido al aumento sostenido de casos, las complicaciones cardiovasculares asociadas y el impacto económico que genera en los sistemas sanitarios [2]. En Colombia, la diabetes mellitus representa una problemática creciente de salud pública. De acuerdo con la Federación Internacional de Diabetes (FID), en 2024 aproximadamente el 8,4 % de la población adulta colombiana padece esta enfermedad, lo que equivale a más de 3 millones de personas diagnosticadas [3].

Del mismo modo, estudios nacionales e internacionales evidencian que una proporción significativa de pacientes con diabetes y prediabetes permanece sin diagnóstico oportuno, lo que incrementa considerablemente el riesgo de desarrollar complicaciones cardiovasculares, metabólicas y renales asociadas a la enfermedad [4]. De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud, gran parte de los casos de prediabetes en América Latina no son identificados a tiempo debido a factores como el acceso limitado a controles médicos preventivos, el desconocimiento de los síntomas iniciales y la ausencia de herramientas tecnológicas orientadas a la detección temprana. Esta situación favorece la progresión silenciosa de la enfermedad hacia etapas más complejas, aumentando la probabilidad de complicaciones crónicas que impactan directamente la calidad de vida de los pacientes y generan una mayor presión sobre los sistemas de salud. Adicionalmente, el crecimiento de enfermedades asociadas al sedentarismo, la obesidad y los hábitos alimenticios inadecuados ha contribuido al incremento sostenido de casos de diabetes en la región, resaltando la necesidad de implementar estrategias basadas en tecnologías inteligentes que permitan fortalecer el monitoreo clínico, el análisis de datos médicos y la prevención temprana de riesgos relacionados con esta enfermedad [4].

En la ciudad de Barranquilla y en diferentes regiones del país, el incremento progresivo de casos evidencia la necesidad de implementar estrategias tecnológicas que permitan fortalecer el seguimiento clínico, la gestión de la información y el análisis de datos en los servicios de salud, contribuyendo a

optimizar la atención y apoyar la toma de decisiones médicas [5]. Siguiendo con la transformación digital y la evolución de la industria 4.0, queda en evidencia cómo el uso de tecnologías como la inteligencia artificial y las aplicaciones web ha permitido desarrollar soluciones innovadoras orientadas a la optimización de procesos en diferentes sectores, incluyendo el ámbito de la salud [6].

Organizaciones internacionales como la UNESCO destacan que la inteligencia artificial puede contribuir significativamente al fortalecimiento de los servicios médicos, mejorando la atención a pacientes, el análisis de información biomédica y el acceso a herramientas tecnológicas avanzadas para el apoyo clínico [7]. En el contexto de la transformación digital y el avance de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), la inteligencia artificial se ha consolidado como una herramienta estratégica para optimizar procesos relacionados con la prevención, monitoreo y análisis de enfermedades crónicas.

De igual manera, la Organización Mundial de la Salud reporta que la diabetes afecta actualmente a más de 830 millones de personas en el mundo, evidenciando la necesidad de implementar soluciones tecnológicas que permitan mejorar los procesos de prevención, monitoreo y diagnóstico temprano de esta enfermedad [2].

En este contexto, el avance de las tecnologías digitales y de los sistemas inteligentes ha permitido desarrollar herramientas capaces de procesar información médica de manera más eficiente, facilitando el apoyo a los profesionales de la salud en la toma de decisiones clínicas, ya que estas tecnologías facilitan el almacenamiento, procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos clínicos, permitiendo la identificación de patrones y la generación de modelos predictivos que apoyan la toma de decisiones médicas [8].

Barranquilla, como una de las principales ciudades de la región Caribe colombiana, ha presentado un crecimiento significativo en la demanda de servicios de salud durante los últimos años, especialmente en enfermedades crónicas no transmisibles como la diabetes mellitus. De acuerdo con reportes de entidades de salud y estadísticas territoriales, durante el año 2023 se diagnosticaron 2.230 casos de diabetes mellitus en la ciudad, evidenciando el impacto creciente de esta enfermedad en la población y la necesidad de fortalecer los procesos de monitoreo clínico, almacenamiento de información médica y atención preventiva en las instituciones prestadoras de salud [5]. De igual manera, el crecimiento poblacional y la transformación digital de los servicios médicos han impulsado la búsqueda de soluciones tecnológicas que permitan optimizar la gestión de pacientes y mejorar la capacidad de respuesta de las entidades de salud frente al incremento de diagnósticos relacionados con esta enfermedad [6].

En este sentido, el objetivo principal de la presente investigación es desarrollar una aplicación web para la predicción y gestión de pacientes con diabetes en clínicas de Barranquilla, integrando herramientas de inteligencia artificial, ciencia de datos y tecnologías modernas para el análisis de información clínica, así como la generación de recomendaciones. Para ello, se realizará la recolección de información con el fin de gestionar los requerimientos del sistema y diseñar una base de datos que permita el almacenamiento seguro y organizado de la información médica.

Del mismo modo, se construirán servicios para la comunicación con la base de datos e interfaces gráficas que faciliten la interacción de los usuarios con la plataforma. La solución también incorporará modelos predictivos y generativos de texto basados en aprendizaje automático, además de principios de seguridad informática y protección de datos clínicos, permitiendo desarrollar una plataforma escalable orientada al fortalecimiento de los procesos de atención y seguimiento de pacientes con diabetes.

II. Fundamentos Teóricos

En los últimos años, la incorporación de tecnologías digitales en el sector salud ha permitido mejorar significativamente los procesos de diagnóstico, seguimiento y gestión de enfermedades crónicas. En este contexto, las aplicaciones web han evolucionado como plataformas accesibles y eficientes para la gestión de información, permitiendo a los usuarios interactuar con sistemas a través de navegadores sin necesidad de instalaciones complejas. Este tipo de soluciones facilita la centralización de datos, el acceso remoto a la información y la integración con servicios digitales, lo que resulta especialmente útil en entornos clínicos donde la disponibilidad y actualización de la información es crítica [11].

En este sentido, el desarrollo de herramientas tecnológicas modernas y la transformación digital han impulsado la implementación de sistemas inteligentes orientados a la optimización de procesos médicos y administrativos. En particular, la inteligencia artificial se ha posicionado como una herramienta clave para el análisis de datos clínicos, permitiendo identificar patrones y generar predicciones que apoyan la toma de decisiones médicas [7].

El aprendizaje automático, como rama de la inteligencia artificial, se basa en el desarrollo de algoritmos capaces de aprender a partir de datos históricos, sin necesidad de ser programados explícitamente. Estos modelos permiten analizar grandes volúmenes de información clínica y generar resultados predictivos que pueden ser utilizados para la detección temprana de enfermedades como la diabetes mellitus [9]. En la misma línea, investigaciones recientes han demostrado que el uso de modelos de inteligencia artificial mejora la precisión en la predicción del riesgo de diabetes mediante el análisis de datos médicos longitudinales [10].

Además, la implementación de tecnologías emergentes en el contexto de la industria 4.0 ha impulsado el desarrollo de sistemas inteligentes orientados a la optimización de procesos en diferentes sectores, incluyendo el ámbito de la salud. En Colombia, iniciativas impulsadas por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones han

promovido el uso de inteligencia artificial como herramienta estratégica para mejorar la calidad de los servicios y la eficiencia operativa en organizaciones públicas y privadas [6].

En este contexto, la integración de inteligencia artificial, aplicaciones web y sistemas de gestión de datos representa una oportunidad para el desarrollo de soluciones innovadoras orientadas al manejo de enfermedades crónicas como la diabetes. Estas tecnologías permiten no solo mejorar la organización de la información clínica, sino también generar modelos predictivos que contribuyan a la detección temprana de riesgos y a la optimización de los procesos de atención médica.

III. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado, orientado a la creación de una solución tecnológica para la predicción y gestión de pacientes con diabetes. Este tipo de metodología se centra en la resolución de problemas reales mediante la aplicación del conocimiento científico y tecnológico, permitiendo generar soluciones concretas en contextos específicos.

Según Hernández Sampieri et al., la investigación aplicada busca transformar el conocimiento en acciones prácticas que contribuyan a mejorar procesos y condiciones en un entorno determinado [12]. Con este propósito, se adopta un enfoque cualitativo, el cual permite comprender las necesidades del contexto a través del análisis de información relevante, facilitando la interpretación de datos relacionados con la problemática de estudio, además que este enfoque resulta adecuado para el diseño de soluciones tecnológicas centradas en el usuario, ya que permite identificar requerimientos funcionales y no funcionales a partir de la comprensión del entorno.

El desarrollo del sistema se estructuró en las siguientes etapas:

A. Análisis de Requerimientos

En esta etapa se realizó la recolección de información a partir de fuentes epidemiológicas y estadísticas públicas relacionadas con la diabetes, con el fin de comprender el contexto del problema.

Los estudios basados epidemiológicamente de la diabetes en Colombia evidencian que la prevalencia de esta enfermedad varía entre el 4% y el 8% de la población, estando asociada a factores como el envejecimiento, la urbanización y el incremento de enfermedades metabólicas, lo que resalta su impacto en el sistema de salud [13]. Con base en esta información, se identificaron y clasificaron los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema, los cuales fueron documentados y validados para asegurar su coherencia con los objetivos del proyecto.

B. Diseño de la Base de Datos

En esta etapa se definió la estructura de almacenamiento de la información del sistema, garantizando la organización y consistencia de los datos clínicos.

Las actividades realizadas comprendieron:

- Modelado de la base de datos mediante un diagrama entidad-relación para representar las entidades del sistema y sus relaciones.
- Definición de un diccionario de datos que especifica atributos, tipos de datos y restricciones.
- Diseño de tablas relacionales optimizadas para el almacenamiento de información clínica y administrativa.
- Validación del modelo de datos para asegurar integridad referencial y coherencia estructural.

C. Desarrollo de Servicios y Lógica del Sistema

En esta fase se implementaron los componentes encargados de la gestión de la información y la comunicación entre las distintas capas del sistema, integrando tecnologías modernas para garantizar escalabilidad, eficiencia y mantenibilidad.

Las tareas desarrolladas incluyeron:

- Desarrollo de los servicios encargados de procesar la información clínica ingresada por los usuarios, permitiendo la comunicación entre el modelo predictivo, el sistema de asesoría y el almacenamiento de resultados dentro del historial del sistema.
- Implementación de la lógica funcional del sistema para gestionar el flujo de interacción entre usuarios, diagnósticos, módulos de predicción y servicios conversacionales, facilitando el registro, consulta y análisis de información clínica de manera estructurada.
- Integración de servicios de inteligencia artificial, incluyendo un modelo predictivo orientado al análisis de datos clínicos para la identificación de riesgos asociados a la diabetes, y un modelo generativo de texto que permite la interacción con el usuario mediante un sistema conversacional enfocado en la orientación y recomendaciones de salud.
- Extensión del modelo conversacional mediante su integración con plataformas de mensajería como WhatsApp y Telegram, permitiendo a los usuarios interactuar con el sistema a través de estos canales.

D. Integración de Interfaces de Usuario

En esta etapa se desarrolló la capa de interacción con el usuario mediante el uso del *framework* Angular, adoptando una arquitectura basada en componentes que permite la modularidad, reutilización de código y escalabilidad del sistema. El diseño de la interfaz se orientó a garantizar una experiencia de usuario intuitiva, eficiente y accesible, facilitando la interacción con las funcionalidades del sistema.

Durante esta etapa se llevaron a cabo:

- Desarrollo de la interfaz de inicio de sesión y registro de usuarios, permitiendo la autenticación y creación de cuentas mediante formularios estructurados para el acceso seguro a la plataforma.
- Implementación del módulo de administración de usuarios, orientado a la visualización, edición y gestión

de la información de los usuarios registrados dentro del sistema.

- Integración de una interfaz interactiva para la predicción de diabetes y comunicación mediante chatbot, permitiendo el ingreso de datos clínicos y la interacción mediante lenguaje natural.
- Diseño de la arquitectura del frontend utilizando componentes independientes y reutilizables, organizados de manera estructurada para facilitar el mantenimiento y la expansión del sistema.

E. Desarrollo del Modelo Predictivo

En esta etapa se implementó un modelo de inteligencia artificial orientado a la predicción de riesgos asociados a la diabetes, a partir del análisis de datos clínicos. El objetivo de este modelo es apoyar la identificación temprana de posibles complicaciones y facilitar la toma de decisiones médicas.

Las labores realizadas consistieron en:

- Investigación y evaluación de diferentes librerías de aprendizaje automático, analizando cual de estas brindo mejores resultados a las necesidades del proyecto.
- Experimentación con diversos algoritmos de machine learning, incluyendo K-Nearest Neighbors (KNN), bosques aleatorios (Random Forest) y otros métodos de clasificación, con el fin de comparar su desempeño sobre el conjunto de datos disponible.
- Implementación del modelo utilizando la librería Scikit-learn en Python, debido a su eficiencia, facilidad de integración y soporte para múltiples algoritmos de aprendizaje supervisado.
- Entrenamiento y validación de los modelos utilizando datos simulados que representan escenarios clínicos reales, permitiendo evaluar su comportamiento en diferentes condiciones.
- Selección del modelo basado en bosques aleatorios (Random Forest), el cual presentó un mejor desempeño en términos de precisión y capacidad de generalización frente a otros algoritmos evaluados, siendo así la opción más adecuada para el sistema.
- Evaluación del modelo mediante métricas de desempeño, permitiendo verificar su capacidad predictiva y su utilidad dentro del contexto del aplicativo.

F. Desarrollo del Modelo Conversacional

Se implementó un modelo generativo de texto orientado a la interacción con el usuario, permitiendo la consulta de información y la obtención de recomendaciones relacionadas con el cuidado de la salud. Este componente funciona como un asistente conversacional integrado en la aplicación web.

Los procesos incluyeron:

- Integración de un modelo de lenguaje existente mediante la herramienta Ollama, permitiendo su ejecución local y su incorporación dentro de la arquitectura del sistema.
- Parametrización del modelo a través de un archivo de configuración (Modelfile), con el objetivo de restringir su comportamiento exclusivamente a temáticas relacionadas con la diabetes y el área de la salud.
- Implementación de mecanismos de control que impiden al modelo responder preguntas fuera de su dominio, mostrando mensajes que delimitan claramente el alcance y uso del sistema.
- Utilización del modelo Phi-3, seleccionado por ser una solución liviana pero robusta, con capacidades comparables a modelos de mayor tamaño en tareas de generación de texto.
- Evaluación del modelo conversacional mediante pruebas de interacción, verificando la coherencia, pertinencia y calidad de las respuestas generadas en el contexto de consultas relacionadas con la salud.
- Validación del comportamiento del sistema, evidenciando respuestas satisfactorias dentro del dominio establecido y un control adecuado frente a solicitudes fuera de contexto.

G. Pruebas, Validación y Análisis del Sistema

En esta etapa final se llevaron a cabo pruebas funcionales y de validación con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema, así como su integración general.

El trabajo realizado incluyó:

- Ejecución de pruebas funcionales sobre los módulos del sistema, incluyendo la gestión de usuarios, registro de datos clínicos, visualización de información y generación de resultados.
- Validación de la comunicación entre el frontend y el backend, asegurando la correcta interacción con las APIs y la consistencia en el flujo de datos.
- Evaluación del modelo predictivo, verificando la coherencia de los resultados generados y su comportamiento frente a distintos escenarios de datos.
- Pruebas del modelo conversacional, analizando la calidad, pertinencia y coherencia de las respuestas generadas, así como su comportamiento ante preguntas fuera del dominio permitido.
- Evaluación de la integración del modelo conversacional con plataformas de mensajería, específicamente WhatsApp y Telegram, donde se realizaron pruebas de interacción y validación de respuestas. Los resultados evidenciaron un funcionamiento correcto en ambos entornos, con respuestas coherentes y consistentes dentro del dominio establecido.
- Verificación de la integridad de los datos almacenados, garantizando que la información registrada se mantenga consistente y correctamente estructurada.

- Evaluación general del sistema en términos de usabilidad, rendimiento y estabilidad, identificando posibles mejoras para su implementación en un entorno real.

IV. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto los cuales permitieron evidenciar el funcionamiento e integración de los diferentes componentes del sistema.

La Fig. 1. muestra el análisis de requerimientos el cual permitió identificar las necesidades funcionales y técnicas del sistema, definiendo los procesos, módulos y características necesarias para el correcto funcionamiento de la aplicación.



Fig. 1. Identificar Requerimientos

La Fig. 2. representa la estructura de la base de datos del sistema, mostrando las principales entidades y las relaciones utilizadas para almacenar y organizar la información clínica y administrativa.



Fig. 2. Diagrama de entidad-relación.

La Fig. 3. representa el flujo funcional del sistema, mostrando la interacción entre el usuario, el modelo predictivo, el sistema de asesoría y el almacenamiento de información dentro del historial clínico.



Fig. 3. Diagrama de flujo

La Fig. 4. muestra la interfaz encargada del inicio de sesión de usuarios dentro de la plataforma. Este módulo garantiza el control de acceso al sistema de manera segura y gestionada.



Fig. 4. Interfaz de inicio de sesión

La Fig. 5. exhibe la interfaz encargada del registro de usuarios, utilizado para crear nuevas cuentas mediante el ingreso de información personal, datos de contacto y asignación de roles.



Fig. 5. Interfaz de Registro de Usuarios

La Fig. 6. expone el módulo de administración de usuarios, el cual permite visualizar, editar y gestionar la información de los usuarios registrados dentro del sistema.



Fig. 6. Módulo de Administración de Usuarios

La Fig. 7. presenta la interfaz principal del sistema, integrando el módulo predictivo de diabetes y el chatbot inteligente para brindar apoyo informativo y orientación básica al usuario.

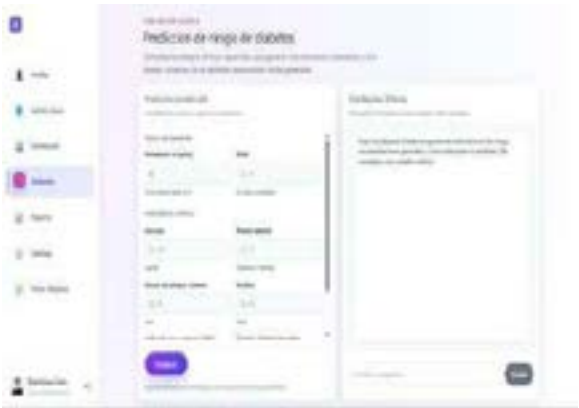


Fig. 7. Módulo interactivo: predicción y chatbot integrados

La Fig. 8. muestra el funcionamiento del módulo predictivo, encargado de analizar datos clínicos ingresados por el usuario para estimar el nivel de riesgo asociado a diabetes.



Fig. 8. Módulo de Predicción

La Fig. 9. presenta el chatbot implementado en la plataforma, diseñado para responder consultas generales relacionadas con la diabetes mediante interacción en lenguaje natural.



Fig. 9. Modulo del Chatbot

La Fig. 10. representa las pruebas realizadas que permitieron validar el funcionamiento de los diferentes módulos del sistema, verificando la correcta integración entre la interfaz web, la base de datos y los modelos de inteligencia artificial.

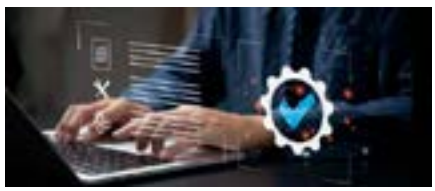


Fig. 10. Validación de funcionamiento

V. Discusión y Proyecciones

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del sistema permitieron validar la viabilidad técnica de la solución propuesta para la predicción y gestión de pacientes con diabetes. A partir del análisis de requerimientos y del estudio de la problemática asociada a esta enfermedad, fue posible identificar necesidades funcionales y técnicas que orientaron la construcción de una plataforma enfocada en el manejo organizado de información clínica y el apoyo a procesos de monitoreo y análisis de riesgos.

En relación con el diseño de la base de datos, la estructura implementada permitió gestionar de manera organizada la información correspondiente a usuarios, diagnósticos clínicos, roles y módulos del sistema. El modelo entidad-relación facilitó la integridad y consistencia de los datos, permitiendo una adecuada comunicación entre los diferentes componentes de la plataforma.

En lo que respecta al desarrollo de servicios y lógica funcional, se logró integrar de manera efectiva el frontend, el backend y los modelos de inteligencia artificial dentro de una misma arquitectura tecnológica. La implementación de servicios para el procesamiento de información clínica, junto con la integración de modelos predictivos y conversacionales, hizo posible validar el funcionamiento del sistema como un prototipo funcional capaz de generar predicciones y ofrecer interacción mediante lenguaje natural.

Por otro lado, las interfaces desarrolladas mediante Angular facilitaron una interacción intuitiva y organizada con los diferentes módulos del sistema. Los resultados obtenidos evidenciaron una correcta integración entre formularios, paneles de administración, módulos predictivos y servicios conversacionales, favoreciendo la experiencia de usuario y el acceso estructurado a la información clínica.

Respecto al modelo predictivo, las pruebas realizadas evidenciaron que el algoritmo basado en Random Forest presentó un comportamiento adecuado para el análisis de datos clínicos relacionados con diabetes, mostrando resultados coherentes durante el proceso de validación. De igual manera, el modelo conversacional implementado mediante Ollama y Phi-3 permitió ofrecer respuestas orientadas al dominio de la salud, manteniendo restricciones adecuadas frente a consultas fuera del contexto definido.

Finalmente, las pruebas funcionales y de validación permitieron verificar la estabilidad general del sistema, así como la correcta integración entre sus componentes. La evaluación realizada sobre los módulos de usuarios, predicción, chatbot, almacenamiento de datos y comunicación mediante APIs evidenció un funcionamiento estable y consistente durante las pruebas realizadas.

Como proyección futura, se plantea la implementación del sistema en un entorno real dentro de una entidad prestadora de salud (EPS) que autorice su uso para procesos de validación y pruebas operativas. Esto permitiría evaluar el comportamiento de la plataforma bajo condiciones reales de carga y flujo de usuarios, facilitando la identificación de mejoras y optimizaciones para una futura implementación a mayor escala.

Adicionalmente, se proyecta el desarrollo de una aplicación móvil complementaria que permita ampliar la accesibilidad del sistema, facilitando el monitoreo y consulta de información desde dispositivos móviles. Esta expansión permitiría fortalecer la interacción entre pacientes y profesionales de la salud, mejorando los procesos de seguimiento clínico y acceso a herramientas de apoyo basadas en inteligencia artificial.

VI. CONCLUSIONES

El desarrollo de la aplicación web orientada a la predicción y gestión de pacientes con diabetes permitió integrar diferentes tecnologías para la construcción de una solución funcional enfocada en el apoyo a procesos clínicos y administrativos relacionados con esta enfermedad. La implementación del sistema permitió validar la integración entre servicios web, bases de datos y modelos de inteligencia artificial dentro de una misma plataforma tecnológica.

Adicionalmente, el uso de herramientas de aprendizaje automático permitió desarrollar un modelo predictivo capaz de analizar información clínica y generar resultados orientados al apoyo en la detección de riesgos asociados a la diabetes. De igual manera, la incorporación de un sistema conversacional basado en inteligencia artificial permitió ofrecer interacción mediante lenguaje natural enfocada en orientación básica sobre temas relacionados con salud y diabetes.

Por otro lado, la arquitectura implementada mediante Angular y FastAPI permitió desarrollar un sistema modular, organizado y adaptable, facilitando la comunicación entre componentes y el manejo estructurado de la información. Las pruebas realizadas evidenciaron un funcionamiento estable de los módulos desarrollados y una correcta integración entre las distintas capas del sistema.

Finalmente, el proyecto permitió evidenciar el potencial de las tecnologías inteligentes y las aplicaciones web como herramientas de apoyo para el fortalecimiento de procesos de monitoreo, gestión y análisis de información clínica en entornos relacionados con el sector salud.

REFERENCIAS

[1] International Diabetes Federation, “IDF Diabetes Atlas.” [Online]. Available: https://diabetesatlas.org/

[2] World Health Organization, “Diabetes.” [Online]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes

[3] International Diabetes Federation, “Datos sobre diabetes en Colombia.” [Online]. Available: https://diabetesatlas.org/es/data-by-location/country/colombia/

[4] Pan American Health Organization (PAHO), “Results of the Latin America Strategic Prediabetes Meeting,” *Revista Panamericana de Salud Pública*, 2017. [Online]. Available: https://www.scielosp.org/article/rpsp/2017.v41/e172/

[5] Alcaldía de Barranquilla, “Barranquilla se mueve para la prevención de la diabetes.”

[6] MinTIC, “Transformación digital e inteligencia artificial en Colombia.” [Online]. Available: https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/396172:Colombia-modelo-de-transformacion-digital-e-inteligencia-artificial-social-en-Cumbre-del-Futuro-de-la-ONU

[7] UNESCO, “AI-Powered Health: Bridging the Gap Between Technology and Wellbeing”. [Online]. Available: https://www.unesco.org/en/articles/ai-powered-health-bridging-gap-between-technology-and-wellbeing

[8] S. Dash, S. K. Shakyawar, M. Sharma, and S. Kaushik, “Big data in healthcare: management, analysis and future prospects,” *J. Big Data*, vol. 6, no. 1, 2019, [Online]. Available: https://link.springer.com/article/10.1186/s40537-019-0217-0

[9] S. Rusell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 4th ed. Pearson, 2020. [Online]. Available: https://aima.cs.berkeley.edu/index.html

[10] S. Khan and Z. Shah, “Artificial intelligence–based diabetes risk prediction from longitudinal DXA bone measurements.” [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/s41598-025-10136-5

[11] R. V. Lerma-Blasco, J. A. Murcia Andrés, and E. Mifsud Talón, *Aplicaciones Web*. 2013. [Online]. Available: https://www.calameo.com/read/004926296dd073eccab4e

[12] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la Investigación*, 6th ed. McGraw Hill Education, 2014. [Online]. Available: https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf

[13] H. Vargas-Uricoechea and L. A. Casas-Figueroa, “An Epidemiologic Analysis of Diabetes in Colombia,” *Ann. Glob. Health*, vol. 81, no. 6, 2015, [Online]. Available: https://annalsofglobalhealth.org/articles/95/files/submission/proof/95-1-273-1-10-20180508.pdf

Sinergia entre Electromagnetismo y Espectroscopia: La Bobina de Tesla como Catalizador de Aprendizaje Experiencial en Ingeniería y Astronomía.

1st Jhon Henry Vargas Beltrán[a]
Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá D.C, Colombia.
jhon.vargas@unimilitar.edu.co [a]

2nd Sarah Valentina Rodríguez Díaz[b]
Facultad de Ingeniería.
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá D.C, Colombia.
est.sarah.vrodriguez@unimilitar.edu.co [b]

3rd Michell Alejandra González Cubillos[c]
Facultad de Ingeniería.
Universidad Militar Nueva Granada
Cajicá, Cundinamarca. Colombia.
est.michell.gonzalez@unimilitar.edu.co [c]

***Abstract*— Este proyecto documenta el diseño, construcción e implementación pedagógica de una Bobina de Tesla como herramienta didáctica disruptiva para la enseñanza de la astronomía y la ingeniería. Desarrollada en el marco de la Semana de la Ciencia de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG), la iniciativa surge de la necesidad de cerrar la brecha entre los conceptos teóricos del electromagnetismo y sus aplicaciones prácticas en la espectroscopia estelar, específicamente en el estudio de la naturaleza de la luz y la composición química de los astros. El objetivo central consistió en desarrollar un prototipo funcional capaz de generar campos de alta frecuencia para la ionización de tubos de descarga (hidrógeno y otros gases). Esto permitió la ejecución de un taller práctico donde la experimentación física facilitó la comprensión de fenómenos cuánticos y astrofísicos, tales como la excitación electrónica y las líneas de emisión espectral utilizadas en la clasificación estelar. La metodología se fundamentó en un enfoque de aprendizaje colaborativo y liderazgo estudiantil. Los integrantes del Semillero de Astronomía y Astrofotografía Científica lideraron desde el diseño electrónico hasta la mediación pedagógica, cumpliendo con los pilares de divulgación científica e innovación académica institucional. En conclusión, la fabricación de este dispositivo no solo fortaleció las competencias técnicas en ingeniería de los estudiantes, sino que potenció sus habilidades blandas en liderazgo y comunicación pública de la ciencia. Este modelo demuestra ser una estrategia eficaz para integrar las ciencias básicas con la ingeniería aplicada, transformando conceptos abstractos en experiencias sensoriales y educativas de alto impacto.**

Palabras clave:

Aprendizaje Experiencial, Ingeniería Aplicada, Espectroscopia Estelar, Educación STEM, Bobina de Tesla, Divulgación Científica.

I. Introducción

La enseñanza de la ingeniería y las ciencias básicas enfrenta hoy el desafío de trascender la abstracción matemática para conectar con la realidad tangible del estudiante. Bajo esta premisa, el presente trabajo documenta una iniciativa interdisciplinar que vincula el electromagnetismo y la astronomía a través de un ícono de la ingeniería eléctrica: la Bobina de Tesla. Este dispositivo, lejos de ser un simple generador de descargas espectaculares, se redefine aquí como un puente pedagógico disruptivo diseñado para explorar la naturaleza de la luz y la composición química del universo. La primera etapa de este proyecto, desarrollada en el marco del Semillero de Astronomía y Astrofotografía Científica (SAAC) de la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG), se centró en el diseño, construcción y validación técnica de un prototipo funcional de alta frecuencia. El proceso de fabricación permitió a los estudiantes aplicar conceptos críticos de circuitos resonantes y transferencia de energía inalámbrica, sirviendo como una prueba de concepto sólida para la creación de un entorno de experimentación controlada [1].

El vínculo fundamental entre este desarrollo técnico y la astrofísica reside en la interacción entre campos electromagnéticos y la materia. Al operar la bobina, el campo generado tiene la capacidad de excitar electrónicamente átomos de gases específicos contenidos en tubos de descarga, replicando a pequeña escala los procesos de ionización que ocurren en las nebulosas o en las atmósferas estelares. Al regresar a su estado base, estos electrones liberan energía en forma de fotones, creando un espectro de emisión que funciona como una "huella dactilar" química [2].

Este modelo pedagógico tendrá su implementación definitiva en la Semana de la Ciencia 2026-2 de la UMNG. En dicho escenario, la bobina actuará como un simulador astrofísico donde la observación de líneas espectrales transformará conceptos abstractos de la mecánica cuántica en experiencias sensoriales de alto impacto. Así, la construcción de este dispositivo demuestra que la sinergia entre la ingeniería aplicada y la divulgación científica es la clave para comprender que las leyes que dominan el laboratorio son las mismas que rigen el corazón de las estrellas y galaxias más remotas.

El propósito central de esta iniciativa es el desarrollo de un prototipo funcional, seguro y escalable, diseñado específicamente para ser replicable en diversos escenarios de comunicación pública de la ciencia e ingeniería. La Bobina de

Tesla se propone como una estación de aprendizaje móvil que permite democratizar el conocimiento en entornos académicos y comunitarios. Mediante un enfoque experiencial, el prototipo busca que el espectador deje de ser un observador pasivo y se convierta en un experimentador activo, logrando que la interacción directa con fenómenos de electromagnetismo y astronomía transforme conceptos teóricos complejos en vivencias sensoriales e intelectuales de alto impacto [3].

II. Marco Teórico

A. *Fundamentos de Electromagnetismo y Resonancia Eléctrica*

La Bobina de Tesla opera bajo el principio de inducción electromagnética, transformando energía de baja tensión en campos de alta frecuencia y potencial elevado. El núcleo técnico de este dispositivo es el fenómeno de la resonancia eléctrica, que ocurre cuando el circuito primario y el secundario alcanzan una sintonía precisa en sus frecuencias naturales. En este estado, la transferencia de energía se maximiza, permitiendo que el sistema genere un campo eléctrico tan intenso que supera la rigidez dieléctrica del aire, provocando la ionización del medio y la creación de plasma visible en un arco eléctrico. Este plasma actúa como la fuente de energía necesaria para excitar la materia a nivel atómico, sentando las bases para el estudio espectroscópico posterior.

B. Espectroscopia de Emisión: El Lenguaje de la Luz

La transición de la ingeniería eléctrica a la astronomía ocurre a través de la espectroscopia, técnica que permite descifrar la composición química de los astros analizando su luz. Al acercar tubos de descarga con gases específicos (como Hidrógeno o Helio) al campo de la bobina, los electrones son excitados a niveles de energía superiores; al retornar a su estado base, emiten fotones con longitudes de onda únicas: $H\alpha$ (Roja, 656.3 nm), $H\beta$ (Cian, 486.1 nm), $H\gamma$ (Azul/Violeta, 434.1 nm) y $H\delta$ (Violeta profundo, 410.2 nm) [2]. Este fenómeno genera un espectro de emisión o "huella dactilar química", permitiendo que los estudiantes observen en el laboratorio el mismo proceso físico que utilizan los astrofísicos para identificar los elementos que componen estrellas y nebulosas distantes [5,6].

C. Aprendizaje Experiencial y Ciclo de Kolb

El proyecto se fundamenta en el aprendizaje experiencial, donde el estudiante deja de ser un receptor pasivo para convertirse en el arquitecto de su conocimiento. Siguiendo el ciclo de Kolb, los integrantes del semillero transitan desde la conceptualización abstracta de las fórmulas de Maxwell hasta la experimentación activa en la construcción del prototipo. Este enfoque pedagógico fomenta el pensamiento crítico y la resolución de problemas en tiempo real, transformando errores técnicos en oportunidades de aprendizaje profundo y consolidando competencias que son vitales en la formación de ingenieros del siglo XXI. Más allá del desarrollo técnico, la implementación en la Semana de la Ciencia UMNG 2026 actúa como una plataforma para fortalecer habilidades blandas esenciales: el liderazgo y la comunicación pública de la ciencia. El rol de los estudiantes como mediadores pedagógicos les exige traducir fenómenos complejos de la física cuántica y la ingeniería a un lenguaje accesible para un público diverso. Esta labor de divulgación científica no solo democratiza el conocimiento técnico, sino que empodera al futuro ingeniero como un líder capaz de articular la ciencia con el impacto social y la innovación académica [7].

III. Metodología

A. Fase de Ingeniería: Diseño y Construcción

El diseño de la Bobina de Tesla se basa en el siguiente diagrama:

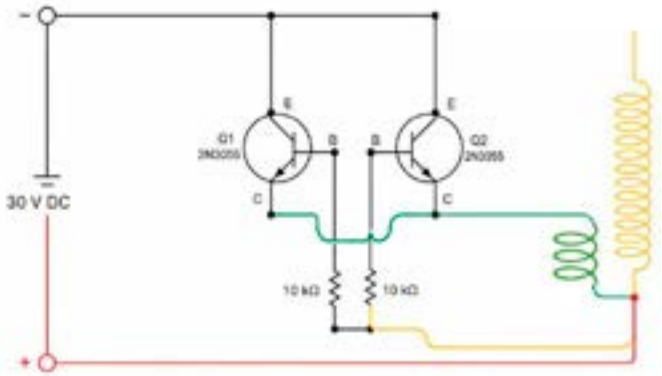


Fig. 1. Diagrama esquemático del circuito oscilante de la Bobina de Tesla.

- Diseño de la Relación de Aspecto y Geometría del Secundario: El diseño inicial del secundario se basó en una relación de aspecto aproximada de 3.75:1, definida por un diámetro de núcleo de 6 cm y una altura de bobinado de 22.5 cm. Esta proporción es fundamental para equilibrar la inductancia propia de la bobina con su capacitancia parásita, evitando que el solenoide sea demasiado "largo" (lo que aumentaría la resistencia óhmica y las pérdidas de calor) o demasiado "ancho" (lo que dispersaría el campo magnético). Al emplear alambre de cobre esmaltado de calibre AWG 28, se logró una densidad de aproximadamente 31 vueltas por centímetro, resultando en un total estimado de 700 espiras. Esta configuración mecánica permite una transferencia de energía óptima por inducción mutua desde el primario, estableciendo una base inductiva de aproximadamente 5.2 mH indispensable para alcanzar la resonancia en altas frecuencias.
- Arquitectura del Sistema de Alimentación y Elevación: La fuente de poder fue diseñada para transformar un suministro de red de 110V AC 60 Hz a 12V AC. El diseño consta de tres etapas críticas; Transformación y Rectificación: Se utiliza un transformador de 12V AC cuya salida, al pasar por un puente rectificador de diodos y un banco de filtros capacitivos, eleva el voltaje hacia su valor pico de aproximadamente 17V DC mediante la acumulación de energía en los condensadores electrolíticos, luego para maximizar la salida de la Bobina de Tesla, se integra un módulo elevador DC-DC (Boost) que procesa los 17V iniciales para entregar una salida constante de 30V DC. Esta etapa es vital para compensar la caída de tensión durante la oscilación y

garantizar que los transistores 2N3055 operen en su zona de saturación.

- La arquitectura técnica del sistema se define como una unidad de potencia y conmutación de alta fidelidad, integrada por una etapa de rectificación de onda completa que emplea capacitores cerámicos de desacople (104) para la supresión de ruido de alta frecuencia (EMI) y transitorios de conmutación. Esta energía filtrada es procesada por un regulador conmutado tipo Boost, el cual eleva la tensión a 30V DC para alimentar un oscilador de potencia basado en dos transistores **2N3055** dispuestos en paralelo; estos cuentan con una red de protección Flyback conformada por diodos ultra-rápidos y capacitores de amortiguación (**s**nubbers) entre colector y emisor para neutralizar los picos de fuerza electromotriz inversa (Back-EMF). El conjunto se sintoniza mediante una red de polarización resistiva simétrica de $10k\Omega$, diseñada para inducir una resonancia electromagnética estable en el secundario, optimizando la transferencia de energía inalámbrica y garantizando la integridad térmica de los semiconductores ante las demandas de la carga inductiva.
- Fundamental para la integridad del operador, el diseño incorpora un transformador de aislamiento en la etapa de entrada, el cual cumple la función crítica de desacoplar galvánicamente el prototipo de la red eléctrica doméstica. Esta barrera física impide que la fase de la corriente alterna tenga un camino de retorno directo a través de la tierra del circuito o del propio usuario, eliminando el riesgo de electrocución por contacto accidental con las partes vivas del oscilador. Al operar bajo este esquema de aislamiento galvánico, se confina la alta energía al entorno resonante de la bobina, permitiendo que el sistema de 30V funcione de manera autónoma y segura frente a las fluctuaciones y peligros inherentes a la red de baja tensión. Se sugiere como pruebas de seguridad operar la bobina a tensiones bajas en donde no se presente aumento de temperatura en los transistores o en otros componentes. Ir elevando el voltaje con un máximo de operación de 30V DC [8].

B. Resumen del Diseño y Caracterización Electromagnética

El presente prototipo implementa un sistema resonante de alta frecuencia basado en una topología de oscilador de estado sólido (SSTC) con acoplamiento inductivo. El diseño del bobinado secundario presenta una inductancia calculada de $6.89mH$, la cual, en conjunción con un terminal esférico de aluminio de 9.5cm de diámetro que aporta una capacitancia de carga de 5.3pF, establece una frecuencia de resonancia operativa de aproximadamente 650kHz. Esta sintonización permite una transferencia de energía óptima desde una fuente de corriente continua de 30V, logrando una elevación de potencial mediante el fenómeno de resonancia eléctrica en serie en el circuito secundario. La eficiencia del sistema se ve potenciada por la utilización de un par de transistores 2N3055 en paralelo, cuya conmutación es protegida por redes de amortiguación flyback, garantizando una salida de alta tensión estable capaz de generar gradientes de potencial superiores a la rigidez dieléctrica del aire, facilitando la observación de descargas de plasma y la transmisión inalámbrica de energía por inducción electrostática.

C. Construcción de la Bobina de Tesla.

Se realizó el montaje de alimentación sobre una base de madera como se muestra a continuación:

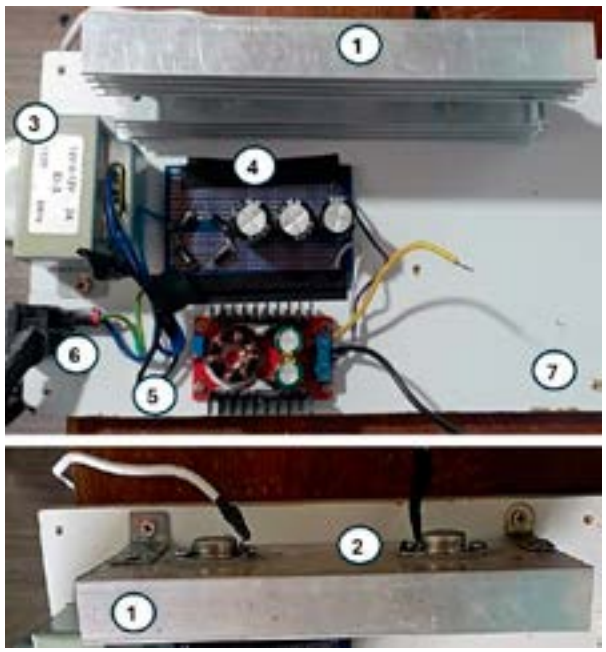


Fig. 2. Vista superior y lateral del sistema de control y potencia del prototipo de la Bobina de Tesla desarrollado en la UMNG. Se observa la integración de las etapas de rectificación, regulación y conmutación de potencia. (1 Disipador de calor, 2 Transistores de potencia (2N3055), 3 Transformador (110V/12V-2A), 4 Módulo de Rectificación, 5 Regulador Boost DC-DC, 6 Interruptor, Chasis de montaje en Madera)

Se realizó el montaje del diseño como se muestra a continuación:



Fig. 3. Bobina de Tesla desarrollada por el semillero de astronomía y astrofotografía científica SAAC para su uso en la Semana de la Ciencia de la UMNG.

La selección de estos componentes (ver Fig. 1) no solo respondió a criterios de eficiencia eléctrica, sino también a una finalidad didáctica. Al mantener los módulos visibles y numerados, el prototipo permite a los estudiantes del semillero de la UMNG realizar un seguimiento del flujo de energía, facilitando la comprensión de la electrónica de potencia aplicada antes de proceder a las pruebas de espectroscopia.

D. Fase de pruebas con tubos de descarga:

Se realizaron pruebas con diferentes tubos y bombillos comerciales, dando buenos resultados de encendido incluso a bajos voltajes de operación de 17V en el convertidor DC-DC, volviendo a la bobina más segura y eficiente.

IV RESULTADOS PRELIMINARES

A. Resumen del Diseño y Caracterización Electromagnética

La fase de pruebas iniciales confirmó la funcionalidad del sistema de alta frecuencia y su efectividad como herramienta de divulgación. Como se aprecia en la **Figura 4**, el prototipo logra la interacción directa con la materia sin necesidad de conductores físicos, validando los objetivos de diseño.



Fig. 4. Validación experimental del campo electromagnético. (Izquierda) Ionización de vapor de mercurio en lámpara fluorescente mediante transferencia inalámbrica. (Derecha) Excitación electrónica de un tubo de descarga de gas Hidrógeno, evidenciando la luminiscencia característica para análisis espectroscópico.

La utilidad pedagógica del prototipo se consolida al emplear el campo electromagnético de alta frecuencia para la ionización de diversos tubos de descarga, cada uno conteniendo gases nobles o elementos específicos como Hidrógeno, Helio y Neón. Al someter estos tubos a la proximidad de la Bobina de Tesla, el campo de radiofrecuencia excita los electrones del gas, provocando una luminiscencia cuya firma cromática depende estrictamente de la estructura atómica del elemento. Mediante el uso de redes de difracción, los estudiantes logran descomponer esta luz en líneas de emisión discretas, permitiendo una transición directa de la teoría a la práctica: lo que en el aula de ingeniería se estudia como un fenómeno de plasma y en el contexto astronómico se revela como la herramienta de diagnóstico fundamental para determinar la composición química de las estrellas. Esta experimentación transforma el equipo en un espectroscopio activo, donde la identificación de las líneas de Balmer del Hidrógeno, por ejemplo, sirve como modelo a escala de los procesos de análisis que realizan los grandes observatorios terrestres.

B. Análisis de la Evidencia Experimental

- Transferencia de Energía Inalámbrica: En la imagen de la izquierda Fig. 4, se observa la iluminación de una bombilla de bajo consumo por proximidad. El campo eléctrico generado por el terminal superior de la bobina es lo suficientemente intenso para ionizar el gas interno de la bombilla, superando su potencial de ruptura. Este resultado demuestra la eficiencia de la sintonía entre los circuitos resonantes del prototipo.
- Excitación de Gases Específicos: En la imagen de la derecha, se observa el uso de un tubo de descarga delgado. La coloración rosácea-violácea obtenida es consistente con la excitación de los átomos de Hidrógeno. Este resultado es crucial para el componente astronómico del proyecto, ya que confirma que la bobina proporciona la energía necesaria para generar las líneas de emisión que posteriormente serán analizadas mediante espectroscopia.
- Seguridad y Portabilidad: Durante las pruebas, el prototipo mostró estabilidad térmica en los transistores de potencia (ver Fig. 1) y un control preciso del arco eléctrico, lo que garantiza su viabilidad para ser operado frente a público general en la Semana de la Ciencia 2026.
- Se observaron los espectros con la ayuda de una red de difracción de 600 líneas por milímetro [9].

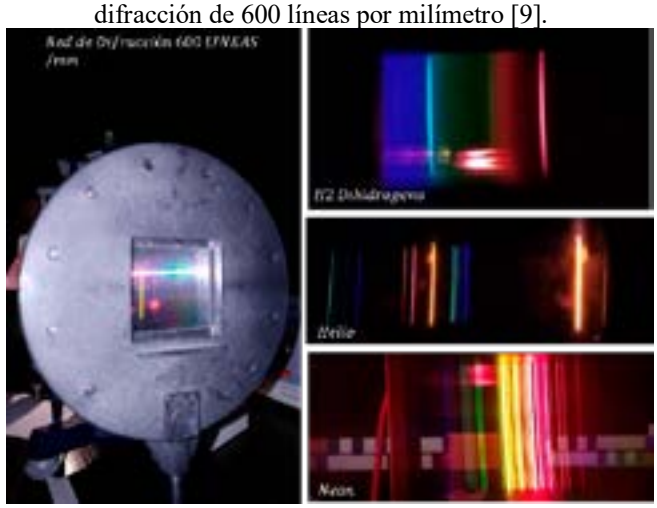


Fig. 5. Líneas espectrales obtenidas a partir de tubos de descarga gaseosa mediante una red de difracción y el prototipo de Bobina de Tesla desarrollado por el semillero SAAC.

C. Experiencia del Semillero: Formando Líderes en Ciencia

Más allá de los logros técnicos, este proyecto ha sido un motor de transformación para los integrantes del Semillero de Astronomía y Astrofotografía Científica de la UMNG. Durante el proceso de construcción y prueba, los estudiantes no solo

aplicaron conocimientos de ingeniería electrónica, sino que asumieron el liderazgo en la resolución de problemas técnicos y en la mediación pedagógica.

La observación experimental del encendido de un tubo de hidrógeno y la descomposición de su emisión luminosa en líneas espectrales permitió generar un mayor interés y apropiación de los conceptos estudiados, trascendiendo el enfoque tradicional de enseñanza en el aula. Esta experiencia ha fortalecido sus habilidades blandas, como la comunicación asertiva y el trabajo en equipo, preparándolos no solo como técnicos competentes, sino como divulgadores capaces de inspirar a las nuevas generaciones de científicos e ingenieros en Colombia [10,11].

V. Conclusiones

El desarrollo y validación experimental del prototipo funcional de la Bobina de Tesla demostró la viabilidad de integrar principios de electromagnetismo de alta frecuencia con aplicaciones educativas orientadas a la enseñanza de la espectroscopia y la astronomía, mediante una plataforma experimental segura y de bajo costo. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que:

- La Bobina de Tesla fue validada como una herramienta experimental para la educación STEM, permitiendo la visualización de fenómenos asociados a la excitación atómica y emisión espectral mediante ionización inalámbrica de tubos de descarga gaseosa. El diseño modular y el sistema de control implementado permitieron alcanzar una operación resonante estable, logrando la excitación de diferentes gases nobles y reactivos (Fig. 3). Los resultados obtenidos validan el dispositivo como una plataforma portátil para demostraciones experimentales de espectroscopia y electromagnetismo de alta frecuencia.
- La articulación entre electromagnetismo y espectroscopia demostró ser una estrategia pedagógica eficaz para facilitar la comprensión de conceptos asociados a la física atómica y las transiciones electrónicas, permitiendo a los estudiantes observar experimentalmente las “huellas dactilares” de los elementos químicos que componen el universo.
- El presente experimento integra principios de ingeniería aplicada y espectroscopia astronómica, estableciendo una base experimental para comprender el análisis de la composición química de las estrellas a partir de la radiación electromagnética emitida y observada desde la Tierra.
- El uso de herramientas digitales para la extracción y análisis espectral permitió integrar la experimentación física con el procesamiento de datos aplicado a contextos de ingeniería y astronomía observacional.
- El prototipo se consolida como una plataforma experimental robusta y escalable para actividades de divulgación científica y educación STEM, con potencial de implementación en escenarios académicos y eventos institucionales como la Semana de la Ciencia 2026 de la Universidad Militar Nueva Granada.
- La participación de los estudiantes en el diseño, construcción y liderazgo del proyecto durante la “Semana de la Ciencia” contribuyó al fortalecimiento de competencias transversales relacionadas con divulgación científica, trabajo interdisciplinario y experimentación aplicada.

Referencias

[1] R. K. Jha y A. K. Jha, "Design and construction of a Tesla coil for educational purposes," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 9, no. 6, pp. 124-128, Jun. 2020.

[2] R. A. Serway and J. W. Jewett, Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, 7th ed. Belmont, CA, USA: Cengage Learning, 2007.

[3] D. J. Griffiths, Introduction to Quantum Mechanics, 3rd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2018.

[4] J. M. Pasachoff y A. Filippenko, *The Cosmos: Astronomy in the New Millennium*, 5th ed. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2019.

[5] W. Demtröder, Laser Spectroscopy: Basic Concepts and Instrumentation, 5th ed. Berlin, Germany: Springer, 2014.

[6] E. Stempels, "The importance of spectroscopy in modern astronomy," *Journal of the British Astronomical Association*, vol. 125, no. 4, pp. 215-220, 2015.

[7] D. A. Kolb, *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2014.

[8] J. F. Corum and K. L. Corum, Tesla Coils and the Failure of Lumped-Element Circuit Theory. Chicago, IL, USA: Tesla Book Company, 1992.

[9] E. Hecht, Optics, 5th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2017.

[10] World Engineering Education Forum (WEEF), "Engineering education for a sustainable future: Transforming the classroom," en Proc. WEEF/GEDC, 2024.

[11] ACOFI (Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería), "Tendencias en la formación de ingenieros en Colombia hacia 2030," Bogotá, Colombia, 2022. [Online]. Available: https://www.acofi.edu.co.

ExamWatch: A Real-Time Academic Surveillance System for Detecting Irregular Behavior in Computer-Assisted In-Person Examination

Javier Stiven Vásquez Claros
Semillero AUTÓMATA
Tecnológico de Antioquia
Medellín, Colombia
javier.vasquez@correo.tdea.edu.co

Juan David Tamayo Quintero
Semillero AUTÓMATA
Tecnológico de Antioquia
Medellín, Colombia
juan.tamayo1@tdea.edu.co

Silvana Lorena Vallejo Córdoba
Semillero AUTÓMATA
Tecnológico de Antioquia
Medellín, Colombia
silvana.vallejo81@tdea.edu.co

Abstract: ***Cheating during in-person exams on computers is a growing problem for universities. When students work on laptops or lab PCs, one instructor cannot realistically monitor every screen at once, which creates opportunities for unauthorized browsers, messaging apps, saved files, or AI tools. Existing solutions, such as lockdown browsers, block access to other programs but do not record activity or provide the teacher with real-time feedback. In addition, commercial remote proctoring platforms are too costly for most Colombian universities. ExamWatch addresses this issue through a four-module software architecture: a desktop client that runs on the student's machine, a backend server that applies configurable detection rules, a webcam-based computer vision module, and an instructor dashboard. Under exam conditions, testing results show that log transmission latency stayed below 500 ms, emotion detection latency was below 1000 ms, anomaly detection accuracy exceeded 80%, and CPU load on student machines remained under 15%. The system also handles privacy compliance with Colombia's Personal Data Protection Law (Law 1581 of 2012) by building informed consent and data minimization into the workflow from the start.***

Keywords: ***Academic integrity monitoring, real-time activity surveillance, computer vision proctoring, anomaly detection, educational technology.***

I. Introduction

Computer-based exams have become common in Colombian universities, and with that shift came new ways for students to cheat that simply did not exist on paper. From a distance, an instructor has no reliable way to know whether a student has a browser open, is messaging someone, or is using an AI assistant; all of which occurs silently on the screen.

This is not a minor concern. Martínez and Ramírez documented that academic fraud is a recurring problem in Colombian higher education, and most institutions still handle it through policies rather than technical means. The COVID-19 pandemic accelerated the adoption of remote proctoring tools globally, but those platforms were designed for students taking exams alone at home, not for shared computer labs with an instructor in the room.

ExamWatch was built by the AUTÓMATA research seedbed at Tecnológico de Antioquia – Institución Universitaria to address that specific gap. It tracks student activity on each machine during an exam, flags irregular behavior through a set of configurable rules, and visualizes this information in real time through a centralized instructor dashboard. Beyond the monitoring features, the project served as a hands-on development exercise covering distributed systems, security, databases, and data ethics for undergraduate engineering students.

The rest of this paper is organized as follows: Section II reviews existing proctoring approaches. Section III covers the system architecture and development methodology. Section IV presents the experimental results. Section V discusses implications and limitations. Section VI closes with conclusions and future directions.

A. State of the Art

Academic proctoring tools generally fall into two categories: remote platforms and local access control software. Platforms like Proctorio, Respondus Monitor, and ProctorU combine browser lockdown with screen recording and webcam feeds, and they have shown results in online settings Nguyen et al. found that remote proctoring reduced cheating in online chemistry exams. The problem is that these tools assume students are in separate locations with stable internet connections and no instructor present, which is the opposite of a supervised computer lab.

Local tools like Respondus LockDown Browser and Safe Exam Browser take a different approach: they block access to other applications during the exam. Cluskey et al. reviewed these systems and noted that while they deter casual cheating, users with some technical knowledge can find ways around them. More importantly, they produce no activity records and give the instructor no live feedback, which makes them access-control tools rather than actual monitoring systems.

On the research side, behavioral anomaly detection has been explored through keystroke dynamics, gaze tracking, and facial expression analysis. YOLOv8 has become a practical option for running this kind of inference directly on client machines without needing a dedicated server, and the Face Emotions dataset (v2i.yolov8) supports training classifiers that distinguish

neutral, happy, sad, and surprised expressions with per-class accuracy above 76% under controlled conditions.

In Colombia specifically, digital proctoring is almost entirely tied to virtual education programs. There are no published local tools designed for in-person computer lab monitoring with the combination of features ExamWatch targets. Bodies like ICFES rely on physical and procedural controls for high-stakes exams, but have not released software-based monitoring solutions. That gap is what motivated this project.

TABLE I. Comparison of Academic Proctoring Solutions.

Feature	Proctoring / ProctorU	Respondus LockDown	ExamWatch
Target environment	Remote	In-person/Remote	On-premises LAN
Activity log	Yes (cloud)	No	Yes (local server)
Real-time view for teachers	No	No	Yes (Dashboard)
Webcam detection	Yes	No	Yes (YOLOv8)
Configurable anomaly engine	No	No	Yes
License cost	High (per user)	Medium	Free (open source)
Complies with Law 1581 of 2012	Not verifiable	Not verifiable	Yes (by design)
Requires an external internet connection	Yes	Yes	No (LAN only)

II. Methods

ExamWatch was built through six sequential development phases following iterative software engineering practices. Privacy by Design guided the process throughout informed consent forms, data minimization, encrypted communication, and defined retention periods were not added at the end, but treated as requirements from the beginning.

A. A. System Architecture

The system is made up of four modules that work together over a local area network. On each student machine, a desktop client written in Python 3.10+ executes in the background during the examination. It captures active window titles using pygetwindow, logs keystroke events through pynput, and tracks clipboard changes and periodic screenshots. A second thread runs in parallel to handle the webcam: it uses OpenCV alongside a fine-tuned YOLOv8 nano model to check for face presence and read emotional state. Both threads attach synchronized timestamps to their data before sending batched events to the server over HTTPS with JWT authentication.

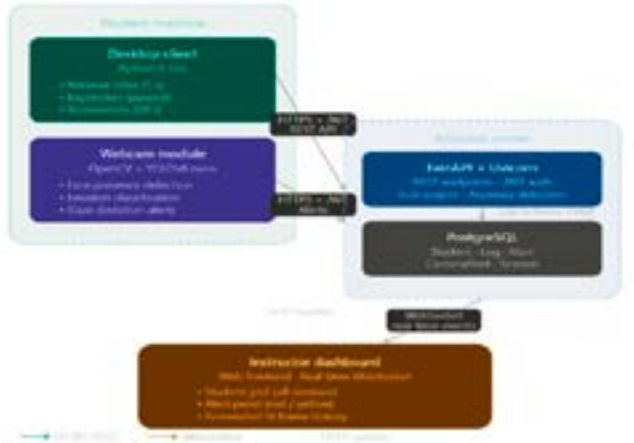


Fig. 2. System architecture of ExamWatch showing four-layer communication flow.

The backend runs on FastAPI with Uvicorn .and persists all session data in a PostgreSQL database using the SQLAlchemy ORM. The data model is built around four entities: Student (credentials and session metadata), Log (event type, sanitized content, and timestamp), Alert (severity level, the rule that triggered it, and a reference frame), and CameraAlert (anomaly type, confidence score, and an optional audit frame). As logs come in, a rule engine compares them against the instructor's list of prohibited apps and domains and assigns one of three severity levels: high for a missing or duplicated face, medium for a blocked application in the foreground, and low for unusual shifts in emotional state.

The instructor dashboard is a web frontend connected to the server through WebSockets. It shows all registered students in a live grid, a color-coded alert panel where red means high severity and yellow means medium, per-student screenshot and camera frame histories, anomaly frequency graphs, and an option to export the full session report.

B. Computer Vision Module

The webcam component went through two stages. First, the Face Emotions v2i dataset in YOLOv8 format was prepared, which includes annotated bounding annotated bounding boxes for six emotional states: Happy, Sad, Neutral, Surprised, Angry, and Disgusted. Of these, only Happy, Sad, Neutral, and Surprised trigger application-level alerts; Angry and Disgusted are detected by the model but do not map to any alert rule in the current version. Before training, the dataset was augmented with horizontal flips, brightness changes, and Gaussian noise to make the model more resilient to the kind of inconsistent lighting found in real computer labs.

Training ran for 50 epochs on a YOLOv8 nano architecture with a standard train/validation split. The nano variant was chosen specifically because it keeps CPU usage within the 15% ceiling on student machines. The trained model feeds into four detection rules: a face absent for more than 5 consecutive seconds raises a high-severity alert; multiple faces in frame at the same time also raises high severity; an emotional shift from Neutral toward Surprise or Sad with confidence above 0.65 triggers a medium alert; and gaze deviation inferred from head pose held for over 5 seconds triggers another medium alert.

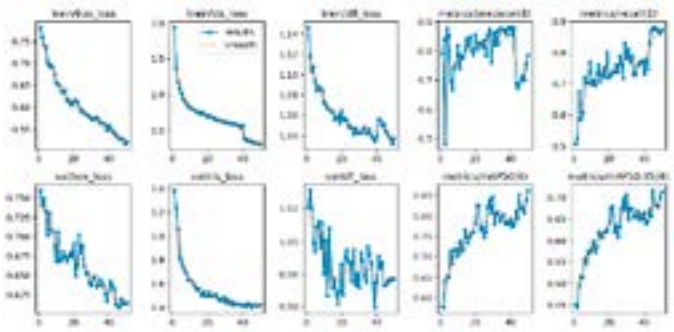


Fig. 3. YOLOv8 nano training curves across 50 epochs showing training/validation loss and performance metrics.

C. Security and Ethical Framework

All communication between client and server goes through HTTPS with TLS, and every request requires a JWT token with a configurable expiration time. Passwords are stored as bcrypt hashes and never in plain text. Informed consent is not just a form students sign before the test, it is a hard checkpoint built into the client itself. If a student does not accept the data handling disclosure, the monitoring thread does not start. Data handling follows Law 1581 of 2012 on Personal Data Protection, and captured data is kept only for as long as the institution's policy requires, strictly within the exam supervision context.

D. Model Training Performance

The YOLOv8 nano model was trained for 50 epochs on the Face Emotions v2i dataset, which has 443 validation images spread across 6 classes. Against the validation set, the model reached an overall precision of 68.5%, recall of 87.9%, and mAP@0.5 of 85.3% (mAP@0.5-95: 71.7%).

Results varied considerably by class, mostly because of how uneven the dataset is. The 'Happy' class yielded the highest classification performance, achieving, 95.9% precision, 100% recall, and 99.3% mAP@0.5. Neutral and Sad also held up well, with mAP@0.5 values of 93.5% and 94.8% respectively. Angry and Disgusted were the weak points, with precision of 58.9% and 22.3%, which makes sense which is expected since those classes had very few examples to evaluate against 13 for Angry and 7 for Disgusted

Both training and validation losses dropped consistently through the 50 epochs, and the mAP@0.5 curve was still climbing at epoch 50, indicating that extended training epochs could potentially enhance model performance. On the hardware side, inference on an NVIDIA GeForce RTX 4050 Laptop GPU averaged 4.1 ms per image, which is well within real-time range.



Fig. 4. YOLOv8 training metrics across 50 epochs.

E. System Performance Metrics

Latency was measured across all test sessions under a 30-client concurrent load on a 100 Mbps institutional LAN. The mean log transmission latency shows 187 ms with a standard deviation of 42 ms, comfortably under the 500 ms target. The highest peak observed was 412 ms, recorded during a simulated network congestion scenario.

The emotion detection pipeline averaged 634 ms end-to-end, staying below the 1000 ms ceiling. On the student machines, CPU usage averaged 11.3% with a peak of 14.8%, and RAM averaged 218 MB with a peak of 271 MB, both within the 15% and 300 MB limits set at the start of the project.

F. Anomaly Detection Accuracy

The rule engine was tested by manually injecting irregular events on a student machine, unauthorized browser activation, messaging app access, and clipboard manipulation. In every case, the system generated alerts on the instructor dashboard within the expected latency window. The only missed detections happened when a browser was opened and closed in under 3 seconds, which falls below the consecutive-detection threshold by design. That threshold exists to avoid flooding the instructor with alerts every time a student briefly switches windows.

The webcam module correctly detected face presence and triggered alerts for both absence and multiple-face situations during testing. Emotion classification held at 4.1 ms per frame on the development GPU. The weakest point was gaze deviation detection: since it infers gaze from head pose rather than tracking the iris directly, it lost reliability at extreme lateral angles. That component is flagged for a redesign in the next version.

III. Discussion

The results confirm that ExamWatch works as intended for in-person exam supervision. The 4.1 ms inference time means the webcam module runs without any perceptible lag, and the 85.3% mAP@0.5 is a reasonable baseline for a nano-scale model running under tight hardware constraints.

TABLE II. Comparison of performance metrics for different classes.

Class	Precision	Recall	F1-Score	mAP@0.5	mAP@0.5-95
Angry	0.589	0.846	0.694	0.686	0.550
Disgusted	0.223	0.571	0.321	0.602	0.469
Happy	**0.959**	**1.000**	**0.979**	**0.993**	**0.888**
Neutral	0.790	0.966	0.869	0.935	0.762
Sad	0.720	0.969	0.833	0.948	0.615
Surprise	0.827	0.903	0.863	0.957	0.615
Overall	**0.685**	**0.879**	**0.770**	**0.853**	**0.717**

Model Limitations and Dataset Imbalance: The biggest weak point in the computer vision module is the class imbalance in the training data. Happy dominates with 238 validation instances, while Disgusted has only 7 explains the gap between their precision scores. In practice, this matters less than it looks the most critical detection rules work on face presence and count, not on emotion classification but it does limit how much weight the instructor should give to emotion-based alerts.

Collecting more samples for the underrepresented classes is the next priority for the vision module.

Rule Engine Thresholds: The 3-second window before an alert fires is a deliberate design choice. It means brief, routine window switches do not generate noise on the dashboard, but it also means a student who opens a prohibited app and closes it quickly goes undetected. Different institutions will have different tolerances for that trade-off. Making the threshold adjustable directly from the dashboard, without touching the server configuration, is already planned.

Ethical and Legal Architecture: Tying informed consent to a hard technical checkpoint has real consequences. A student who skips the disclosure simply cannot be monitored and the client will not start. This limits coverage but makes the system's legal position much cleaner under Law 1581 of 2012, which requires consent to be specific and informed. For Colombian public universities, this is not an optional design detail; it is a legal requirement.

Institutional Fit: Commercial platforms like Proctorio are built for a very different scenario, a student alone in a room, with internet access, being reviewed remotely. ExamWatch targets the opposite: a shared lab, a local network, an instructor physically present, and an institution that cannot afford per-user licensing. Those constraints shaped every architectural decision, and they are what make the system actually usable in the regional context.

IV. Conclusions

This paper presented ExamWatch, a real-time monitoring system for in-person computer-based exams built by the AUTÓMATA seedbed at Tecnológico de Antioquia. The system brings together a desktop monitoring client, a YOLOv8 computer vision module, a FastAPI/PostgreSQL backend with rule-based detection, and a live instructor dashboard, all validated under simulated exam conditions. Key results include 4.1 ms per-frame inference on an RTX 4050 GPU, an overall mAP@0.5 of 85.3% across six emotion classes, and consistent anomaly detection within the defined latency targets. Everything runs on open-source tools, which removes licensing costs and makes adaptation by other institutions straightforward.

Three takeaways stand out from this work. First, the gap between what commercial remote proctoring offers and what in-person Colombian university labs actually need can be closed with locally built open-source software. Second, treating legal compliance with Law 1581 of 2012 as a technical constraint from day one, rather than a policy document attached at the end, makes the system both legally defensible and more trustworthy for institutions. Third, the seedbed model gave undergraduate engineering students real experience building a distributed system with security, database, and ethics components, which is hard to replicate in a traditional classroom exercise.

Next steps for the project include replacing the current static rule engine with a sequential pattern detector to reduce false positives, upgrading gaze deviation from head-pose inference to direct iris tracking, and building an API layer to connect with institutional learning management systems for automatic session setup and data integration.

V. Acknowledgment

The authors thank the AUTÓMATA research seedbed and the Facultad de Ingeniería at Tecnológico de Antioquia – Institución Universitaria for their institutional support and for providing access to the laboratory facilities used in this project.

VI. References

[1] FastAPI, "FastAPI documentation," 2024. [Online]. Available: https://fastapi.tiangolo.com. [Accessed: May, 2026].

[2] Ultralytics, "YOLOv8 Docs," 2024. [Online]. Available: https://docs.ultralytics.com. [Accessed: May, 2026].

[3] Roboflow, "Face Emotions v2i Dataset (v2i.yolov8)," 2023. [Online]. Available: https://universe.roboflow.com/akin-sn8wm/face-emotions.. [Accessed: May, 2026]

[4] Congreso de la República de Colombia, "Ley 1581 de 2012: Por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales," Oct. 17, 2012. [Online]. Disponible en: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1581_2012.html

[5] G. R. Cluskey Jr., C. R. Ehlen y M. H. Raiborn, "Thwarting online exam cheating without proctor supervision," *Journal of Academic and Business Ethics*, vol. 4, pp. 1-7, oct. 2011. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/267965148_Thwarting_online_exam_cheating_without_proctor_supervision

[6] L. Martínez y E. Ramírez R., "Academic Fraud by University Students in Colombia: How Chronic is the Illness?", *Revista Educación y Educadores*, vol. 21, n.º 1, pp. 27-47, 2018. [Online]. Available: https://www.academia.edu/34030945/Academic_Fraud_by_University_Students_in_Colombia_How_Chronic_is_the_Illness.

[7] J. G. Nguyen, K. Keuseman y J. J. Humston, "Minimize Online Cheating for Online Assessments During COVID-19 Pandemic," *Journal of Chemical Education*, vol. 97, n.º 9, pp. 3429–3435, sep. 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/343406264_Minimize_Online_Cheating_for_Online_Assessments_During_COVID-19_Pandemic

Red de Sensores para Monitoreo Agrícola

Danna Lizeth Herrera Rincón
Facultad de Sistemas
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
dlherrerar@itc.edu.co

Kelly Johanna Prieto Pérez
Facultad de Sistemas
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
kjprietop@itc.edu.co

***Resumen*—La adopción limitada de tecnologías basadas en redes de sensores inalámbricas (WSN) e Internet de las Cosas (IoT) en el sector agrícola colombiano dificulta la obtención de datos en tiempo real para la toma de decisiones, evidenciando la necesidad de soluciones accesibles que fortalezcan el monitoreo de los cultivos. En este contexto, el presente trabajo describe el diseño e implementación de una red de sensores inalámbrica con arquitectura IoT orientada al cultivo de fresa. La propuesta se fundamenta en un modelo de tres capas (percepción, red y aplicación), incorporando una topología híbrida estrella-árbol para garantizar una transmisión eficiente hacia un nodo central. La investigación, de carácter aplicado y experimental, se desarrolló bajo la metodología ágil Scrum. Como resultado, se implementó un prototipo funcional basado en nodos ESP8266, sensores de humedad FC-28, protocolo de mensajería MQTT y un servidor central sobre Raspberry Pi con almacenamiento en MySQL. El sistema demuestra la viabilidad técnica de una red de bajo costo, robusta y escalable, sentando las bases para futuras estrategias de agricultura predictiva.**

Palabras clave— Red de sensores inalámbricas, IoT, topología híbrida, agricultura de precisión

I. Introducción

La agricultura de precisión requiere sistemas de monitoreo continuo de variables ambientales y edáficas para optimizar el uso de recursos y aumentar la productividad. Sin embargo, en regiones como Colombia, la adopción de tecnologías basadas en redes de sensores inalámbricas e IoT es aún incipiente, debido a barreras como el alto costo de equipos comerciales, la falta de conectividad en zonas rurales y el desconocimiento técnico [1].

El cultivo de fresa es particularmente sensible a las condiciones del suelo: la humedad, la temperatura, el pH y la conductividad eléctrica influyen directamente en la calidad y el rendimiento del fruto. Un sistema de monitoreo autónomo y de bajo costo permitiría a los agricultores tomar decisiones basadas en datos en tiempo real, reduciendo pérdidas y optimizando riego y fertilización [2].

Como etapa inicial, se implementa y valida la adquisición de humedad del suelo mediante el sensor FC-28 conectado directamente al pin analógico A0 del módulo ESP8266, constituyendo el primer paso hacia una red de sensores multivariable. Se detalla la arquitectura completa del sistema, los componentes seleccionados, el protocolo de comunicación MQTT y el almacenamiento en MySQL sobre Raspberry Pi. [3].

II. Planteamiento del Problema

El cultivo de fresa (Fragaria × ananassa) exige un control riguroso de las variables edáficas e hídricas, ya que factores como la humedad del suelo inciden de manera directa en el desarrollo morfológico, la salud del fruto y el rendimiento final de la cosecha. Tradicionalmente, en el sector agrícola colombiano, la gestión de estos cultivos se realiza mediante métodos empíricos y esquemas de manejo reactivos. Esta falta de precisión genera ineficiencias en el uso de recursos vitales —como el agua y los fertilizantes— e incrementa el riesgo de pérdidas productivas por estrés hídrico o enfermedades derivadas del exceso de humedad.

Aunque la Agricultura 4.0 y el Internet de las Cosas (IoT) ofrecen herramientas robustas para el monitoreo en tiempo real, su adopción en zonas rurales de Colombia es severamente limitada. Los agricultores de pequeña y mediana escala se enfrentan a tres grandes barreras: (1) el alto costo de adquisición y mantenimiento de las redes de sensores comerciales; (2) la dependencia de estas tecnologías hacia infraestructuras de telecomunicaciones externas (como redes celulares o banda ancha), las cuales son inestables o inexistentes en campo; y (3) la complejidad técnica para su despliegue. Por lo tanto, existe una brecha tecnológica crítica que impide a los productores acceder a sistemas de monitoreo autónomos, escalables y económicamente viables.

A partir del contexto descrito, la presente investigación se orienta a resolver el siguiente interrogante:

¿Cómo diseñar e implementar una red de sensores inalámbrica, basada en una arquitectura IoT de bajo costo y operación autónoma, que garantice la transmisión eficiente y confiable de datos de humedad del suelo hacia un nodo central en cultivos de fresa con limitaciones de conectividad externa?

Para dar respuesta a esta problemática, se propone el desarrollo de una Red de Sensores Inalámbrica (WSN) descentralizada, utilizando microcontroladores de bajo costo, topologías de red eficientes para el ahorro energético y protocolos de mensajería ligeros (MQTT) que no dependan de una conexión a internet externa, centralizando la información localmente mediante una Raspberry Pi.

Con el fin de responder a la pregunta de investigación planteada, el presente trabajo propone el diseño de una red de sensores inalámbrica basada en arquitectura IoT para el cultivo de fresa, orientada a la transmisión eficiente y confiable de datos hacia un nodo central. Para materializar esta solución, se estructura una arquitectura que define la

topología y distribución estratégica de los nodos en el área de cultivo, integrando la infraestructura de comunicación inalámbrica necesaria para su interconexión y estableciendo un sistema de almacenamiento local que garantice la gestión continua y persistente de la información generada.

III. Marco Teorico

A. *Redes de Sensores Inalámbricas (WSN)*

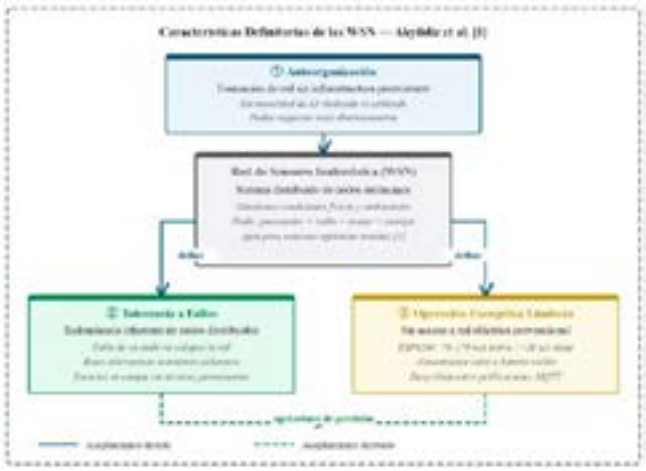


Fig. 1. Características base de las redes de sensores inalámbricas (WSN).

Una red de sensores inalámbrica (WSN, por sus siglas en inglés) es un sistema distribuido compuesto por nodos autónomos que supervisan condiciones físicas o ambientales —temperatura, humedad, presión, entre otras— y transmiten los datos recopilados hacia un punto de recolección central [1]. Cada nodo integra típicamente una unidad de procesamiento, módulos de comunicación inalámbrica, sensores y una fuente de energía [2], reflejado en la Fig. 1.

Akyildiz et al. [1] identifican tres características definitorias de las WSN que las hacen especialmente aptas para entornos agrícolas remotos: (1) capacidad de autoorganización, que permite la formación de la red sin infraestructura preexistente; (2) tolerancia a fallos, gracias a la redundancia inherente de los nodos distribuidos; y (3) operación con recursos energéticos limitados, esencial cuando la alimentación eléctrica convencional no está disponible en campo.

En el contexto de la agricultura de precisión, las WSN posibilitan la adquisición continua y espacialmente distribuida de variables edafoclimáticas, fundamento para la toma de decisiones agronómicas basadas en datos [3]. La confiabilidad de dicha adquisición depende tanto de la calidad de los sensores como de la capacidad de la red para garantizar comunicación eficiente entre nodos y sistemas de almacenamiento.

B. *Arquitectura IoT por Capas*

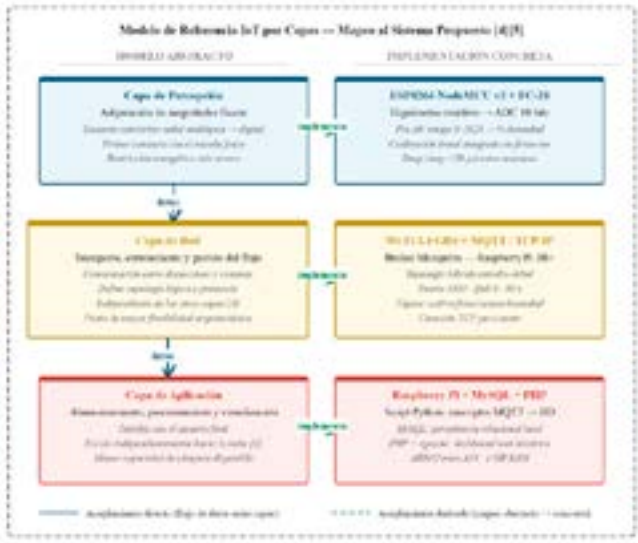


Fig. 2. Modelo de referencia IoT por capas.

El modelo de referencia de tres capas para sistemas IoT detallado en la Fig. 2, ampliamente adoptado en la literatura [4], [5], organiza la arquitectura en niveles funcionales claramente diferenciados: (1) la capa de percepción, donde los sensores adquieren magnitudes físicas del entorno y las convierten en señales digitales; (2) la capa de red, responsable del transporte, enrutamiento y gestión del flujo de información entre dispositivos; y (3) la capa de aplicación, donde los datos se almacenan, procesan, analizan y visualizan para el usuario final.

Esta separación por capas ofrece ventajas arquitectónicas relevantes: facilita la escalabilidad del sistema —cada capa puede extenderse de manera independiente sin afectar las demás—, simplifica el mantenimiento y permite la integración con plataformas de procesamiento en la nube [4]. El sistema propuesto en este trabajo se adhiere a este modelo, siendo los módulos ESP8266 la capa de percepción, la red Wi-Fi con protocolo MQTT la capa de red, y la Raspberry Pi junto con la base de datos local la capa de aplicación.

C. Topología Híbrida Estrella–Árbol en WSN

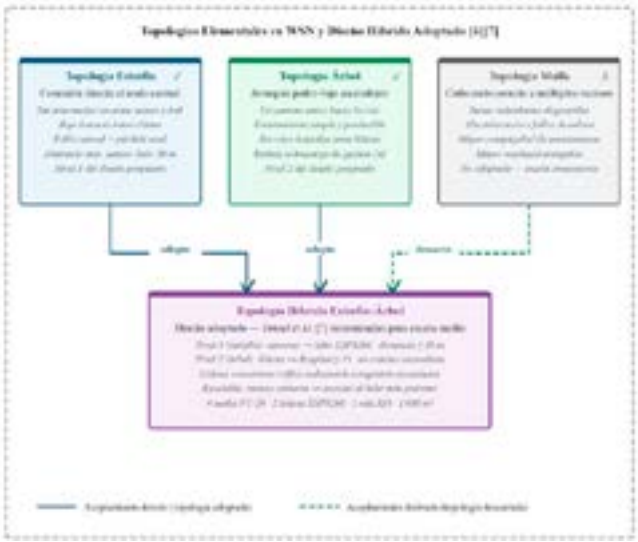


Fig. 3. Contraste entre topologías elementales WSL y diseño híbrido acoplado.

La topología de red define la estructura lógica y física mediante la cual los nodos de una WSN se interconectan y comunican entre sí. Las topologías elementales más empleadas en redes de sensores representadas en la Fig 3 son: (1) estrella, donde cada nodo se conecta directamente a un punto central sin intermediarios; (2) árbol, que organiza los nodos en jerarquías padre-hijo permitiendo que los datos fluyan desde los nodos hoja hasta la raíz; y (3) malla, donde cada nodo puede comunicarse con múltiples vecinos, generando rutas redundantes [6].

La topología híbrida estrella–árbol, adoptada en el presente diseño, combina ambas estructuras en dos niveles jerárquicos diferenciados. En el primer nivel (intra-clúster), los nodos sensores ESP8266 se organizan en topología estrella alrededor de un nodo líder: cada sensor transmite directamente a su líder sin intermediarios, minimizando latencia y consumo energético en los nodos de campo. En el segundo nivel (inter-clúster), los nodos líderes se conectan al nodo central —una Raspberry Pi— siguiendo una estructura en árbol: cada líder mantiene un único camino ascendente hacia la raíz, lo que simplifica el enrutamiento y reduce la sobrecarga de gestión de red.

Jawad et al. [7] señalan que esta combinación es especialmente adecuada para entornos agrícolas de mediana escala por tres razones: (1) los nodos sensores, más numerosos y con mayor restricción energética, solo necesitan alcanzar al líder de su clúster (distancias ≤ 50 m), en lugar de transmitir directamente al nodo central; (2) los nodos líderes concentran el tráfico de su clúster antes de reenviarlo, reduciendo la congestión en el enlace ascendente hacia la Raspberry Pi; y (3) la incorporación de nuevos sensores o clústeres no requiere modificar la topología existente, bastando con asociar el nuevo nodo al líder más próximo. La Fig. 1 ilustra la estructura visual de la topología propuesta para el área de cultivo de 1000 m².

D. Módulo ESP8266 y Adquisición Analógica

El módulo ESP8266 NodeMCU v3 integra un procesador Tensilica L106 a 80/160 MHz con conectividad Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n nativa [8]. Dispone de un único canal ADC de 10 bits (pin A0), con rango de entrada de 0 a 1,0 V —extendido a 3,3 V mediante divisor resistivo en la placa NodeMCU—, que convierte señales analógicas en valores enteros en el intervalo [0, 1023]. Esta característica permite conectar directamente sensores de salida analógica como el FC-28 (higrómetro resistivo de suelo) sin necesidad de convertidor externo.

Respecto al consumo energético, el ESP8266 opera entre 70 mA y 170 mA en modo activo, reduciéndose a menos de 20 µA en modo deep sleep [8]. Esto hace viable el diseño de nodos autónomos con alimentación solar o por batería en instalaciones agrícolas sin acceso a red eléctrica convencional. Frente a alternativas como el ESP32 o Arduino con shield Wi-Fi, el ESP8266 ofrece una relación costo-funcionalidad favorable para aplicaciones de monitoreo de baja complejidad computacional [9], justificando su selección en el presente sistema.

E. Protocolo MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo de mensajería publicador/suscriptor estandarizado por OASIS [10], diseñado específicamente para dispositivos con recursos computacionales limitados y redes de baja confiabilidad. Sobre una conexión TCP/IP persistente, los clientes publican mensajes en tópicos específicos y el broker —en este caso Mosquitto— los distribuye a los suscriptores registrados en esos tópicos.

En comparación con HTTP, MQTT reduce significativamente el overhead de cabeceras y el consumo energético al eliminar el establecimiento de conexión por cada transmisión [11]. El protocolo define tres niveles de calidad de servicio (QoS): nivel 0 (at most once), sin confirmación de entrega; nivel 1 (at least once), con confirmación y posible duplicación; y nivel 2 (exactly once), con entrega garantizada única [10]. Para la transmisión de datos de humedad de suelo se seleccionó QoS 0, dado que la pérdida ocasional de una muestra individual es tolerable cuando la frecuencia de muestreo es suficientemente alta para describir la dinámica hídrica del cultivo.

IV. METODOLOGÍA

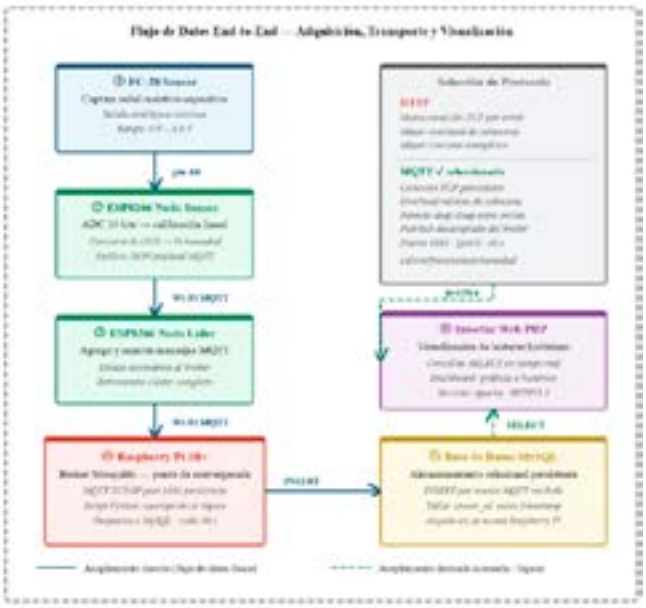


Fig. 4. Arquitectura y flujo de datos.

El presente trabajo sigue un enfoque aplicado, con análisis cuantitativo y validación experimental en campo. La gestión del proyecto se realiza bajo la metodología ágil Scrum, dividiendo el desarrollo en sprints que abarcan desde el diseño de la arquitectura de hardware hasta la validación de la transmisión y almacenamiento de datos.

A. Arquitectura IoT y Flujo de Datos End-to-End

Se adoptó un modelo de tres capas (percepción, red y procesamiento) diseñado para operar de manera autónoma en zonas rurales. El flujo integral de la información, desde la captura física hasta su visualización, se detalla en la Fig. 4.

Capa de Percepción (Nodos Sensores)

Se utiliza el higrómetro resistivo de suelo FC-28 conectado directamente al pin analógico A0 del microcontrolador ESP8266 NodeMCU v3. El conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits del ESP8266 transforma la señal continua (0 – 3,3 V) en un valor discreto (0–1023), el cual se calibra linealmente en el firmware para obtener el porcentaje de humedad. Los datos se empaquetan en formato JSON para su transmisión.

Capa de Red (Comunicación Inalámbrica):

La transmisión se realiza vía Wi-Fi a 2.4 GHz utilizando el protocolo MQTT sobre TCP/IP (puerto 1883). Los nodos sensores publican los datos en el tópico cultivo/fresa/sensor/humedad con una frecuencia de muestreo de 30 segundos.

Capa de Aplicación y Procesamiento (Nodo Central):

Una Raspberry Pi 3B+ actúa como cerebro del sistema. Aloja el broker Mosquitto, que centraliza la recepción de librerías paho-mqtt y mysql-connector, se suscribe a los tópicos y ejecuta consultas INSERT para almacenar la información (ID del sensor, valor y timestamp) en una base de datos relacional MySQL. Finalmente, los datos históricos son consumidos mediante sentencias SELECT por una interfaz web programada en PHP y montada sobre un servidor Apache.

B. Topología y Distribución de Nodos



Fig. 5. Topología y distribución de nodos.

Para la cobertura del área de cultivo, se implementa una topología híbrida estrella-árbol organizada en dos niveles jerárquicos, cuya estructura lógica y flujo de datos hacia el backend se ilustra en la Fig. 5:

Nivel 1 — Topología Estrella (Intra-clúster)

Seis nodos sensores ESP8266 se distribuyen en campo agrupados en dos clústeres independientes (Clúster 1 y Clúster 2), con tres nodos por clúster. Cada nodo sensor adquiere la variable de humedad mediante su respectivo sensor FC-28 y transmite los datos vía Wi-Fi y MQTT exclusivamente a su nodo líder designado (ESP8266 líder A o B). Esta formación en estrella local garantiza un alcance óptimo y minimiza el consumo energético en los nodos finales.

Nivel 2 — Topología Árbol (Inter-clúster):

Los nodos líderes operan como concentradores sin rutas laterales entre sí. Su función es agregar los mensajes MQTT provenientes de los nodos de su clúster y reenviarlos a través de un único enlace ascendente hacia la raíz del árbol, conformada por la Raspberry Pi 3B+. Finalmente, como se observa en la parte inferior de la topología, los datos convergen en la capa de persistencia (MySQL) y presentación (PHP) alojada en el servidor central.

C. Selección y Justificación de Protocolos

Como se ilustra en la comparativa de la Fig. 4, se evaluaron HTTP y MQTT para el transporte de datos. Se descartó HTTP debido a que exige el establecimiento de una nueva conexión TCP por cada envío, lo que incrementa el overhead de cabeceras y penaliza el consumo energético. Se seleccionó MQTT (QoS 0) por mantener una conexión TCP

persistente y desacoplar a los publicadores de los Csuscriptores. Esto minimiza el tráfico de red y permite que los nodos sensores del ESP8266 entren en modo deep sleep entre transmisiones, optimizando la viabilidad energética del sistema en campo.

V. Resultados

A. *Simulacion en Cisco Packet Tracer*

Se utilizó Packet Tracer versión 8.2 para diseñar y validar la topología antes de la implementación real, tal y como se muestra en la Figura 6.



Fig. 6. Representación de la Topología híbrida en árbol (estrella-jerárquica) aplicada a la conexión final objetivo.

Los pasos seguidos fueron:

- Colocación de un router inalámbrico (WR7300N) configurado con SSID ``RedIoT_Fresas", seguridad WPA2-PSK y DHCP activo en la subred 192.168.0.0/24.
- Adición de un dispositivo SBC-PT (Raspberry Pi simulada) conectado por cable Ethernet al router para actuar como broker MQTT y servidor web.
- Adición de seis dispositivos MCU-PT, a cada uno se le agregó el módulo WiFi PT-IOT-NM-1W (2.4 GHz) y se configuró como cliente de la red WiFi.
- Programación en Python (dentro de Packet Tracer) de los MCU-PT utilizando el módulo mqttclient.py para publicar valores simulados de humedad en el tópico cultivo/fresa/humedad.
- Instalación y ejecución del broker MQTT en el SBC-PT, verificación de las conexiones mediante la aplicación MQTT Broker.

La simulación permitió comprobar que hasta 10 nodos sensores publicando cada 5 segundos no generan pérdida de paquetes ni congestión en la red, demostrando la transferencia de datos optima entre la conexión del sensor prueba al Broker Servidor, como se evidencia en la figura 7.



Fig. 7. Eventos MQTT registrados en el broker durante la simulación.

Por lo anterior, la simulación demostró:

- Conexión exitosa de los MCU-PT al router WiFi con asignación de IPs mediante DHCP. ´
- Publicación de mensajes MQTT desde los nodos sensores hacia el broker en el SBC-PT.
- Recepción de mensajes en el nodo líder (suscriptor) y en el propio broker.
- Ausencia de pérdidas de paquetes en escenarios con hasta 10 nodos y publicaciones cada 5 segundos.

Una vez completada la configuración de Mosquitto, el firewall y el script Python, el ESP8266 logró conectarse al broker sin errores. El monitor serie del Arduino IDE mostraba mensajes —Conectando al broker MQTT...conectado—, —Publicando mensaje: {"humedad": 45}— El cual podemos verlo en la figura 8:

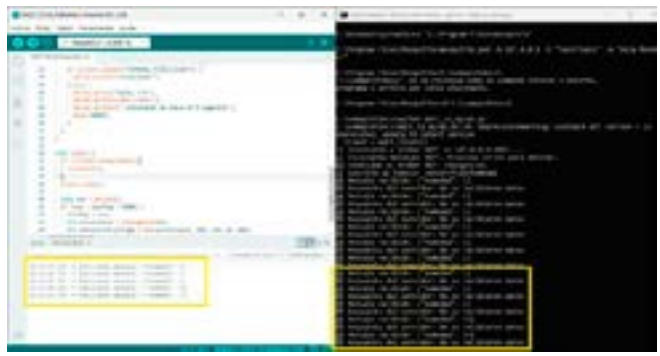


Fig. 8. Evidencia la conexión con MQTT, registrando los datos en el broker desde el sensor ESP8266 en tiempo real.

B. *Consumo Energético y Alimentación Autónoma*

Uno de los aspectos críticos para desplegar el sistema en campo real es garantizar que los nodos puedan operar de forma autónoma, sin depender de la red eléctrica convencional. El ESP8266 presenta perfiles de consumo muy distintos según su modo de operación [8]: en modo activo, mientras realiza la conexión Wi-Fi y publica datos por MQTT, puede consumir entre 70 y 170 mA; en cambio, en modo *deep sleep* —donde solo permanece activo el temporizador interno— el consumo cae por debajo de 20 µA [8]. Esta diferencia de casi 4 000 veces entre ambos modos es la clave

para diseñar nodos de larga autonomía. La Tabla II resume los tres modos relevantes y sus corrientes típicas.

TABLA II. PERFIL DE CONSUMO DEL ESP8266 NODEMCU V3

Modo de operación	Corriente típica	Descripción
Activo (TX Wi-Fi + MQTT)	70–170 mA	Conexión, lectura y publicación (~3 s/ciclo)
Modem sleep	15–20 mA	Wi-Fi apagado, CPU activa
Deep sleep (RF off)	< 20 µA	Solo RTC activo; reinicia al despertar

Tomando como referencia una batería Li-ion 18650 de 2 600 mAh (profundidad de descarga del 80 %) y una ventana activa de 3 s por ciclo a 80 mA promedio, la autonomía estimada sin recarga solar varía significativamente con el intervalo de muestreo: con muestreo cada 30 s (configuración base del proyecto) se obtienen aproximadamente 11 días; aumentando el intervalo a 5 min la autonomía sube a alrededor de 106 días, y a 10 min se acerca a los 210 días. Esto no significa que haya que sacrificar calidad de datos: la humedad del suelo en cultivos de fresa cambia lentamente en condiciones estables (escala de horas), por lo que muestras cada 5 min son suficientes para seguir la dinámica hídrica [13].

Para complementar la batería y lograr operación indefinida, se propone incorporar un panel solar de 6 V / 1 W con un controlador de carga TP4056, el cual en condiciones de 4 horas pico de sol al día puede generar aproximadamente 266 mAh/día, superando con amplitud el consumo diario del nodo en modo de muestreo cada 5 minutos (≈ 18 mAh/día).

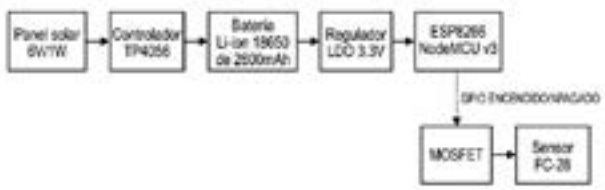


Fig. 9. Fig. 9 Diagrama de bloques del sistema de alimentación

Adicionalmente, se recomienda controlar la alimentación del sensor FC-28 mediante un transistor MOSFET conectado a un pin GPIO del ESP8266, activándolo únicamente durante los ≈ 100 ms que dura la lectura ADC; esto elimina el consumo estático del sensor durante el resto del ciclo y, como se describe en la siguiente sección, reduce la corrosión de sus electrodos.

C. *Protección Física y Robustez Ambiental de los Nodos*

El entorno de invernadero donde operará el sistema combina alta humedad relativa (frecuentemente por encima del 80 %), ciclos de riego por aspersión, exposición a radiación solar y contacto con suelo potencialmente rico en sales y fertilizantes. Estas condiciones exigen un diseño cuidadoso de la protección física de cada nodo, que va más allá del hardware electrónico y abarca el encapsulado mecánico, el sellado de conexiones y la protección específica del sensor de humedad. Sin este nivel de diseño, un nodo que funciona

Grado de protección IP. El estándar IEC 60529 define el código IP *(Ingress Protection*) mediante dos dígitos: el primero indica protección contra sólidos y el segundo contra líquidos [15]. Para el contexto del invernadero, los grados mínimos recomendados son IP65 e IP67 según la ubicación de cada componente, como resume la Tabla III.

TABLA III. COMPARACIÓN DE GRADOS IP PARA EL ENTORNO DE INVERNADERO (IEC 60529 [15])

Criterio	*IP65*	*IP67*
Protección contra polvo	Totalmente hermético (dígito 6)	Totalmente hermético (dígito 6)
Protección contra agua	Chorros de agua desde cualquier dirección	Inmersión temporal ≤ 1 m / 30 min
Escenario recomendado	Nodo líder sobre poste elevado	Nodo sensor a nivel del suelo
Material del gabinete	Policarbonato con estabilizador UV	Policarbonato con estabilizador UV

Protección del sensor FC-28. El FC-28 es un sensor resistivo que mide la humedad del suelo por la resistencia eléctrica entre sus dos electrodos metálicos. El problema práctico es que pasar corriente continua a través de electrodos sumergidos en un medio electrolítico (suelo húmedo con sales) acelera su corrosión, lo que degrada la señal con el tiempo [13]. Para mitigar esto se proponen tres medidas complementarias: (1) alimentar el sensor únicamente durante los ≈ 100 ms de la lectura ADC, controlado por GPIO como se describió en la sección anterior; (2) aplicar barniz conformado (conformal coating) sobre las pistas del PCB, dejando expuestas solo las puntas de los electrodos; y (3) utilizar electrodos recubiertos de carbono o acero inoxidable en lugar de hierro puro, cuya resistencia a la corrosión ha sido documentada en estudios comparativos de sensores de bajo costo [13]. Complementariamente, el sellado del cableado entre el sensor y el gabinete se realiza con prensaestopas (cable glands) que evitan la entrada de humedad por

capilaridad, y con conectores impermeables tipo M12 que permiten reemplazar el sensor sin abrir el gabinete principal.

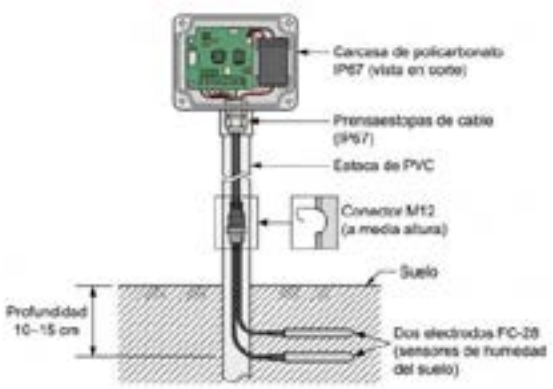


Fig. 10. *Fig. 10. Vista de* corte *del nodo instalado*

Escalabilidad hacia campo abierto. La topología híbrida estrella–árbol implementado está diseñada para crecer de forma modular. Según estudios recientes de WSN en agricultura de precisión [14], el patrón de distribución en cuadrícula con 2–3 nodos por celda es adecuado para coberturas de hasta 50 m × 50 m por clúster, lo que coincide con las dimensiones del invernadero objetivo del proyecto. Para escalar a una hectárea de campo abierto, bastaría incorporar clústeres adicionales (cada uno con su nodo líder) sin modificar la lógica MQTT ni el servidor central: se estima que la Raspberry Pi 3B+ puede atender hasta 10–15 clústeres antes de requerir un segundo nivel de agregación, lo que implica una capacidad total de 100–150 nodos sensores. Frente a las condiciones más agresivas del campo abierto (lluvia directa, variaciones térmicas mayores, ausencia de techo), los gabinetes IP67 con cubierta reflectante y soporte rígido de PVC serían el mínimo requerido, mientras que la estrategia solar de baja potencia descrita anteriormente garantizaría la autonomía energética sin necesidad de cableado eléctrico.

D. Discusión

Los resultados confirman que la arquitectura propuesta es viable y escalable. La simulación en Packet Tracer resultó fundamental para depurar la topología y las direcciones IP antes de la implementación real, reduciendo los errores de conexión. El uso de MQTT en lugar de HTTP simplificó la comunicación y redujo el overhead, alineándose con lo reportado en la literatura [12]. Cabe resaltar los desafíos identificados como la configuración del firewall y la necesidad de que Mosquitto escuche en todas las interfaces. La solución adoptada (abrir el puerto 1883 y configurar el listener en 0.0.0.0) es común en entornos de desarrollo, pero en producción se recomienda utilizar autenticación y cifrado TLS.

En cuanto a la escalabilidad del sistema, trabajos recientes sobre WSN en agricultura de precisión para cultivos de fresa confirman que la distribución espacial de nodos en cuadrícula y la separación jerárquica de responsabilidades (sensores, líderes, servidor) son factores determinantes en el rendimiento a largo plazo [14], [16]. La topología adoptada en este proyecto responde directamente a esa evidencia: al concentrar el tráfico dentro de cada clúster antes de reenviarlo a la Raspberry Pi, se evita que el broker MQTT se convierta en un cuello de botella conforme crece la red. Por otra parte, la inclusión del diseño de protección física en esta fase del proyecto no es una consideración secundaria: sin un encapsulado adecuado y una estrategia de alimentación autónoma, la viabilidad del sistema en campo queda condicionada a factores ambientales que el hardware de laboratorio no contempla. La sinergia entre optimización lógica de la red y robustez física del nodo define el camino hacia una solución verdaderamente desplegable en el sector agrícola colombiano.

VI. Conclusiones y Trabajo Futuro

A. Conclusiones

El presente trabajo demuestra la viabilidad técnica y operativa de una red de sensores inalámbricas (WSN) de bajo costo basada en IoT, diseñada específicamente para el monitoreo de humedad en cultivos de fresa. Se cumplieron integralmente los objetivos propuestos al consolidar una arquitectura de tres capas funcionales. La implementación de una topología híbrida estrella-árbol, sumada a la selección del protocolo MQTT sobre Wi-Fi, probó ser una solución altamente eficiente para entornos agrícolas; minimizando la sobrecarga de la red y garantizando un flujo de datos estable hacia el nodo central (Raspberry Pi). La validación del sistema, desde la simulación de la red hasta la implementación física con los módulos ESP8266, el sensor FC-28 y el almacenamiento persistente en MySQL, confirma que es posible desarrollar herramientas de agricultura de precisión accesibles que faciliten la toma de decisiones basada en datos.
Adicionalmente, el análisis de consumo energético demuestra que activar el modo deep sleep del ESP8266 entre ciclos de muestreo, combinado con un intervalo de 5 minutos, permite alcanzar autonomías superiores a 100 días con una batería Li-ion de 2 600 mAh [8]. Complementado con un pequeño panel solar de 1 W, el nodo puede operar indefinidamente sin conexión a la red eléctrica, lo cual es crítico para invernaderos y cultivos rurales en Colombia. Respecto a la robustez física, el uso de gabinetes con clasificación IP65/IP67 según IEC 60529 [15], barniz conformado sobre el PCB y la alimentación intermitente del sensor FC-28 por GPIO son medidas concretas y de bajo costo que extienden significativamente la vida útil del hardware en el entorno agresivo del invernadero [13].

B. Trabajos Futuros

Dado que esta implementación constituye la etapa base de un ecosistema tecnológico mayor, las futuras líneas de desarrollo se enfocan en la escalabilidad y la capacidad predictiva del sistema:

Escalabilidad de Hardware y Percepción: Transición de la capa de percepción hacia microcontroladores de mayor capacidad, como el ESP32, para integrar sensores industriales mediante el protocolo RS-485/Modbus RTU. Esto permitirá la adquisición de variables edáficas críticas adicionales, tales

como temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE) y macronutrientes (NPK).

Optimización Energética de la Red: Implementación mediante firmware del modo deep sleep en los microcontroladores de campo, con el fin de maximizar la vida útil de los nodos alimentados por baterías o paneles solares, asegurando una autonomía prolongada.

Seguridad y Accesibilidad: Robustecimiento de la capa de red mediante la adición de autenticación y cifrado TLS en el broker MQTT. Paralelamente, se proyecta el desarrollo de una aplicación móvil intuitiva para la visualización remota de indicadores y el envío de alertas tempranas a los agricultores.

Integración con Gemelo Digital Agrícola: La infraestructura de red y adquisición de datos validada en este proyecto servirá como fuente de telemetría en tiempo real para un sistema paralelo de Gemelo Digital en desarrollo. La ingesta continua de estos datos edáficos alimentará un modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales para simular el desarrollo fisiológico del fruto, evolucionando el sistema de un enfoque de monitoreo reactivo hacia un modelo de agricultura predictiva.

REFERENCES

[1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, y E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," Computer Networks, vol. 38, n.º 4, pp. 393–422, 2002. doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4

[2] E. J. Guaña Moya, "Diseño de una red de sensores inalámbricos (WSN) para monitorear parámetros relacionados con la agricultura," Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2016. [En línea]. Disponible: https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16809

[3] Universidad Privada Antenor Orrego, "Implementación de sistemas IoT para monitoreo agrícola," Tesis académica, Repositorio Institucional UPAO, Trujillo, Perú. [En línea]. Disponible: https://repositorio.upao.edu.pe/item/7b1b96c5-e96e-f7ab-e050-010a1c030756

[4] C. Gómez y J. Paradells, "Wireless home automation networks: A survey of architectures and technologies," IEEE Communications Magazine, vol. 48, n.º 6, pp. 92–101, jun. 2010. doi: 10.1109/MCOM.2010.5473869

[5] R. Khan, S. U. Khan, R. Zaheer, y S. Khan, "Future internet: The Internet of Things architecture, possible applications and key challenges," en Proc. 10th Int. Conf. Frontiers of Information Technology (FIT), Islamabad, Paquistán, 2012, pp. 257–260. doi: 10.1109/FIT.2012.53

[6] A. F. Calvo Salcedo, A. Bejarano Martínez, y A. Castillo González, "Diseño prototipo de una red de sensores inalámbricos," Visión Electrónica, vol. 12, n.º 1, pp. 43–50, ene.–jun. 2018. doi: 10.14483/22484728.13405

[7] H. M. Jawad, R. Nordin, S. K. Gharghan, A. M. Jawad, y M. Ismail, "Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review," Sensors, vol. 17, n.º 8, p. 1781, ago. 2017. doi: 10.3390/s17081781

[8] Espressif Systems, "ESP8266 Technical Reference," Espressif Systems, Shanghai, China, Versión 1.7, 2020. [En línea]. Disponible: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf

[9] N. Aakvaag y J.-E. Frey, "Redes de sensores inalámbricos: Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial," Revista ABB, n.º 2, pp. 39–42, 2006. [En línea]. Disponible: https://esdocs.com/doc/2730574/redes-de-sensores-inal%C3%A1mbricos--pdf-available-

[10] OASIS, "MQTT Version 3.1.1," OASIS Standard, 29 oct. 2014. [En línea]. Disponible: https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html

[11] A. Stanford-Clark y H. L. Truong, "MQTT for sensor networks (MQTT-SN) protocol specification," IBM, Version 1.2, nov. 2013. [En línea]. Disponible: https://www.oasis-open.org/committees/download.php/66091/MQTT-SN_spec_v1.2.pdf

[12] C. Gómez y J. Paradells, "Wireless home automation networks: A survey of architectures and technologies," IEEE Communications Magazine, vol. 48, n.º 6, pp. 92–101, jun. 2010. doi: 10.1109/MCOM.2010.5473869

[13] S. Mupikani, A. Masinde, y R. Njue, "Assessment of Low-Cost and Higher-End Soil Moisture Sensors across Various Moisture Ranges and Soil Textures," Sensors, vol. 24, n.º 19, p. 6243, sep. 2024. doi: 10.3390/s24196243. [En línea]. Disponible: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11435841/

[14] M. Adamchuk, D. Ferreira, y P. Sudduth, "Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review of NPK Sensor Implementations," Sensors, vol. 24, n.º 1, p. 51, ene. 2024. doi: 10.3390/s24010051. [En línea]. Disponible: https://www.mdpi.com/1424-8220/24/1/51

[15] Comisión Electrotécnica Internacional, "IEC 60529: Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code)," IEC Standard, Ginebra, Suiza, ed. 2.2, 2013. [En línea]. Disponible: https://webstore.iec.ch/publication/2452

[16] T. Katsigiannis, M. Misopolinos, P. Liakopoulos, y D. Liakos, "Precision Agriculture Using Soil Sensor Driven Machine Learning for Smart Strawberry Production," Sensors, vol. 23, n.º 4, p. 2247, feb. 2023. doi: 10.3390/s23042247. [En línea]. Disponible: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/4/2247

Implementación de un detector óptico de CO_2 basado en grafeno oxidado

Angela Nathalia Burbano Dorado
Programa Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
angelan.burbanod@uqvirtual.edu.co

Juan Manuel Peláez Giraldo
Programa Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
juanm.pelaezg@uqvirtual.edu.co

Diego Javier Sánchez Trujillo
Programa Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
djsanchez@uniQuindío.edu.co

Jhon Jairo Prías Barragán
Programa Tecnología en Instrumentación Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Colombia
jjprias@uniQuindío.edu.co

Resumen*—La detección de dióxido de carbono (CO_2) es importante en aplicaciones ambientales, industriales y en el monitoreo de espacios cerrados, debido a su relación con la calidad del aire y la seguridad de las personas. En este trabajo se presenta la implementación preliminar de un detector óptico de CO_2 basado en grafeno oxidado reducido (rGO), con una concentración aproximada de óxidos del 3 %. Las muestras fueron elaboradas mediante trazos sucesivos con lápiz 8B sobre sustratos aislantes y contactos eléctricos realizados con pintura de plata. Inicialmente, se realizó la caracterización eléctrica de tres muestras mediante curvas corriente-voltaje, obteniendo valores de resistencia eléctrica de 22,917 kΩ, 8,697 kΩ y 6,040 kΩ. También se evaluó la respuesta óptica de una muestra de rGO en el intervalo de 200 nm a 3000 nm, logrando observar cambios en el voltaje medido bajo incidencia de luz y en condiciones de oscuridad, y una respuesta espectral amplia, con un máximo de intensidad en 1400 nm. De manera complementaria, se caracterizó un filamento de grafito 2B de 0,7 mm de diámetro, el cual sirve como emisor de radiación infrarroja y alcanzó temperaturas por encima de 50 °C bajo polarización eléctrica, por lo que fue considerado como una fuente térmica auxiliar para el montaje. Finalmente, se realizó una prueba preliminar de detección usando una muestra de rGO de 4 cm × 4 cm con contactos eléctricos interdigitados de pintura de plata de alta pureza, ubicada dentro de una celda cilíndrica. Durante la exposición al CO_2, la resistencia eléctrica de la muestra se incrementó dos órdenes de magnitud, logrando alcanzar valores de hasta 35,35 kΩ. Estos resultados preliminares evidencian un potencial del material para ser empleado como detector de dióxido de carbono.

Palabras clave*—CO_2, detector óptico, grafeno oxidado reducido, caracterización eléctrica, caracterización óptica.

I. Introducción

La detección de dióxido de carbono es de alto interés en aplicaciones ambientales, industriales, médicas y de monitoreo en espacios cerrados, debido a su relación con la calidad del aire, el control de emisiones, la seguridad ocupacional y la prevención de riesgos en ambientes con condiciones variables de humedad, presión y temperatura [1]. Actualmente, los sensores comerciales de CO_2 se basan principalmente en tecnologías infrarrojas no dispersivas (NDIR) o en dispositivos semiconductores; sin embargo, estos sistemas pueden presentar limitaciones asociadas con el costo, el tamaño, el peso, la durabilidad y la susceptibilidad a interferencias electromagnéticas [1]. En este contexto, los sensores y detectores ópticos han adquirido interés desde el punto de vista básico y de investigación aplicada, debido a su tamaño compacto, inmunidad electromagnética, posibilidad de monitoreo remoto, integración en sistemas electrónicos y capacidad para detectar cambios asociados a la interacción entre una radiación incidente, un medio sensible y una señal eléctrica medible [1], [2].

En los últimos años, el grafeno y sus derivados oxidados, como el grafeno oxidado (GO) y el grafeno oxidado reducido (rGO), han sido ampliamente estudiados debido a sus propiedades eléctricas, ópticas, térmicas y superficiales, las cuales pueden modificarse mediante el control del grado de oxidación, al eliminar o incorporar grupos funcionales oxigenados, logrando modificar la presencia de defectos estructurales [2]–[5]. El GO se caracteriza por presentar grupos hidroxilo, epóxido, carbonilo y carboxilo distribuidos sobre la red de carbono, generando regiones con hibridación sp^2/sp^3 los cuales modifican la conductividad eléctrica, la respuesta óptica, el valor de la energía de banda prohibida y la interacción superficial con especies químicas [1], [3], [4]. De forma particular, el rGO conserva una baja cobertura de óxidos después del proceso de reducción, lo cual permite mantener grupos funcionales activos sin perder completamente las propiedades conductoras asociadas a la red hexagonal del grafeno [3], [4]. Inclusive, la baja concentración de grupos oxigenados en rGO resulta relevante para aplicaciones de sensado, ya que coberturas de óxidos del orden de 1, 3 y 4 % pueden alterar las propiedades moleculares y electrónicas del material, tales como, el potencial químico, la dureza, la distribución de carga y el comportamiento de dopaje inducido por los grupos hidroxilo y epóxido [3].

En la literatura, se ha reportado que la disminución del contenido de oxígeno en nanoplaquetas de grafeno oxidado reducido obtenidas a partir de ácido piroleñoso de bambú

Guadua angustifolia Kunth incrementa la conductividad eléctrica y permite obtener un comportamiento tipo semiconductor de banda estrecha [4], lo cual resulta útil para aplicaciones en Electrónica, optoElectrónica y dispositivos de sensado, tales como, supercapacitores, emisores infrarrojos, fotodetectores y otros dispositivos electrónicos [5]–[9]. En particular, las películas delgadas de GO obtenidas mediante procesos de pirólisis han mostrado respuesta optoElectrónica en el rango del infrarrojo medio, lo que permite considerarlas como materiales candidatos para configuraciones de fotodetección y emisión óptica [2], [5].

Desde el punto de vista de la detección de CO_2, los grupos funcionales presentes en materiales tipo GO/rGO cumplen un papel fundamental, ya que pueden interactuar con moléculas de CO_2 mediante enlaces covalentes y no covalentes, así como a través de interacciones con grupos oxigenados ricos en electrones y grupos que contienen hidrógeno en los bordes del material [1], [10]. En sensores ópticos basados en rejillas de periodo largo recubiertas con GO, se ha reportado que la adsorción de CO_2 modifica el índice de refracción de la capa sensible, altera las condiciones de propagación de la luz y produce corrimientos en el espectro de transmisión, permitiendo cuantificar variaciones de concentración del gas [1]. Estos resultados demuestran que los materiales de grafeno oxidados pueden actuar como capas sensibles para detección óptica de CO_2, especialmente cuando su superficie presenta defectos, rugosidad y grupos funcionales capaces de favorecer la adsorción molecular [1], [10]. También se han desarrollado dispositivos emisores en el infrarrojo basados en nanoplaquetas de carbón obtenidas de guadua, en los cuales la caracterización eléctrica, térmica y óptica permitió relacionar el calentamiento del dispositivo con una posible emisión IR [11]. De igual forma, se han estudiado películas de GO como material activo en configuraciones de fotodetectores infrarrojos, evaluando curvas corriente-voltaje, dependencia de la conductividad con la temperatura y respuesta frente a diferentes longitudes de onda [2]. Estos antecedentes permiten establecer una relación directa entre caracterización eléctrica, respuesta óptica, comportamiento térmico y aplicaciones de detección, lo cual resulta pertinente para el desarrollo de un detector óptico de CO_2 basado en rGO [1], [2], [5], [11].

Sin embargo, aunque se han reportado avances importantes en sensores ópticos de CO_2 basados en GO, fotodetectores infrarrojos y materiales derivados de grafeno oxidado, aún resulta pertinente explorar configuraciones experimentales funcionales de bajo costo que permitan evaluar la respuesta de materiales tipo rGO frente a CO_2 [1]–[5], [11]. Por lo anterior, en este trabajo se presenta la implementación de un detector óptico de CO_2 basado en grafeno oxidado reducido, con una concentración de óxidos aproximada del 3 %, condición que puede favorecer una respuesta eléctrica y óptica sensible a cambios externos [3], [4]. Para ello, se emplearon muestras de rGO elaboradas mediante trazos de lápiz 8B y contactadas con pintura de plata de alta pureza. El estudio consideró la caracterización eléctrica mediante curvas corriente-voltaje, la caracterización óptica del material en un amplio rango espectral del UV-Vis-IR cercano, la caracterización termográfica de un filamento empleado como fuente de radiación térmica y una prueba preliminar de detección de CO_2 en una celda experimental, buscando evaluar la respuesta inicial del sistema propuesto y establecer su viabilidad como alternativa compacta, económica y de bajo costo para aplicaciones de monitoreo ambiental.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Preparación de las muestras

Para el desarrollo experimental se prepararon diferentes muestras basadas en grafeno oxidado reducido (rGO), con una concentración aproximada de óxidos del 3 %. Las muestras fueron elaboradas manualmente mediante trazos sucesivos con lápiz 8B sobre sustratos aislantes, formando una película sobre un sustrato de papel. Posteriormente, se depositaron contactos eléctricos empleando pintura de plata de alta pureza, buscando garantizar la conexión entre la película de rGO y los terminales de medición.

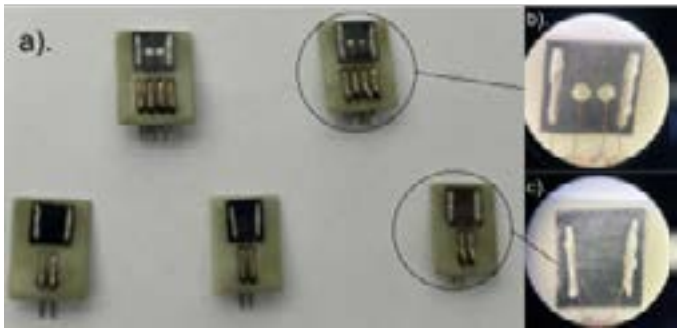


Fig. 1. Muestras de rGO elaboradas sobre sustratos aislantes mediante trazos de lápiz 8B y contactos eléctricos con pintura de plata: a) conjunto de muestras fabricadas; b) muestra con configuración de cuatro contactos empleada para caracterización corriente-voltaje; c) muestra con configuración de dos contactos empleada para caracterización óptica. Fuente propia

Para la caracterización corriente-voltaje se utilizó una muestra de aproximadamente 1 cm^2 con una configuración de cuatro contactos colineales, tal como se observa en la Fig. 1 b). En esta muestra se dispusieron dos caminos laterales de pintura de plata para la inyección de corriente y dos puntos centrales para la medición de voltaje. Esta distribución permitió realizar la medición eléctrica mediante la técnica de cuatro puntas, reduciendo la influencia de la resistencia de contacto sobre los datos obtenidos. Por otra parte, para la caracterización óptica se empleó una muestra del mismo tamaño, pero con la deposición de dos contactos eléctricos laterales lineales de pintura de plata, como se presenta en la Fig. 1 c). Esta configuración permitió medir el voltaje generado entre los contactos de la muestra al hacer incidir radiación de diferentes longitudes de onda.

Además de las muestras empleadas para las caracterizaciones eléctrica y óptica, se preparó una muestra de rGO de aproximadamente 4 cm^2 destinada a la prueba preliminar de detección de CO_2. Esta muestra fue elaborada mediante trazos sucesivos con lápiz 8B y posteriormente se configuraron caminos interdigitados empleando pintura de plata, con el fin de aumentar el área efectiva de interacción entre el material sensible y el ambiente de medición. Esta geometría fue seleccionada para favorecer la variación de la resistencia eléctrica de la muestra ante cambios en las condiciones del gas dentro de la celda experimental.

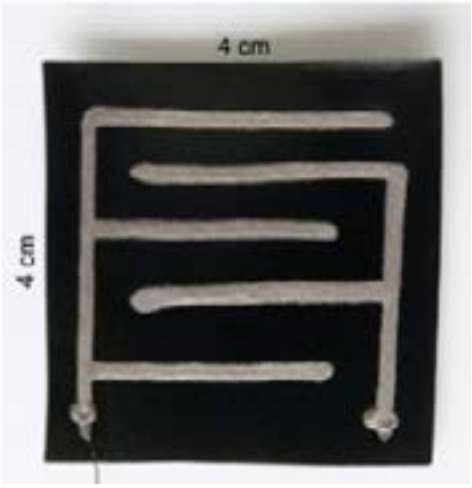


Fig. 2. Muestra de rGO de 4 cm^2 con caminos interdigitados de pintura de plata, empleada como detector en la prueba preliminar de CO_2. Fuente propia

B. Caracterización eléctrica

La caracterización eléctrica de las muestras de rGO se realizó mediante la obtención de curvas corriente-voltaje (I-V), empleando una configuración de cuatro puntas. En este procedimiento, la corriente se aplicó a través de los contactos externos de la muestra, mientras que la diferencia de potencial se registró mediante los contactos internos. Para la inyección de corriente se utilizó una fuente de corriente de precisión Keithley 6220 variando el valor entre -30 mA y 30 mA, mientras que el voltaje generado en la muestra fue medido empleando un nanovoltímetro Keithley 2182A. El proceso de adquisición de datos se realizó mediante un software desarrollado en el entorno LabVIEW, el cual permitió automatizar el barrido de corriente, registrar la respuesta eléctrica en tiempo real y construir las curvas características I-V de cada muestra.

C. Caracterización óptica

La caracterización óptica se realizó con el propósito de evaluar la respuesta espectral de la muestra de rGO frente a radiación incidente en un amplio rango de longitudes de onda, variando desde 200 hasta 3000 nm. Para esta medición se empleó la muestra de 1 cm^2 con dos contactos eléctricos, previamente descrita en la Fig. 1 c). El montaje experimental utilizado se observa en la Fig. 3. Se consideró una lámpara QTH (carcasa en cuarzo, filamento de tungsteno y gas halógeno) utilizada como fuente de luz blanca, un monocromador Triax 320 de Horiba, el cual contiene un arreglo óptico de espejos y rejillas de difracción para la separación del haz monocromático. Este haz de luz fue dirigido sobre el área activa de la muestra de rGO, mientras se registró el voltaje en corriente continua generado entre sus contactos eléctricos, de tal forma que se lograron determinar los cambios en la respuesta óptica del rGO en función de la longitud de onda incidente.

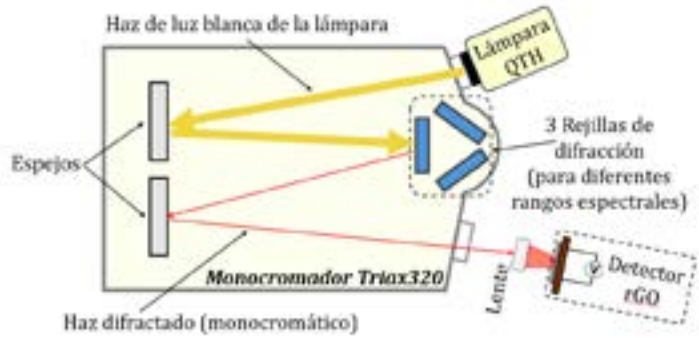


Fig. 3. Esquema del montaje experimental utilizado para determinar la respuesta espectral de la muestra de rGO empleando un monocromador Triax 320. Fuente propia

D. Caracterización termográfica del filamento

La caracterización termográfica se realizó con el propósito de evaluar el comportamiento térmico del filamento empleado como fuente de radiación en el sistema de detección. Para esta etapa se utilizó una mina de grafito 2B de 0,7 mm, la cual fue conectada eléctricamente mediante puntas de prueba a una fuente de alimentación, tal como se observa en la Fig. 4.



Fig. 4. Montaje experimental utilizado para la polarización del filamento de grafito 2B de 0,7 mm. Fuente propia

Durante el procedimiento, el filamento fue polarizado aplicando un voltaje variable desde 0 V hasta 0,88 V, logrando registrar la corriente eléctrica, la temperatura y la resistencia calculada por ley de Ohm. La temperatura superficial del

filamento fue monitoreada mediante una cámara termográfica FLIR, con el fin de observar la distribución térmica e identificar la emisión de radiación infrarroja. Esta caracterización permitió establecer las condiciones iniciales de operación del filamento y verificar su capacidad para actuar como fuente térmica dentro del montaje experimental. De esta manera, el filamento se consideró como un elemento auxiliar para generar radiación térmica incidente en la configuración de detección basada en rGO.

E. Prueba preliminar de detección de CO_2

La prueba preliminar de detección de CO_2 se realizó empleando la muestra de rGO de 4 cm^2 con caminos interdigitados de pintura de plata como elemento sensible. Para esta etapa se diseñó una celda experimental de geometría cilíndrica fabricada con impresión 3D, dentro de la cual se ubicó la muestra con el propósito de evaluar variaciones en su resistencia eléctrica ante cambios con ambiente de CO_2. La celda cilíndrica fue utilizada como cámara de medición para alojar la muestra y permitir la exposición del material sensible a diferentes condiciones asociadas con la presencia del gas. La resistencia eléctrica de la muestra fue medida mediante un multímetro digital conectado a los contactos eléctricos del detector. En la Fig. 5 a) se observa la celda experimental empleada para la prueba y en la Fig. 5 b) se presenta la conexión utilizada para la medición de resistencia.

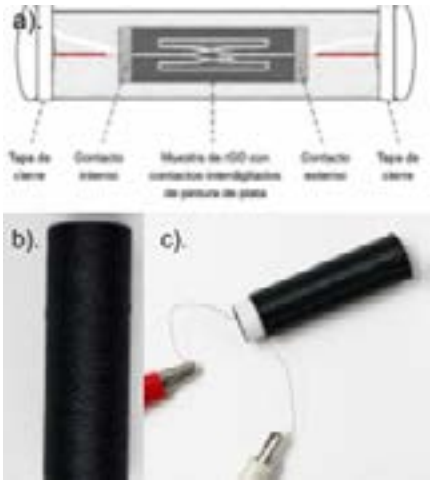


Fig. 5. Celda experimental y conexión eléctrica empleadas para la prueba preliminar de detección de CO_2: a) celda cilíndrica utilizada para alojar la muestra de rGO; b) conexión del detector de rGO al multímetro para la medición de resistencia durante la exposición al gas. Fuente propia

Se realizaron dos pruebas exploratorias. En la primera, se introdujo CO_2 proveniente de exhalación dentro de la celda mediante respiración directa, realizando cinco ciclos de inhalación y exhalación hacia el interior del cilindro. Esta condición permitió evaluar la respuesta de la muestra ante una atmósfera enriquecida con CO_2. En la segunda prueba, se generó CO_2 mediante la reacción química entre vinagre y bicarbonato de sodio. Después de la reacción, se retiró la fase líquida y se dejó acumular el gas producido, el cual fue transferido posteriormente hacia la celda cilíndrica para evaluar la variación de resistencia del detector. Esta prueba se consideró preliminar, debido a que no se emplearon concentraciones calibradas de CO_2. Por tanto, la medición no permite determinar una concentración absoluta del gas, sino observar los cambios en la respuesta eléctrica inicial del detector ante condiciones enriquecidas con CO_2.

III. Resultados y discusión

A. Respuesta eléctrica de las muestras de rGO

La Fig. 6 presenta las curvas corriente-voltaje obtenidas para tres muestras de rGO, identificadas como JN2, JN3 y JN4. Este tipo de caracterización permitió identificar un comportamiento eléctrico lineal del material, tal como era de esperarse para muestras de rGO que tienen baja concentración de óxidos [2], [4], [12], [13]. A partir de la pendiente de cada curva I–V se determinaron los valores de resistencia eléctrica de las muestras. Para JN2 se obtuvo una resistencia de 22,917 kΩ, mientras que para JN3 y JN4 se obtuvieron valores de 8,697 kΩ y 6,040 kΩ, respectivamente. Estas diferencias evidencian variaciones en la respuesta eléctrica de las muestras, las cuales pueden estar asociadas con el proceso de fabricación y deposición de contactos eléctricos, sin embargo, estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura para materiales basados en GO/rGO, en los cuales la conductividad eléctrica puede verse influenciada por el contenido de oxígeno, la presencia de defectos, el espesor de la película y la calidad de los contactos eléctricos [4], [12], [13]. Este resultado es relevante porque la respuesta eléctrica inicial del material permite evaluar su posible uso dentro de una configuración de detección óptica, en la cual los cambios inducidos por la radiación incidente o por la interacción con el ambiente de medición pueden reflejarse como variaciones en la señal eléctrica registrada dentro de un rango lineal [2], [11].

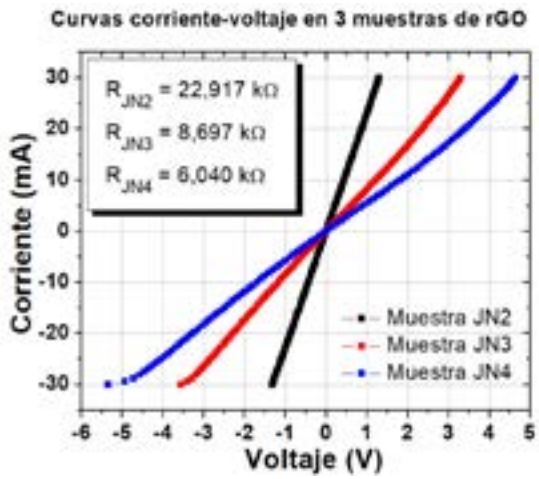


Fig. 6. Curvas corriente-voltaje obtenidas para las muestras de rGO JN2, JN3 y JN4. Fuente propia

B. Respuesta óptica de la muestra de rGO

La Fig. 7 presenta la respuesta óptica obtenida para la muestra de rGO en el intervalo espectral comprendido entre 200 nm y 3000 nm. En este experimento se determinó el voltaje registrado bajo incidencia de luz y el voltaje medido en condiciones de oscuridad, con el propósito de identificar posibles variaciones de la señal eléctrica asociadas a la radiación incidente sobre el material. Al comparar ambas curvas, se logró observar que la muestra presenta una variación de voltaje dependiente de la longitud de onda incidente en un amplio rango del espectro óptico, con un máximo de intensidad en 1400 nm.



Fig. 7. Respuesta óptica de la muestra de rGO determinada desde 200 nm hasta 3000 nm bajo incidencia de luz y en condiciones de oscuridad. Fuente propia.

Esta diferencia entre la respuesta bajo iluminación y la respuesta en oscuridad sugiere que la radiación incidente modifica la dinámica electrónica del rGO mediante procesos de absorción de fotones. Cuando la energía de los fotones incidentes es suficiente, se inducen transiciones electrónicas entre estados energéticos disponibles del material, promoviendo electrones hacia estados de mayor energía en los orbitales LUMO y dejando las vacancias correspondientes en los niveles HOMO. Como consecuencia, se genera un incremento en la densidad de portadores de carga fotoinducidos y una redistribución de las poblaciones Electrónicas dentro de la red del rGO, lo cual altera parámetros eléctricos como la conductividad y el potencial medido entre los contactos [25]. En materiales como el rGO, caracterizados por dominios grafíticos, defectos estructurales y grupos funcionales residuales, estos procesos pueden involucrar tanto excitaciones electrónicas directas como mecanismos asociados a estados localizados y trampas energéticas distribuidas en la estructura del material [26] [27]. Este comportamiento es relevante para el detector propuesto, ya que permite relacionar la respuesta óptica del material con una señal eléctrica susceptible de ser registrada y analizada experimentalmente. La respuesta obtenida también permite establecer un punto de referencia para la integración posterior del material dentro de una configuración de detección óptica de CO_2. En este sentido, la caracterización óptica no se interpreta como una calibración completa del detector, sino como una etapa preliminar que permite verificar la sensibilidad espectral de la muestra y su posible aplicación como material activo en un sistema de detección basado en rGO. Este resultado se encuentra en concordancia con estudios previos donde películas y estructuras basadas en GO/rGO han mostrado respuestas optoElectrónicas útiles para configuraciones de fotodetección y sensores ópticos [1], [2], [5].

C. Respuesta termográfica del filamento

La Fig. 8 presenta la imagen termográfica obtenida durante la polarización del filamento de grafito 2B de 0,7 mm. En la imagen se observa una zona de mayor temperatura localizada a lo largo del filamento, lo cual evidencia la emisión de radiación térmica al aplicar una diferencia de potencial entre sus extremos. Para el valor máximo de polarización evaluado, correspondiente a 0,88 V, la cámara termográfica registró una temperatura cercana de 50,6 °C.

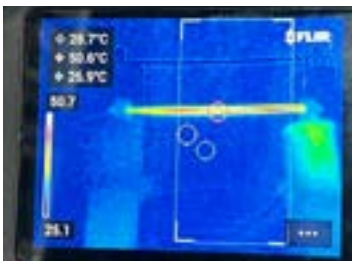


Fig. 8. Imagen termográfica del filamento de grafito polarizado, con temperatura máxima cercana a 50 °C. Fuente propia

La relación entre el voltaje aplicado y la corriente medida en el filamento se presenta en la Fig. 9. Se observa un incremento progresivo de la corriente conforme aumenta el voltaje, lo cual indica una respuesta eléctrica lineal del filamento bajo polarización.

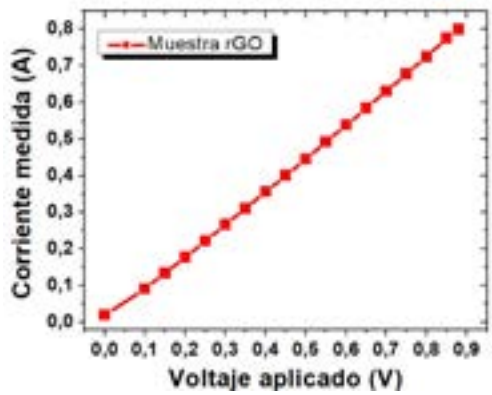


Fig. 9. Corriente medida en función del voltaje aplicado para el filamento de grafito 2B de 0,7 mm. Fuente propia.

Asimismo, en la Fig. 10 se presenta la relación entre el voltaje aplicado y la temperatura medida en el filamento, lográndose observar el aumento de la temperatura cuando se incrementa el voltaje, tal como era de esperarse, debido al efecto Joule en el material. Aunque se presentan pequeñas fluctuaciones intermedias, la tendencia general evidencia que el filamento responde térmicamente al incremento de la polarización eléctrica, sin llegar a deteriorarse. Este filamento se ubica dentro de la celda experimental de la Figura 5.

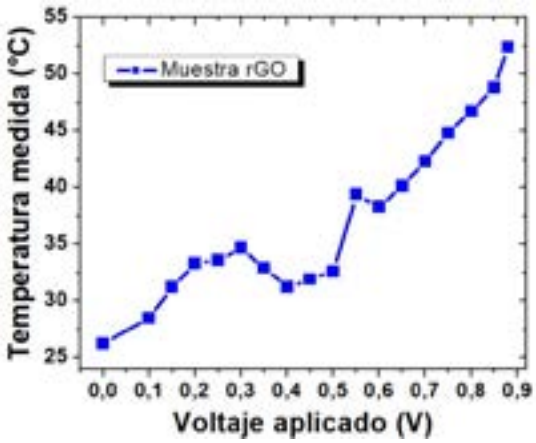


Fig. 10. Temperatura medida en función del voltaje aplicado para el filamento de grafito 2B de 0,7 mm. Fuente propia.

D. Respuesta preliminar frente a CO_2

La respuesta del detector se evaluó a partir del cambio de resistencia eléctrica de la muestra de rGO al ser expuesta a ambientes enriquecidos con CO_2. Este comportamiento se relaciona con el principio de operación de sensores resistivos basados en grafeno y sus derivados, en los cuales la adsorción de moléculas gaseosas sobre la superficie sensible puede modificar las propiedades eléctricas del material, principalmente por cambios en la densidad de portadores de carga, en los caminos de conducción y en las barreras locales de transporte electrónico [15], [16]. En el caso del grafeno oxidado de baja concentración, la presencia de defectos estructurales, vacancias, regiones amorfas y grupos funcionales oxigenados residuales genera sitios activos energéticamente favorables para la adsorción de moléculas del gas. Cuando las moléculas de CO_2 interactúan con la superficie del rGO, se producen perturbaciones locales en la distribución electrónica del material, asociadas a procesos de transferencia parcial de carga y a modificaciones del potencial electrostático en las regiones conductoras y entre dominios grafíticos vecinos. Estas interacciones afectan la movilidad y concentración efectiva de portadores, así como los procesos de salto electrónico y el transporte a través de barreras locales generadas por defectos y regiones oxidadas. Como consecuencia, la conductividad global de la película se modifica y dicha variación puede registrarse experimentalmente como un cambio medible de resistencia eléctrica favorece la interacción superficial con moléculas de gas, lo cual permite que una variación en el ambiente gaseoso se refleje como un cambio medible de resistencia [1], [15], [16] [28].

En la primera prueba, realizada mediante aire exhalado dentro de la celda experimental, la resistencia de la muestra cambió desde 38,4 Ω hasta 3374 Ω. Esta variación evidenció que el material respondió eléctricamente al cambio del ambiente interno de la celda. Aunque el aire exhalado no corresponde a CO_2 puro, sí representa una atmósfera enriquecida con este gas, además de contener humedad y una temperatura diferente a la del ambiente, por lo cual, resultó válida como parte de estos primeros experimentos.

En la segunda prueba, realizada con CO_2 generado mediante la reacción entre vinagre y bicarbonato de sodio, la variación de resistencia fue mayor, tal como se observa en las imágenes de la Fig. 11. En esta ocasión, el detector varió su resistencia eléctrica desde 39,4 Ω hasta 35,35 kΩ. El aumento de este parámetro en un orden de magnitud adicional, al generar CO_2 mediante esta reacción química, indica una interacción más marcada entre el gas y la superficie activa del rGO, lo cual podría asociarse con la adsorción de moléculas de CO_2 sobre defectos y grupos funcionales del material, alterando el transporte de carga en la película [1], [15], [16].

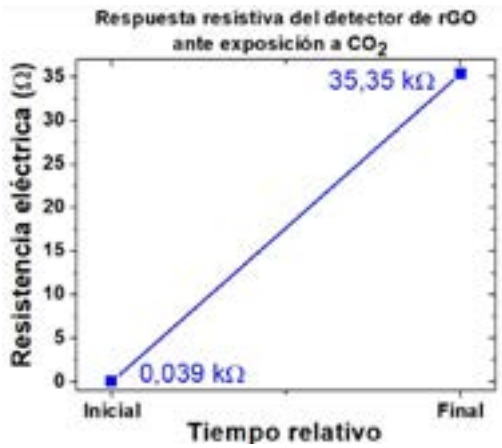


Fig. 11. Valor mínimo y máximo de resistencia registrado durante la exposición del detector a CO_2 generado por reacción entre vinagre y bicarbonato de sodio. Fuente propia.

La diferencia observada entre la prueba con aire exhalado y la prueba con CO_2 generado químicamente permite destacar que el detector presentó una respuesta más intensa en una atmósfera con mayor presencia de CO_2. Este resultado es importante porque evidencia que la muestra de rGO no permaneció eléctricamente invariable, sino que su resistencia cambió de forma apreciable ante la presencia del gas. Para una etapa posterior, esta respuesta puede relacionarse cuantitativamente con la concentración del gas mediante una curva de calibración construida a partir de concentraciones conocidas. Sin embargo, en estos primeros experimentos, el cambio resistivo observado confirma que el material presenta

una señal eléctrica medible ante la presencia de CO_2, lo cual constituye el resultado central de la prueba de detección, especialmente pensando en el desarrollo de dispositivos de detección a partir de rGO.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó de manera preliminar un detector óptico de CO_2 basado en películas de grafeno oxidado reducido, y se realizó la caracterización eléctrica, óptica, la evaluación termográfica de un filamento de grafito y una prueba inicial de detección en una celda experimental. Las curvas corriente-voltaje permitieron verificar la respuesta lineal de las muestras de rGO y calcular los valores de resistencia en las diferentes configuraciones fabricadas. Asimismo, la respuesta óptica entre 200 nm y 3000 nm fue de banda ancha con un máximo en 1400 nm, evidenciando cambios de voltaje dependientes de la longitud de onda incidente, lo cual confirma la interacción del material con la radiación óptica. La caracterización termográfica mostró que el filamento de grafito 2B puede actuar como fuente térmica auxiliar, alcanzando temperaturas de hasta 50,6 °C bajo polarización eléctrica. Finalmente, la prueba preliminar de detección mostró una variación significativa de la resistencia eléctrica del detector ante ambientes enriquecidos con CO_2, pasando de valores de 38 Ω hasta aproximadamente 35 kΩ, especialmente cuando se empleó CO_2 generado mediante la reacción entre vinagre y bicarbonato de sodio. Estos resultados permiten establecer que el rGO presenta una respuesta eléctrica medible ante la presencia de CO_2, lo cual constituye un primer indicio de viabilidad para su uso en configuraciones de detección óptica. Como trabajo futuro, se requiere realizar una calibración con concentraciones conocidas de CO_2, evaluar repetibilidad, estabilidad y selectividad, y optimizar la geometría del detector para mejorar su respuesta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado y desarrollado en su totalidad en la Universidad del Quindío especialmente en el instituto interdisciplinario de las ciencias.

REFERENCIAS

[1] A. C. P. Fernandes, N. C. Vicentini, M. S. Couto, G. R. Carvalho, B. Fragneaud, C. Legnani, I. O. Maciel, R. L. Faraco Filho, H. J. Kalinowski, and W. G. Quirino, "High-Sensitivity CO_2 Sensor Based on a Graphene Oxide Coated Long-Period Fiber Grating," *ACS Omega*, vol. 10, no. 22, pp. 22874–22883, 2025, doi: 10.1021/acsomega.5c00184.

[2] D. J. Sánchez-Trujillo, L. V. Osorio-Maldonado, and J. J. Prías-Barragán, "Temperature dependence of electrical conductivity and variable hopping range mechanism on graphene oxide films," *Scientific Reports*, vol. 13, Art. no. 4810, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-31778-3.

[3] E. Valencia Gómez, N. A. Ramírez Guarnizo, J. D. Perea, A. Sánchez López, and J. J. Prías-Barragán, "Exploring Molecular and Electronic Property Predictions of Reduced Graphene Oxide Nanoflakes via Density Functional Theory," *ACS Omega*, vol. 7, pp. 3872–3880, 2022, doi: 10.21203/rs.3.rs-2362682/v1.

[4] K. Gross, J. J. Prías-Barragán, S. Sangiao, J. M. De Teresa, L. Lajaunie, R. Arenal, H. Ariza-Calderón, and P. Prieto, "Electrical conductivity of oxidized-graphenic nanoplatelets obtained from bamboo: effect of the oxygen content," *Nanotechnology*, vol. 27, no. 36, Art. no. 365708, 2016, doi: 10.1088/0957-4484/27/36/365708.

[5] J. J. Prías Barragán, K. Gross, J. D. Perea, N. Killilea, W. Heiss, C. J. Brabec, H. Ariza Calderón, and P. Prieto, "Graphene Oxide Thin Films: Synthesis and Optical Characterization," *ChemistrySelect*, vol. 5, pp. 11737–11744, 2020, doi: 10.1002/slct.202002481.

[6] J. J. Prías-Barragán, K. Gross, H. Ariza-Calderón, and P. Prieto, "Synthesis and vibrational response of graphite oxide platelets from bamboo for electronic applications," *Physica Status Solidi A*, vol. 213, no. 1, pp. 85–90, 2016, doi: 10.1002/pssa.201532433.

[7] J. J. Prías-Barragán, K. Gross, H. Ariza-Calderón, and P. Prieto, "Graphene Oxide Multilayers Obtained from Bamboo: New Synthesis Method, Basic Properties, and Future Electronic Applications," in *Handbook of Graphene*, vol. 8, S. W. Harun, Ed. Beverly, MA, USA: Scrivener Publishing, 2019, pp. 193–238.

[8] J. J. Prías-Barragán, K. Gross, H. Ariza-Calderón, and P. Prieto, "Graphene oxide multilayers: Synthesis, properties and possible applications in electronics," in *2019 Latin American Electron Devices Conference* (LAEDC), 2019, pp. 61–64.

[9] J. J. Prías-Barragán, N. A. Echeverry-Montoya, and H. Ariza-Calderón, "Fabricación y caracterización de carbón activado y de nanoplaquetas de carbón a partir de *Guadua angustifolia Kunth* para aplicaciones en Electrónica," *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 39, no. 153, pp. 444–449, 2015, doi: 10.18257/raccefyn.139.

[10] J. J. Prías-Barragán, R. González-Hernández, F. A. Hoyos-Ariza, J. G. Ramírez, M. R. Ibarra, and P. Prieto, "Magnetism in graphene oxide nanoplatelets: The role of hydroxyl and epoxy bridges," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 541, Art. no. 168506, 2022, doi: 10.1016/j.jmmm.2021.168506.

[11] L. J. Quintero-Rodríguez, J. J. Prías-Barragán, N. A. Echeverry-Montoya, and H. Ariza-Calderón, "Construcción y caracterización de un dispositivo emisor en el infrarrojo basado en nanoplaquetas de carbón de *Guadua angustifolia Kunth*," *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, vol. 25, no. 1, pp. 80–87, 2014, doi: 10.33975/riuq.vol25n1.157.

[12] C. Gómez-Navarro, R. T. Weitz, A. M. Bittner, M. Scolari, A. Mews, M. Burghard, and K. Kern, "Electronic Transport Properties of Individual Chemically Reduced Graphene Oxide Sheets," *Nano Letters*, vol. 7, no. 11, pp. 3499–3503, 2007, doi: 10.1021/nl072090c.

[13] G. G. Politano and C. Versace, "Electrical and Optical Characterization of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide Thin Films," *Crystals*, vol. 12, no. 9, Art. no. 1312, 2022, doi: 10.3390/cryst12091312.

[14] A. Ambrosi, C. K. Chua, A. Bonanni, and M. Pumera, "Electrochemistry of Graphene and Related Materials," *Chemical Reviews*, vol. 114, no. 14, pp. 7150–7188, 2014, doi: 10.1021/cr500023c.

[15] M. N. Norizan, N. Abdullah, N. A. Halim, S. Z. N. Demon, and I. S. Mohamad, "Heterojunctions of rGO/Metal Oxide Nanocomposites as Promising Gas-Sensing Materials—A Review," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 13, Art. no. 2278, 2022, doi: 10.3390/nano12132278.

[16] A. Chakraborthy, S. Nuthalapati, A. Nag, N. Afsarimanesh, M. E. E. Alahi, and M. E. Altinsoy, "A Critical Review of the Use of Graphene-Based Gas Sensors," *Chemosensors*, vol. 10, no. 9, Art. no. 355, 2022, doi: 10.3390/chemosensors10090355.

[17] N. Mushahary, A. Sarkar, F. Basumatary, S. Brahma, B. Das, and S. Basumatary, "Recent developments on graphene oxide and its composite materials: From fundamentals to applications in biodiesel synthesis, adsorption, photocatalysis, supercapacitors, sensors and antimicrobial activity," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 15, Art. no. 100225, 2024, doi: 10.1016/j.rsurfi.2024.100225.

[18] J. Wu, H. Lin, D. J. Moss, K. P. Loh, and B. Jia, "Graphene oxide for photonics, electronics and optoelectronics," *Nature Reviews Chemistry*, vol. 7, no. 3, pp. 162–183, 2023, doi: 10.1038/s41570-022-00458-7.

[19] A. Razaq, F. Bibi, X. Zheng, R. Papadakis, S. H. M. Jafri, and H. Li, "Review on Graphene-, Graphene Oxide-, Reduced Graphene Oxide-Based Flexible Composites: From Fabrication to Applications," *Materials*, vol. 15, no. 3, Art. no. 1012, 2022, doi: 10.3390/ma15031012.

[20] V. Georgakilas, J. N. Tiwari, K. C. Kemp, J. A. Perman, A. B. Bourlinos, K. S. Kim, and R. Zbořil, "Noncovalent Functionalization of Graphene and Graphene Oxide for Energy Materials, Biosensing, Catalytic, and Biomedical Applications," *Chemical Reviews*, vol. 116, no. 9, pp. 5464–5519, 2016, doi: 10.1021/acs.chemrev.5b00620.

[21] W. Yu, L. Sisi, Y. Haiyan, and L. Jie, "Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide: A review," *RSC Advances*, vol. 10, no. 26, pp. 15328–15345, 2020, doi: 10.1039/D0RA01068E.
[22] Y. Wang, Z. Li, J. Wang, J. Li, and Y. Lin, "Graphene and graphene oxide: Biofunctionalization and applications in biotechnology," *Trends in Biotechnology*, vol. 29, no. 5, pp. 205–212, 2011, doi: 10.1016/j.tibtech.2011.01.008.
[23] X. Huang, X. Qi, F. Boey, and H. Zhang, "Graphene-based composites," *Chemical Society Reviews*, vol. 41, no. 2, pp. 666–686, 2012, doi: 10.1039/C1CS15078B.
[24] J.-B. Wu, M.-L. Lin, X. Cong, H.-N. Liu, and P.-H. Tan, "Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices," *Chemical Society Reviews*, vol. 47, pp. 1822–1873, 2018, doi: 10.1039/C6CS00915H.
[25] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, and A. C. Ferrari, "Graphene photonics and optoelectronics," *Nature Photonics*, vol. 4, no. 9, pp. 611–622, Sep. 2010, doi: 10.1038/nphoton.2010.186.
[26] D. R. Dreyer, S. Park, C. W. Bielawski, and R. S. Ruoff, "The chemistry of graphene oxide," *Chemical Society Reviews*, vol. 39, no. 1, pp. 228–240, 2010, doi: 10.1039/B917103G.
[27] G. Eda, G. Fanchini, and M. Chhowalla, "Large-area ultrathin films of reduced graphene oxide as a transparent and flexible electronic material," *Nature Nanotechnology*, vol. 3, no. 5, pp. 270–274, May 2008, doi: 10.1038/nnano.2008.83.
[28] J. T. Robinson, F. K. Perkins, E. S. Snow, Z. Wei, and P. E. Sheehan, "Reduced graphene oxide molecular sensors," *Nano Letters*, vol. 8, no. 10, pp. 3137–3140, Oct. 2008, doi: 10.1021/nl8013007.

Sistema Inteligente de Evaluación Psicopedagógica Basado en Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático para la Detección Temprana de Trastornos del Aprendizaje en Educación Inicial

1st Maria Hernández Rivera
Programa Tecnología en Gestión de Sistemas Informáticos
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
mluciahernandez@unibarranquilla.edu.co

2nd Fidel Sánchez Rodriguez
Programa Tecnología en Gestión de Sistemas Informáticos
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
festebansanchez@unibarranquilla.edu.co

3rd Bryan Fernández Ebrath
Programa Ingeniería Telemática
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
bjfernandez@unibarranquilla.edu.co

4rd Lourdes De Avila Gutiérrez
Programa de Ingeniería Telemática
Institución Universitaria de Barranquilla
Barranquilla, Colombia
ldeavila@unibarranquilla.edu.co

***Abstract*—Este artículo presenta el diseño y desarrollo de un prototipo funcional de un sistema inteligente orientado a la evaluación psicopedagógica en educación inicial, con un enfoque específico en la detección temprana de indicadores asociados a la dislexia, disgrafía y el trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH). La arquitectura tecnológica propuesta integra un ecosistema web desarrollado con los frameworks Angular y FastAPI, el cual permite la gestión de datos escalable en la nube. El núcleo del sistema emplea el algoritmo de aprendizaje supervisado Bosque Aleatorio (Random Forest) para el análisis técnico de patrones grafomotrices en muestras de escritura digitalizadas, permitiendo identificar rasgos de disgrafía de manera objetiva.**

Los resultados preliminares obtenidos en la fase de prototipado demuestran la viabilidad técnica de la plataforma para automatizar procesos de diagnóstico que tradicionalmente se ejecutan de forma manual y subjetiva. Asimismo, el sistema incorpora un módulo de inteligencia artificial para la generación de recomendaciones pedagógicas personalizadas, facilitando la intervención oportuna de docentes y especialistas. Esta implementación busca mitigar el impacto académico y socioemocional de los trastornos del aprendizaje en el contexto educativo del Caribe colombiano, proporcionando herramientas basadas en evidencia científica para el apoyo al desarrollo infantil.

***Keywords*—Aprendizaje automático, disgrafía, dislexia, educación inicial, inteligencia artificial, psicopedagogía, Random Forest, TDAH.**

I. INTRODUCION

El uso de tecnologías digitales ha comenzado a desempeñar un papel fundamental en la educación contemporánea, especialmente en el desarrollo de herramientas que optimizan los procesos de enseñanza, aprendizaje y evaluación. En este contexto, la aplicación de la inteligencia artificial (IA) permite procesar grandes volúmenes de datos e identificar patrones de comportamiento sutiles [1], lo que facilita el desarrollo de sistemas capaces de mejorar la toma de decisiones pedagógicas basadas en evidencia. El presente proyecto se enmarca en esta tendencia global, buscando ofrecer una solución tecnológica robusta ante los desafíos del diagnóstico educativo temprano en el nivel inicial.

La motivación principal de esta investigación reside en la importancia crítica de los primeros años de escolaridad. Las habilidades de lectura, escritura y atención son pilares fundamentales que los estudiantes desarrollan en esta etapa y constituyen la base de su éxito académico y socioemocional futuro. No obstante, la evidencia científica indica que trastornos como la dislexia, la disgrafía y el trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH) pueden interferir significativamente en el rendimiento escolar si no se detectan de manera oportuna [2][3]. Actualmente, la identificación de estas dificultades en los entornos educativos del Caribe colombiano depende mayoritariamente de la observación directa y subjetiva de los docentes o de evaluaciones psicopedagógicas tradicionales. Estos procesos, aunque valiosos, a menudo se ven limitados por la falta de herramientas tecnológicas que permitan un análisis sistemático, automatizado y objetivo de la información.

Desde esta perspectiva, se propone el desarrollo de un sistema inteligente de evaluación psicopedagógica. El objetivo general de esta investigación es desarrollar una plataforma web basada en inteligencia artificial que apoye la detección temprana de indicadores asociados a la dislexia, TDAH y disgrafía en estudiantes de educación inicial. Para alcanzar esta meta, se han definido cuatro pilares u objetivos específicos: en primer lugar, el diseño de una plataforma web accesible que permita a los docentes la aplicación de pruebas psicopedagógicas digitales; segundo, la implementación de un modelo de aprendizaje

automático basado en el algoritmo de Bosque Aleatorio (Random Forest) para el análisis técnico de muestras de escritura y **grafomotricidad (coordinación manual en el trazo)**; tercero, la integración de un módulo de generación de recomendaciones pedagógicas personalizadas mediante modelos de lenguaje; y finalmente, el desarrollo de un sistema de visualización de resultados orientado a facilitar la interpretación de datos por parte de psicólogos y especialistas.

De esta manera, el proyecto no solo ofrece una solución técnica innovadora basada en el framework Angular y modelos de aprendizaje supervisado, sino que también contribuye a la creación de procesos educativos más inclusivos. Al proporcionar a las instituciones herramientas de intervención temprana, se busca reducir la brecha en el diagnóstico y mejorar la calidad de vida de los estudiantes.

El presente artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la Sección II se detalla los casos de uso los actores involucrados en el sistema y proceso del sistema; en la Sección III se detalla la metodología empleada, el procedimiento reproducible y los parámetros de los modelos utilizados; la Sección IV se presentan los resultados obtenidos a partir del prototipado funcional y la infraestructura de datos; finalmente, la Sección V expone las Referencias usadas para realizar la investigación.

II. CASOS DE USO

Para garantizar la funcionalidad del prototipo, se definieron interacciones específicas basadas en los roles de usuario identificados en la fase de requerimientos. Estas interacciones aseguran que el flujo de información sea coherente desde la captura de datos hasta la toma de decisiones pedagógicas.

A. Actor: Docente (Facilitador de captura)

El docente actúa como el primer punto de contacto con el estudiante en el aula. Sus casos de uso principales son:

- **Gestión de Pruebas Psicopedagógicas:** El docente selecciona y aplica instrumentos digitales diseñados para identificar indicadores de dislexia y TDAH.
- **Captura de Muestras Grafomotrices:** Utiliza el módulo de captura para digitalizar y cargar ejercicios de escritura, los cuales sirven como entrada para el modelo de visión artificial.
- **Consulta de Estado:** Permite verificar qué evaluaciones han sido completadas y enviadas para el procesamiento por parte de la IA.

B. Actor: Psicorientador / Especialista (Analista de resultados)

Este rol posee un nivel de acceso superior para la interpretación clínica y pedagógica de los datos procesados.

- **Monitoreo en Dashboard Central:** El especialista supervisa el listado general de estudiantes evaluados y visualiza los niveles de riesgo detectados automáticamente.
- **Análisis de Diagnóstico por IA:** Accede al reporte detallado donde el algoritmo Random Forest clasifica los patrones de escritura encontrados en las muestras.
- **Interacción con Asistente de IA:** Utiliza el módulo de lenguaje para generar y ajustar recomendaciones pedagógicas personalizadas basadas en el perfil de riesgo del estudiante.

C. Proceso del Sistema (Automático)

- **Procesamiento de Modelos:** El sistema recibe los datos de entrada, ejecuta la lógica de binarización y reducción de ruido en imágenes, y realiza la clasificación mediante el modelo entrenado.
- **Sincronización Cloud:** Persistencia automática de evidencias y resultados en la base de datos relacional para garantizar la disponibilidad de la historia psicopedagógica.

III. METODOLOGIA

La presente investigación se fundamenta en un enfoque aplicado de corte tecnológico, orientado a la resolución de problemáticas educativas mediante el desarrollo de software. El procedimiento seguido para la construcción del sistema se detalla a continuación, estructurado en fases que garantizan la reproducibilidad del proyecto.

A. Fase de Requerimientos y Fundamentación Clínica

En esta etapa inicial se realizó un análisis documental exhaustivo basado en los criterios del Manual Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales (DSM-5) **referente clínico global para la categorización de dificultades del aprendizaje**.[9] El objetivo fue parametrizar los indicadores de riesgo para la dislexia, disgrafía y TDAH. Se determinaron variables específicas como la inversión de grafemas, la presión del trazo y los tiempos de respuesta en pruebas de atención sostenida. Esta fase permitió definir la lógica de negocio que posteriormente fue trasladada a los algoritmos de evaluación.

B. Arquitectura del Sistema y Pila Tecnológica

Se implementó una arquitectura de tipo cliente-servidor [7] para asegurar la escalabilidad y el mantenimiento independiente de los componentes. Los equipos y herramientas utilizados incluyen:

- **Frontend:** Desarrollado con el framework Angular, permitiendo una interfaz reactiva y modular. Se emplearon componentes de Angular Material para estandarizar la experiencia de usuario (UX) en los módulos de captura de datos.
- **Backend:** Construido sobre FastAPI (Python), seleccionado por su alta velocidad de ejecución y soporte nativo para operaciones asíncronas, fundamentales para el procesamiento de modelos de IA en tiempo real.
- **Gestión de Datos:** Se diseñó un esquema relacional en PostgreSQL para el almacenamiento de historias psicopedagógicas, garantizando la integridad referencial y la seguridad de datos sensibles.

C. Procesamiento de Imágenes y Visión Artificial

Para el módulo de análisis de escritura,[10] se estableció un flujo de preprocesamiento de imágenes digitalizadas. [11] Las muestras recolectadas son sometidas a técnicas de binarización y reducción de ruido para aislar el trazo del fondo. Los parámetros extraídos incluyen la uniformidad del tamaño de las letras, la inclinación de las palabras y el espaciado interlineal, los cuales sirven como variables de entrada (features) para el análisis predictivo.

D. Implementación del Algoritmo de Aprendizaje Automático

El núcleo inteligente del sistema reside en un modelo de Bosque Aleatorio (Random Forest).[4] La elección de este algoritmo se basó en su capacidad para manejar conjuntos de datos con alta dimensionalidad y evitar el sobreajuste (overfitting) [3].

- **Parámetros del Modelo:** El modelo fue configurado con un bosque de 200 árboles de decisión, utilizando el criterio de impureza de Gini como métrica de optimización para la partición de los nodos.
- **Entrenamiento:** Se utilizaron librerías de Python como Scikit-learn y Pandas para el tratamiento de los datos. El modelo analiza los patrones extraídos en la fase de visión artificial para clasificar si una muestra presenta indicios de disgrafía con un nivel de confianza estadístico.

E. Recomendaciones Pedagógicas

Se integró un modelo de lenguaje para la interpretación de los resultados cuantitativos.[5] Este componente toma los indicadores detectados por el sistema y los cruza con una base de conocimientos pedagógicos para generar sugerencias personalizadas, facilitando la labor del docente en la creación de planes de intervención temprana.

F. Validación y Consideraciones Éticas

El sistema fue diseñado considerando el contexto del **Liceo Mixto del Atlántico** en Barranquilla.[6] El procedimiento de validación del prototipo incluyó la carga de datos sintéticos y reales bajo protocolos estrictos de confidencialidad. Se implementó un flujo de consentimiento informado digital, asegurando que el tratamiento de la información de los menores de edad cumpla con las normativas vigentes de protección de datos personales.

IV. RESULTADOS



Fig. 1 Interfaz de inicio de sesión y control de acceso al sistema.



Fig. 2 Módulo docente para la carga de muestras de escritura (Disgrafía).

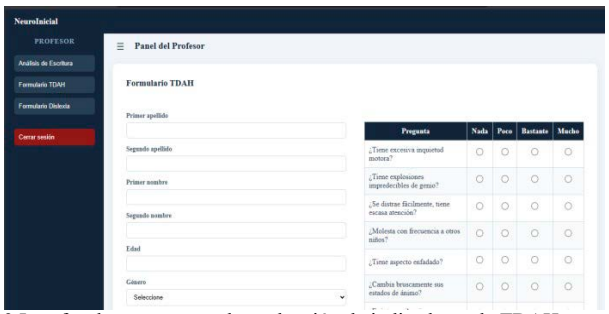


Fig. 3 Interfaz de captura para la evaluación de indicadores de TDAH.



Fig. 4 Módulo para la aplicación de instrumentos diagnósticos de dislexia.

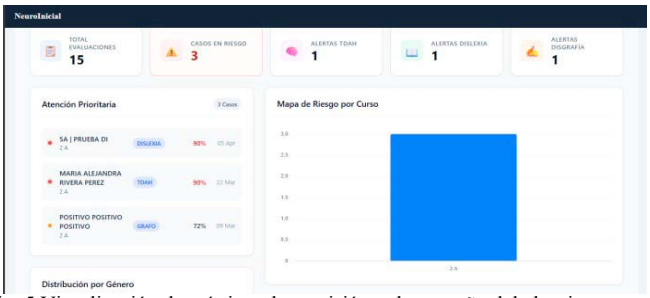


Fig. 5 Visualización de métricas de precisión y desempeño del algoritmo Random Forest.

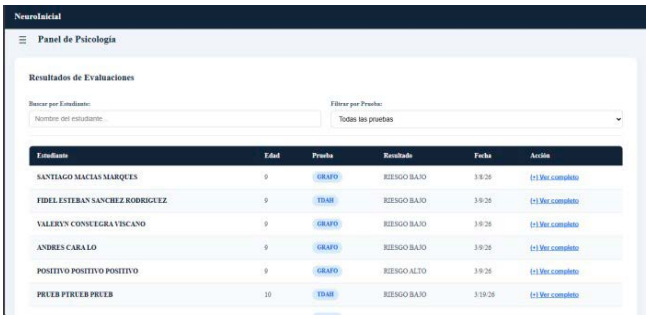


Fig. 6 listado de evaluaciones procesadas por el sistema.

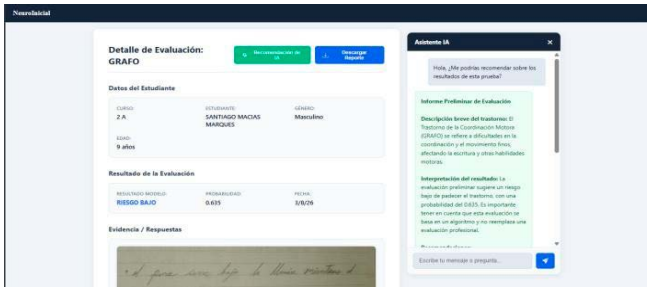


Fig. 7 Reporte detallado de evaluación con asistente de IA y recomendaciones pedagógicas.

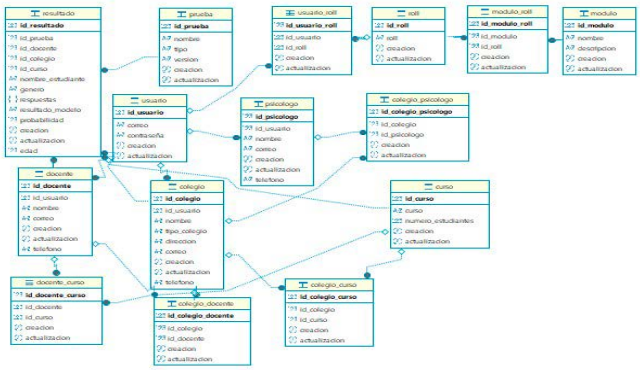


Fig. 8 Diagrama de entidad-relación del modelo de base de datos relacional.

Dado que el proyecto se encuentra en su fase de prototipo funcional, los resultados obtenidos se centran en la viabilidad técnica, la interoperabilidad de los servicios y la integración efectiva de los modelos de inteligencia artificial con la interfaz de usuario. Los logros alcanzados se estructuran en los siguientes hitos técnicos:

A. Infraestructura de Datos y Arquitectura de Persistencia

Se consolidó una plataforma web funcional que utiliza una arquitectura cliente-servidor escalable. El acceso inicial y la protección de datos sensibles se gestionan mediante un módulo de autenticación robusto (ver Fig. 1), el cual implementa protocolos de seguridad para garantizar que solo personal autorizado acceda a la información psicopedagógica. Un resultado técnico fundamental es el diseño del esquema de persistencia:

- **Modelo de Datos Relacional:** Se implementó un esquema robusto en PostgreSQL (ver Fig. 8) que vincula eficientemente las historias clínicas, los resultados de los algoritmos de IA y las evidencias multimedia de cada estudiante, asegurando la integridad referencial de la información.
- **Servicios en la Nube:** El despliegue de la lógica de negocio y los modelos de aprendizaje automático en entornos cloud permite el almacenamiento seguro y el procesamiento asíncrono de las muestras de escritura digitalizadas.

B. Interfaces de Aplicación y Captura de Evidencias (Rol Docente)

Se desarrollaron interfaces especializadas para la recolección de datos directamente en el aula, diseñadas como módulos operativos de captura de alta disponibilidad:

- **Módulo de Disgrafía:** Esta interfaz permite la carga y el preprocesamiento de muestras grafomotrices, facilitando el análisis de patrones mediante técnicas de visión artificial integradas en el backend (ver **Fig. 2**).
- **Evaluación de TDAH y Dislexia:** Se implementaron formularios estructurados basados en criterios clínicos internacionales (DSM-5) para la detección de indicadores de atención (ver **Fig. 3**) y la evaluación de procesos de lectura y reconocimiento de grafemas (ver **Fig. 4**).

C. Gestión de Resultados y Analítica de IA (Rol Psicólogo)

El sistema permite al especialista supervisar los hallazgos procesados por los algoritmos a través de una progresión lógica y visual de la información:

- **Dashboard de Gestión Centralizada:** El psicólogo dispone de un panel principal o dashboard (ver **Fig. 6**) donde se listan de forma tabular los estudiantes evaluados, permitiendo una gestión eficiente de los diagnósticos pendientes y procesados.
- **Reporte Detallado y Asistente de IA:** Al seleccionar un registro específico, el sistema genera una vista detallada que incluye el análisis de los modelos de IA y un módulo de chat para la generación de recomendaciones pedagógicas personalizadas (ver **Fig. 7**).
- **Rendimiento del Modelo Predictivo:** El núcleo inteligente del sistema identifica rasgos de disgrafía mediante el algoritmo Random Forest. Se integró una visualización de las métricas de desempeño del modelo (ver **Fig. 5**), permitiendo al especialista validar el nivel de confianza del diagnóstico automático frente a la muestra analizada.

D. Viabilidad Técnica y Proyecciones de Validación

La integración exitosa de estos ocho componentes demuestra la posibilidad técnica de automatizar y estandarizar el análisis psicopedagógico preliminar. Como fase inmediata posterior, se proyecta la ejecución de pruebas piloto en el entorno real del **Liceo Mixto del Atlántico** en Barranquilla, con el fin de validar la precisión (accuracy) del modelo de Bosque Aleatorio frente a diagnósticos clínicos previamente establecidos por profesionales.

V. REFERENCIAS

[1] Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L. (2016). Intelligence unleashed: An argument for AI in education. Pearson. Intelligence-Unleashed-Publication.pdf

[2] Barkley, R. A. (2015). Attention-deficit hyperactivity disorder: A handbook for diagnosis and treatment. Guilford Press. https://www.guilford.com/books/Science-and-Pseudoscience-in-Clinical-Psychology/Lilienfeld-LynnLohr/9781462517893

[3] Snowling, M. J., & Hulme, C. (2012). The nature and classification of reading disorders. https://acamh.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-7610.2011.02466.x

[4] Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45(1),5–32. https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324

[5] Bommasani, R., et al. (2021). On the opportunities and risks of models. Stanford University https://arxiv.org/abs/2108.07258

[6] Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill. https://www.libcientifica.com/libro/metodologia-de-la-investigacion-6edicion_74608

[7] Russell, S., & Norvig, P. (2021). Artificial intelligence: A modern approach (4th ed.). Pearson. https://aima.cs.berkeley.edu/

[8] Bernal Cerza, R. E., García Álvarez, I., Macías Merizalde, A. M., & Zapata Jaramillo, H. E. (2020). La estimulación y el desarrollo motor fino en niños de 5 años. Revista Conrado, 16(74), 306–311 http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990864420200000300306

[9] Ajuriaguerra, J. de., Auzias, F., Denner, A., Lavondyss-Monod, V., Perron, R., & Stambak, M. (1981). La escritura del niño. Laia. Guía de consulta de los criterias diagnósticos del DSM-5 https://apapcanarias.org/wp-content/uploads/2023/12/guia-de-consulta-del-dsm-v.pdf

[10] Ramlan, Siti Azura (2023), "Potential Dysgraphia Handwriting Dataset of School-Age Children", Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/39hr8dx76p.1 https://data.mendeley.com/datasets/39hr8dx76p/1

[11] Cuestionario de conducta de CONNERS para PROFESORES (C.C.E.; Teacher`s Questionnaire, C. Keith Conners). Forma abreviada https://es.slideshare.net/slideshow/manual-escala-conner/53250714

Modelo de Evaluación basado en Inferencia Difusa para el Fortalecimiento de Trayectorias Inclusivas en la Enseñanza de la Ingeniería para Estudiantes con Discapacidad Visual

Angie Katherine Martínez Soto
Facultad de Ciencia y Tecnología UPN
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
akmartinezs@itc.edu.co

Santiago Riaño Soto
Facultad de Ingeniería de Sistemas
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
srianos@itc.edu.co

Leslie Stephania Rodriguez Marin
Facultad de Ingeniería Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
lsrodriguezm@itc.edu.co

Carlos Felipe Vergara Ramírez
Facultad de Ingeniería Mecatrónica
Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Bogotá, Colombia
cfvergarar@itc.edu.co

***Abstract*— This study presents a decision-support system based on a Mamdani-type fuzzy logic approach to evaluate the digital maturity level of visually impaired students across four dimensions: logical-mathematical skills, computational thinking, technological accessibility, and digital autonomy. A structured 40-item instrument with a weighted scale from 0 to 100 was designed and applied to a pilot group of 15 students. The fuzzy engine integrates Gaussian membership functions and 14 inference rules that map input scores into five maturity levels: Initial, Exploratory, Intermediate, Prepared, and Potential Engineering. The results indicate that 93.3% of students reached the Intermediate level and 6.7% the Exploratory level, with scores ranging from 35.63 to 51.67 and an overall mean of 46.36. The highest-scoring dimension was Mathematics (56.87), followed by Accessibility (43.87), Computational Thinking (42.73), and Digital Autonomy (41.73). The study contributes a replicable framework that integrates expert systems, fuzzy logic, and structured assessment to guide inclusive pre-engineering educational pathways.**

Keywords— Inclusive engineering education; Fuzzy inference system; Decision-support systems

I. Introducción

La educación en ingeniería ha sido históricamente estructurada en torno a formas de acceso al conocimiento predominantemente visuales: lectura de planos, interpretación de gráficas, uso de software con interfaces gráficas, manipulación de representaciones espaciales y resolución de problemas apoyada en el reconocimiento visual de patrones. Esta realidad plantea una pregunta fundamental: ¿puede un estudiante con discapacidad visual acceder a la formación en ingeniería en condiciones de equidad real? La respuesta no es negativa por principio, pero sí exige reconocer que el camino hacia esa inclusión requiere condiciones específicas, sistemáticas y medibles que hoy, en la mayoría de instituciones, aún no existen de forma estructurada [3], [8].

La discapacidad visual no limita la capacidad de razonamiento abstracto, lógico ni matemático. Lo que sí impone son barreras de acceso relacionadas con la forma en que los contenidos son presentados, los entornos digitales están diseñados y las instituciones están preparadas para acompañar trayectorias no convencionales. Diversos estudios han documentado que estudiantes ciegos o con baja visión pueden desarrollar pensamiento computacional, resolver problemas secuenciales y operar herramientas tecnológicas accesibles con resultados comparables a sus pares videntes, siempre que cuenten con los apoyos adecuados [4], [6], [18]. Sin embargo, la evidencia también señala que la mayoría de programas de ingeniería carece de instrumentos diagnósticos que permitan identificar el punto de partida de estos estudiantes y orientar rutas de formación diferenciadas [3], [9].

Desde el estado del arte, la investigación sobre inclusión en STEM para personas con discapacidad visual ha avanzado en direcciones complementarias. Por un lado, se han desarrollado herramientas hápticas y auditivas para el aprendizaje de contenidos de ingeniería, como displays Braille electrónicos para matemáticas y ciencias [2], editores matemáticos accesibles como Euler [16] y estrategias de gamificación no visual para el desarrollo del pensamiento computacional [14]. Por otro lado, revisiones sistemáticas recientes identifican brechas significativas: la mayoría de intervenciones documentadas son puntuales, centradas en asignaturas específicas y difícilmente escalables a una trayectoria formativa completa [9], [11]. En el contexto latinoamericano, los estudios sobre inclusión de estudiantes con discapacidad visual en STEM son aún más escasos, y los existentes se enfocan principalmente en percepciones docentes o estrategias pedagógicas generales, sin ofrecer mecanismos cuantitativos de evaluación [10], [12], [13].

Un aspecto crítico que emerge de la literatura es la distinción entre accesibilidad como disponibilidad y accesibilidad como capacidad efectiva de uso. No basta con que una institución cuente con lectores de pantalla o materiales en Braille: es necesario que el estudiante haya desarrollado la autonomía

digital suficiente para apropiarse de esas herramientas en contextos de exigencia académica [17]. Esta distinción es especialmente relevante en ingeniería, donde el uso de software, la navegación en entornos digitales complejos y la resolución autónoma de problemas técnicos son competencias transversales desde los primeros semestres [3], [7].

Para estudiar ingeniería, un estudiante con discapacidad visual requiere, al menos, cuatro condiciones de base. Primero, habilidades lógico-matemáticas funcionales: capacidad para reconocer patrones, establecer relaciones, seguir secuencias y mantener coherencia en procesos de solución, independientemente del canal sensorial utilizado [1], [15]. Segundo, pensamiento computacional desarrollado en modalidades no visuales: descomposición de problemas, identificación de errores en secuencias, uso de estructuras algorítmicas y comprensión de relaciones entrada-proceso-salida a través de descripciones orales o apoyos táctiles [6], [14]. Tercero, competencia en accesibilidad tecnológica: uso efectivo de lectores de pantalla, navegación por teclado, comprensión de retroalimentación auditiva y apropiación de software accesible [2], [17]. Cuarto, autonomía digital: capacidad para usar dispositivos de forma independiente, resolver dificultades básicas, buscar información y sostener tareas con autorregulación [5], [16].

A pesar de que estas dimensiones son reconocidas en la literatura como determinantes para la trayectoria formativa en ingeniería, no existe hasta la fecha un sistema integrado que las evalúe simultáneamente, genere un índice de preparación gradual y oriente estrategias pedagógicas diferenciadas para esta población [11], [12]. Los marcos de evaluación existentes son, en su mayoría, cualitativos, subjetivos o diseñados para poblaciones sin discapacidad [9], [13]. Esta brecha justifica el desarrollo de un modelo basado en lógica difusa, que por su naturaleza es especialmente adecuado para capturar la graduación y la imprecisión inherente al desarrollo de competencias humanas en contextos educativos [14], [15].

En este contexto, el presente trabajo propone un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani que integra las cuatro dimensiones descritas como variables de entrada, procesa sus interacciones mediante reglas de decisión experta y produce un índice continuo de madurez digital asociado a niveles progresivos de preparación para la ingeniería. El sistema fue validado con un grupo piloto de 15 estudiantes con discapacidad visual, constituyendo una primera aproximación empírica a la evaluación estructurada y replicable de esta población en el contexto de trayectorias preingenieriles inclusivas..

II. Metodología

La metodología adoptada en este trabajo responde a la necesidad de construir un proceso de evaluación que sea, simultáneamente, accesible para la población objetivo, fundamentado teóricamente y procesable mediante un modelo computacional. Para ello, se estructuró en cuatro fases secuenciales e interdependientes, tal como se ilustra en la Figura 1.



Fig. 1. Fases metodológicas del estudio

A. Contextualización

La presente investigación se enmarca en el campo de la educación inclusiva en ingeniería, específicamente en el diseño de mecanismos de diagnóstico para estudiantes con discapacidad visual en etapas de formación preuniversitaria. El punto de partida es la constatación, respaldada por la literatura, de que no existe un instrumento integrado y cuantificable que evalúe simultáneamente las competencias relevantes para el acceso a la ingeniería en esta población [11], [12]. Ante esta brecha, se propone una metodología en cuatro fases secuenciales: análisis de ejes de evaluación, diseño del instrumento con ponderaciones, aplicación del instrumento y modelado mediante lógica difusa tipo Mamdani.

El enfoque metodológico es de naturaleza mixta: cuantitativo en la recolección y procesamiento de datos mediante el modelo difuso, y cualitativo en la definición experta de los ejes, subejes y reglas de inferencia. La lógica difusa fue seleccionada como motor de evaluación porque permite modelar la graduación inherente al desarrollo de competencias humanas, evitando clasificaciones binarias que resultarían inadecuadas para describir trayectorias educativas en contextos inclusivos [14], [15]. En particular, el sistema Mamdani es reconocido por su interpretabilidad lingüística, lo que facilita la traducción de los resultados en recomendaciones pedagógicas comprensibles para docentes e instituciones [9].

B. Análisis de ejes y subejes de evaluación

La selección de los ejes de evaluación respondió a una revisión de la literatura sobre las competencias fundamentales que un estudiante con discapacidad visual debe desarrollar para acceder en condiciones de equidad a programas de ingeniería [1], [3], [7]. A partir de este análisis, se identificaron cuatro ejes principales, cada uno desagregado en cinco subejes que permiten capturar la multidimensionalidad de cada competencia.

1) Eje 1: Habilidades lógico-matemáticas (MATH)

Este eje evalúa la capacidad del estudiante para operar con estructuras lógicas y numéricas a través de canales no visuales. Su inclusión se justifica porque el razonamiento matemático es condición de base en prácticamente todas las disciplinas de ingeniería, desde los cursos de cálculo y álgebra hasta los más

aplicados en modelado y simulación [1], [8]. Los subejes definidos son: (i) reconocimiento de patrones en secuencias numéricas y lógicas; (ii) establecimiento de relaciones y comparaciones entre magnitudes; (iii) razonamiento secuencial para la resolución de problemas paso a paso; (iv) representación mental de estructuras y cantidades; y (v) coherencia lógica en el proceso de solución. Estos subejes fueron seleccionados porque en estudiantes con discapacidad visual las habilidades matemáticas no pueden evaluarse únicamente a través de la escritura o la representación gráfica, sino que deben explorarse mediante descripciones orales, secuencias auditivas y resolución verbal de problemas [4], [6].

2) Eje 2: Pensamiento computacional (COMP).

El pensamiento computacional constituye una competencia transversal en la ingeniería contemporánea que va más allá de la programación: implica descomponer problemas, estructurar procedimientos, identificar errores y comprender relaciones entre entradas, procesos y salidas [3], [14]. Para estudiantes con discapacidad visual, este eje es especialmente relevante porque el desarrollo de habilidades computacionales accesibles puede convertirse en una fortaleza diferencial para el acceso a trayectorias STEM [2], [16]. Los subejes evaluados son: (i) descomposición de problemas en partes manejables; (ii) secuenciación lógica de pasos y procedimientos; (iii) detección de errores en una secuencia dada; (iv) abstracción y generalización de estructuras de solución; y (v) comprensión del modelo entrada–proceso–salida. Estos subejes fueron priorizados porque representan los componentes nucleares del pensamiento computacional identificados en la literatura, adaptados a modalidades de evaluación oral y auditiva [14].

3) Eje 3: Accesibilidad tecnológica (ACCESS).

Este eje evalúa la capacidad efectiva del estudiante para interactuar con entornos digitales mediante herramientas de apoyo, reconociendo que en la educación en ingeniería gran parte de los recursos, plataformas y softwares dependen del uso de tecnología [7], [17]. La distinción clave aquí es entre disponibilidad de herramientas y capacidad real de uso: una institución puede contar con lectores de pantalla y materiales digitales accesibles, pero si el estudiante no ha desarrollado las competencias para operarlos de forma autónoma, la barrera persiste [6], [17]. Los subejes son: (i) uso de lector de pantalla para comprensión de información; (ii) navegación no visual en interfaces y aplicaciones; (iii) interacción mediante teclado y comandos; (iv) comprensión e interpretación de retroalimentación multimodal (audio y vibración); y (v) uso de software accesible en tareas académicas. Estos subejes reflejan las competencias tecnológicas mínimas requeridas para participar en entornos educativos digitales de nivel medio y superior [2], [7].

4) Eje 4: Autonomía digital (AUTO)

La autonomía digital se refiere a la capacidad del estudiante para gestionar de forma independiente sus interacciones con dispositivos y entornos digitales, sosteniendo tareas con autorregulación y persistencia frente a dificultades [5], [16]. Su inclusión responde a que, incluso cuando existen apoyos institucionales, el desempeño académico en ingeniería exige progresivamente mayores niveles de autogestión y resolución autónoma de problemas [3], [8]. Los subejes evaluados son: (i) uso independiente de dispositivos digitales; (ii) resolución autónoma de problemas técnicos básicos; (iii) búsqueda y selección autónoma de información; (iv) seguimiento y adaptación a instrucciones digitales; y (v) persistencia y autorregulación en tareas extendidas. Estos subejes fueron seleccionados porque la autonomía digital no se reduce al manejo técnico de dispositivos, sino que incorpora dimensiones metacognitivas y de autorregulación que son determinantes en trayectorias formativas de largo plazo [5], [15].

C. Diseño del instrumento de evaluación

Con base en los ejes y subejes descritos, se diseñó un instrumento de evaluación estructurado dirigido a estudiantes de grado 8° a 11° con discapacidad visual, correspondiente a edades entre 13 y 17 años en el sistema educativo colombiano. El instrumento comprende un total de 40 preguntas, distribuidas en 10 preguntas por eje y 2 preguntas por subeje, garantizando cobertura uniforme de cada dimensión evaluada.

Cada pregunta fue formulada exclusivamente en formato oral y auditivo, con cinco opciones de respuesta que representan niveles progresivos de dominio o desempeño. Este diseño responde al principio de accesibilidad universal: ninguna pregunta requiere lectura visual, interpretación gráfica ni escritura convencional, y todas pueden ser respondidas a través de lector de pantalla o síntesis de voz [2], [6]. Las opciones de respuesta no fueron redactadas como escalas Likert ordinarias, sino como descripciones funcionales de comportamiento, de manera que el estudiante pudiera identificarse con la opción que mejor describe su desempeño real.

Cada opción de respuesta tiene asignada una ponderación numérica en una escala de 0 a 100, diseñada para reflejar el nivel de dominio asociado a cada alternativa. Las ponderaciones no son lineales ni equidistantes: se establecieron con criterio experto para capturar la diferencia cualitativa entre niveles adyacentes de desempeño, tal como lo requiere el sistema de inferencia difusa que procesa los datos resultantes. Los valores asignados siguen el esquema: ausencia de la habilidad (10), desempeño muy incipiente (20–30), desempeño parcial (40–60), desempeño funcional (80) y dominio autónomo y adaptable (100). El puntaje final por eje se obtiene como el promedio de las 10 preguntas correspondientes, generando un valor continuo entre 0 y 100 que constituye la variable de entrada para el modelo difuso.

D. Aplicación del instrumento

El instrumento fue aplicado a un grupo de 15 estudiantes con discapacidad visual, con edades comprendidas entre los 14 y 16 años, pertenecientes a instituciones de educación media en Colombia. La participación fue estrictamente voluntaria, con consentimiento informado de los estudiantes y, cuando correspondía por la edad, de sus acudientes.

Cada estudiante accedió al instrumento desde su propio dispositivo móvil, utilizando el lector de voz instalado en el teléfono (TalkBack en dispositivos Android o VoiceOver en iOS) como única interfaz de interacción. Esta modalidad de

aplicación fue intencionalmente seleccionada por dos razones: primero, garantiza que el instrumento sea completamente accesible sin depender de apoyos externos ni de la mediación de un evaluador; segundo, replica las condiciones reales en las que estos estudiantes interactuarían con herramientas digitales en un entorno académico, lo cual otorga validez ecológica a los resultados [6], [17].

Durante la aplicación no se proporcionaron indicaciones sobre las respuestas correctas ni se intervino en el proceso de decisión de los estudiantes. Cada participante navegó el instrumento de forma autónoma, escuchando las preguntas y opciones a través del sintetizador de voz y seleccionando su respuesta mediante gestos táctiles o comandos de teclado. El tiempo promedio de aplicación fue variable según el nivel de fluidez de cada estudiante con su lector de pantalla, lo cual en sí mismo constituyó una observación relevante sobre el eje de accesibilidad tecnológica.

Se esperaba, con base en la literatura, que los perfiles de los participantes presentaran heterogeneidad en los cuatro ejes evaluados, con tendencia a puntajes más altos en habilidades lógico-matemáticas (dado que esta dimensión es trabajada con mayor frecuencia en los currículos escolares) y puntajes más bajos en pensamiento computacional y autonomía digital, dimensiones que en la educación media colombiana reciben menor atención sistemática para esta población [12], [13].

E. Consideraciones éticas y tratamiento de la información

Para el desarrollo de la prueba piloto, aplicada a los 15 participantes, los autores definieron una política interna para el manejo ético de la información. Esta contempló la participación voluntaria, la confidencialidad de los datos recolectados y el tratamiento de la información de manera agregada y anónima, exclusivamente con fines académicos y de validación del modelo propuesto.

F. Modelado mediante lógica difusa tipo Mamdani

El procesamiento de los datos recolectados se realizó mediante un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani, implementado en Python. Este tipo de sistema fue seleccionado por su capacidad para modelar la graduación inherente al desarrollo de competencias, su interpretabilidad lingüística y su idoneidad para contextos educativos donde las fronteras entre niveles de desempeño son difusas por naturaleza [9], [15].

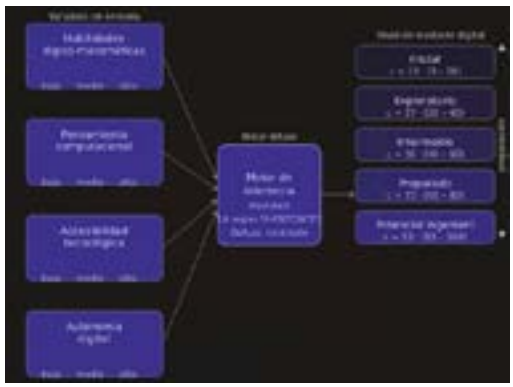


Fig. 2. Sistema de inferencia difusa

1) Variables de entrada.

El sistema recibe cuatro variables de entrada, correspondientes a los puntajes promedio obtenidos en cada eje: habilidades lógico-matemáticas (MATH), pensamiento computacional (COMP), accesibilidad tecnológica (ACCESS) y autonomía digital (AUTO). Cada variable toma valores en el rango continuo [0, 100].

2) Funciones de membresía de entrada.

Para cada variable de entrada se definieron tres funciones de membresía gaussianas, etiquetadas lingüísticamente como bajo, medio y alto. Las funciones gaussianas fueron seleccionadas frente a las triangulares o trapezoidales por su transición suave entre categorías, lo cual resulta más adecuado para representar competencias humanas que no presentan umbrales abruptos [9]. Los parámetros de cada función (centro c y desviación estándar σ) se fijaron como: bajo ($c = 15$, $\sigma = 15$), medio ($c = 50$, $\sigma = 15$) y alto ($c = 85$, $\sigma = 15$), cubriendo simétricamente el rango de entrada.

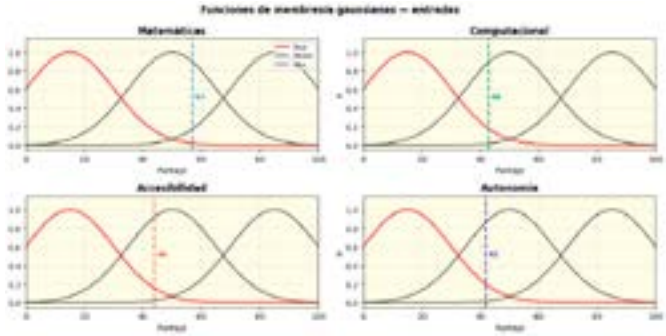


Fig. 3. Funciones de membresía de entrada

3) Funciones de membresía de salida.

La variable de salida del sistema es el índice de madurez digital, con rango también en [0, 100]. Se definieron cinco funciones de membresía gaussianas de salida, que representan los niveles progresivos de preparación para la ingeniería: Inicial ($c = 10$), Exploratorio ($c = 27$), Intermedio ($c = 50$), Preparado ($c = 73$) y Potencial Ingenieria ($c = 93$), todas con $\sigma = 8$. Estos niveles no constituyen categorías cerradas, sino etapas de un continuo que se interpreta pedagógicamente: el nivel Inicial indica necesidad de fortalecimiento profundo en habilidades base; el nivel Exploratorio refleja condiciones incipientes que requieren acompañamiento; el nivel Intermedio representa una base funcional para iniciar procesos de formación más estructurados; el nivel Preparado indica condiciones favorables para trayectorias preingenieriles; y el nivel Potencial Ingeniería identifica perfiles con alta proximidad a un tránsito exitoso hacia programas formales de ingeniería.



Fig. 4. Funciones de membresía de salida

4) Base de reglas.

La definición de las 14 reglas de inferencia no se realizó de forma automática ni mediante algoritmos de aprendizaje, sino a través de un proceso de consulta con sistema experto, entendido como la formalización del conocimiento pedagógico especializado en reglas lógicas del tipo SI–ENTONCES [9]. Este enfoque es consistente con la tradición de los sistemas expertos en educación, donde el conocimiento tácito de docentes e investigadores se estructura en una base de reglas que permite replicar el razonamiento diagnóstico de forma sistemática y transparente [15]. Cada regla fue construida considerando la interacción entre dos o más ejes de entrada y su efecto esperado sobre el nivel de madurez de salida, con base en evidencia de la literatura y en el criterio pedagógico del equipo investigador. Por ejemplo, la combinación de un nivel bajo en habilidades lógico-matemáticas y un nivel bajo en pensamiento computacional activa el consecuente Inicial, mientras que niveles altos simultáneos en matemáticas, pensamiento computacional y autonomía digital activan el consecuente Líder. Las reglas intermedias capturan las transiciones graduales entre niveles, que son precisamente las más frecuentes en poblaciones estudiantiles reales y las más difíciles de modelar con sistemas de clasificación binaria o discreta [9], [15].

5) Defuzzificación.

El valor de salida final —el índice de madurez— se obtiene mediante el método del centroide (centro de gravedad), que calcula el valor escalar correspondiente al centro de masa de la función agregada resultante. Este método fue preferido por su sensibilidad a la forma completa de la función agregada, lo que lo hace más robusto ante activaciones múltiples de reglas con consecuentes distintos [15].

III. Resultados

Los resultados se presentan en tres niveles: el índice de madurez individual por estudiante, el perfil grupal por eje de evaluación y la distribución estadística de los puntajes por eje.

A. Índice de madurez digital por estudiante

La Figura 5 presenta el índice de madurez obtenido para cada participante tras la defuzzificación por centroide. Los puntajes oscilaron entre 35.63 y 51.67, con un promedio grupal de 46.36. El 93.3% de los estudiantes (14 de 15) fue clasificado en el nivel Desarrollado y un estudiante (Est 3) en el nivel Exploratorio con un puntaje de 35.63. Ningún participante alcanzó los niveles Preparado ni Potencial Ingenieril.

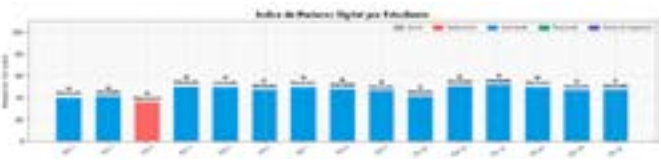


Fig. 5. Índice de madurez por estudiante

B. Perfil grupal por eje

La Figura 6 muestra los puntajes promedio normalizados por eje. El eje de habilidades lógico-matemáticas obtuvo el valor más alto (0.57), mientras que pensamiento computacional (0.43), accesibilidad tecnológica (0.44) y autonomía digital (0.42) se ubicaron en un rango cercano entre sí.

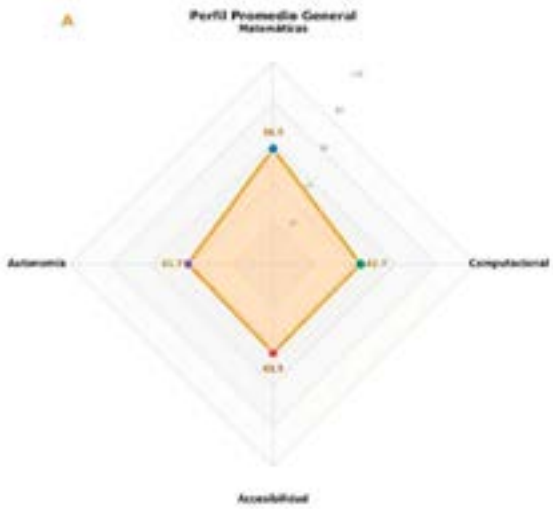


Fig. 6. Puntaje promedio normalizado por eje

C. Distribución por eje

La Figura 5 presenta los diagramas de caja por eje. El eje matemático registra la mayor mediana y dispersión del grupo. Los ejes computacional, accesibilidad y autonomía muestran distribuciones más compactas y medianas similares, con algunos valores atípicos superiores en accesibilidad y autonomía.



Fig. 7. Distribución normalizada por eje

IV. Análisis de resultados

A. *Predominancia del nivel Desarrollado y homogeneidad del grupo*

El resultado más destacado del modelo es la concentración del 93.3% de los estudiantes en el nivel Intermedio, con puntajes agrupados en un rango de apenas 16 puntos (35.63–51.67). Esta homogeneidad no es un artefacto del modelo difuso, sino un reflejo del perfil real del grupo: estudiantes de educación media con discapacidad visual que comparten un contexto institucional similar, un rango etario equivalente (14–16 años) y una exposición curricular comparable. La lógica difusa, precisamente por su capacidad de capturar graduaciones, permite identificar que aunque todos estos estudiantes comparten el mismo nivel etiqueta, sus índices varían de forma continua y esa variación tiene implicaciones pedagógicas concretas: un estudiante con 51.67 está significativamente más cerca del umbral Preparado que uno con 40.13, y esa diferencia no sería visible en un sistema de clasificación binaria o discreta [9], [15].

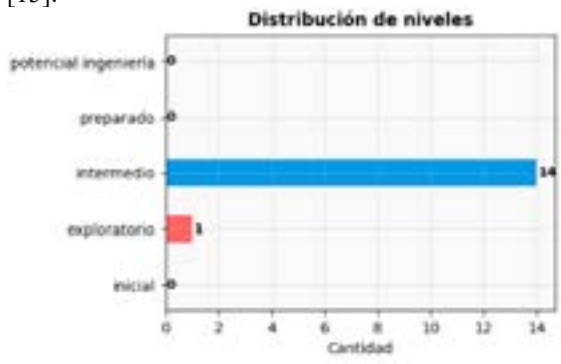


Fig. 8. Distribución de niveles

La ausencia de estudiantes en niveles Preparado y Potencial Ingenieril es consistente con lo reportado en la literatura para poblaciones similares: el acceso sistemático a pensamiento computacional y autonomía digital en educación media colombiana para estudiantes con discapacidad visual es aún incipiente, lo que limita estructuralmente el desarrollo de competencias en estos ejes [12], [13]. El único estudiante clasificado en nivel Exploratorio (Est 3, 35.63) presenta los puntajes más bajos en accesibilidad (41.0) y autonomía (30.0), lo que activa predominantemente las reglas R3 y R2 del sistema, asociadas a déficit simultáneo en ejes tecnológicos.

B. *El eje matemático como fortaleza diferencial*

El eje MATH (promedio 56.87, normalizado 0.57) se destaca consistentemente por encima de los demás. Desde la perspectiva del sistema difuso, este puntaje ubica al grupo en la zona de mayor activación de la función de membresía *medio* ($c = 50$, $\sigma = 15$), con una membresía media de aproximadamente 0.73, mientras que los ejes COMP, ACCESS y AUTO (promedio 42–44) se ubican en la zona de solapamiento entre *bajo* y *medio*, con membresías parciales en ambas categorías simultáneamente. Esta superposición es precisamente la riqueza del enfoque difuso: estos estudiantes no son simplemente "medios" en pensamiento computacional, sino que tienen una pertenencia parcial tanto a la categoría baja como a la media, lo que el modelo traduce en activaciones graduales de múltiples reglas y en un índice de salida que refleja esa ambigüedad de forma continua [9], [14].

La fortaleza matemática relativa del grupo tiene además una lectura pedagógica importante. Las habilidades lógico-matemáticas son la puerta de entrada más accesible hacia trayectorias en ingeniería para esta población, y su nivel medio-alto sugiere que existe una base cognitiva sobre la cual pueden construirse competencias computacionales y tecnológicas con intervención dirigida. Estudios como el del TEC Costa Rica con el editor Euler han demostrado que niños ciegos con habilidades lógico-matemáticas desarrolladas pueden progresar rápidamente en entornos matemáticos accesibles cuando se les proveen las herramientas adecuadas [16].

C. *Análisis de las superficies de control*

Las superficies de control tridimensionales (Figura 9) permiten visualizar cómo interactúan los ejes de entrada para determinar el índice de madurez de salida, manteniendo los ejes restantes fijos en 50.

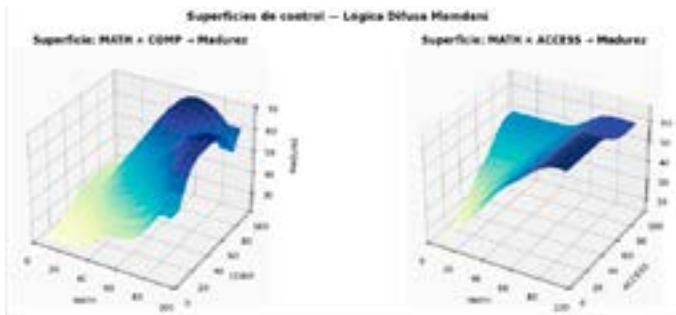


Fig. 9. Superficies de control tridimensionales

La superficie MATH × COMP → Madurez muestra un comportamiento no lineal pronunciado: cuando ambos ejes se ubican por debajo de 40, el índice de madurez se mantiene en la zona Exploratorio (25–35). A partir de valores medios en ambos ejes (50–60), la superficie asciende abruptamente hacia el nivel Desarrollado, y solo cuando MATH supera 70 con COMP en niveles medios-altos el modelo comienza a activar reglas de nivel Preparado. Este salto no lineal evidencia que MATH y COMP tienen un efecto sinérgico en el modelo: el progreso en uno de ellos, sin el acompañamiento del otro, produce ganancias modestas en el índice de madurez [9].

La superficie MATH × ACCESS → Madurez presenta una pendiente más suave y gradual, con menor presencia de saltos abruptos. Esto indica que la combinación de habilidades matemáticas y accesibilidad tecnológica produce incrementos más lineales y progresivos en el índice, sin los efectos de sinergia no lineal observados con COMP. Pedagógicamente, esto sugiere que trabajar simultáneamente MATH y ACCESS puede ofrecer ganancias más predecibles y sostenidas en el índice de madurez, mientras que la combinación MATH+COMP, aunque más potente, requiere umbrales mínimos en ambos ejes para activar su efecto conjunto.

D. Análisis de casos representativos

Las funciones agregadas individuales permiten comprender cómo el motor difuso integra las reglas activadas para cada estudiante. Se presentan dos casos representativos que ilustran los extremos del grupo.

El estudiante 33 (Figura 10, índice 35.63, nivel Exploratorio) presenta el perfil de menor madurez del grupo, con puntajes de MATH = 30, COMP = 45, ACCESS = 41 y AUTO = 30. Su función agregada muestra activación dominante en la zona Exploratorio (centrada en c = 27), con una extensión moderada hacia Desarrollado. Las reglas que mayor activación generan son R2 (MATH bajo AND ACCESS bajo) y R3 (COMP bajo AND AUTO bajo), ambas con consecuente Inicial, y R6 (ACCESS medio AND MATH bajo) con consecuente Exploratorio. El centroide resultante en 35.63 refleja la tensión entre estas activaciones: el estudiante no es puramente Inicial porque sus valores en COMP y ACCESS no son extremadamente bajos, pero tampoco alcanza el umbral funcional del nivel Desarrollado.

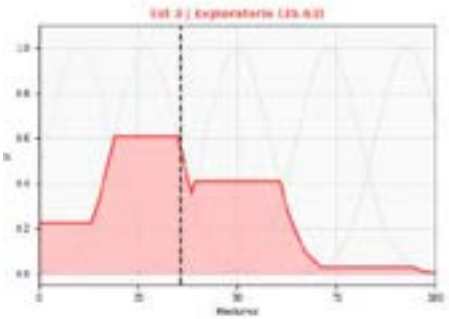


Fig. 10. Estudiante 3, nivel exploratorio

El estudiante 14 (Figura 11, índice 46.61, nivel Desarrollado) representa el perfil típico del grupo con MATH = 62, COMP = 43, ACCESS = 43 y AUTO = 35. Su función agregada presenta activación predominante en la zona Desarrollado (c = 50), con extensiones menores hacia Exploratorio y una activación incipiente hacia Preparado por efecto de la regla R9 (MATH alto AND COMP medio). Esta activación parcial de R9 explica por qué su centroide (46.61) se desplaza levemente hacia la derecha respecto al centro de la función Desarrollado (50): el modelo reconoce un potencial incipiente de transición que no es suficiente para reclasificarlo, pero sí para diferenciarlo de estudiantes con índices más bajos dentro del mismo nivel.

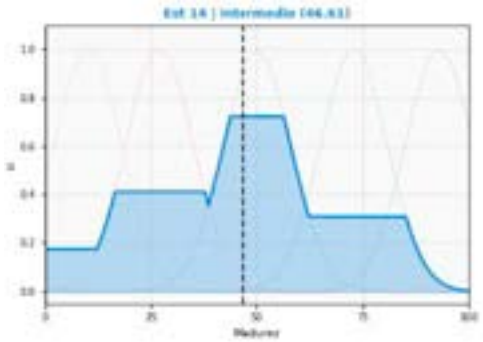


Fig. 11. Estudiante 3, nivel intermedio

E. Relación entre ejes y madurez: dispersión MATH vs COMP

La Figura 7 presenta la dispersión de los 15 estudiantes en el plano MATH–COMP, coloreada por índice de madurez. Los participantes se concentran en la franja MATH = 50–70, COMP = 35–55, con escasa variación en el color (madurez), lo que confirma la homogeneidad del grupo ya observada en los resultados globales. La excepción visible es el Est 3, desplazado hacia la zona MATH bajo–COMP medio, con el tono más diferenciado del gráfico.

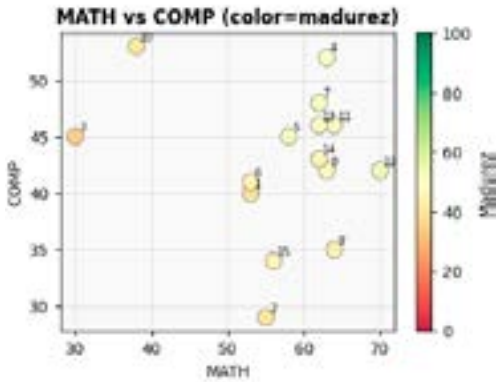


Fig. 12. Dispersión de resultados

Un hallazgo relevante de esta figura es que estudiantes con valores similares de MATH presentan diferencias notables en su índice de madurez según el valor de COMP: por ejemplo, estudiantes con MATH ≈ 63 pero con COMP = 42 versus COMP = 52 obtienen índices distintos (48.17 y 50.23

respectivamente). Esta sensibilidad del modelo al eje computacional es coherente con la base de reglas diseñada, donde COMP participa en 10 de las 14 reglas, siendo el eje con mayor peso sistémico en la determinación del nivel de madurez. Esto refuerza la recomendación pedagógica de priorizar el fortalecimiento del pensamiento computacional como palanca principal para que los estudiantes del grupo transiten del nivel Desarrollado hacia el nivel Preparado.

V. Conclusiones

Este trabajo presentó un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani para evaluar el nivel de madurez digital de estudiantes con discapacidad visual en cuatro dimensiones: habilidades lógico-matemáticas, pensamiento computacional, accesibilidad tecnológica y autonomía digital. Los resultados obtenidos en la muestra piloto sugieren que la lógica difusa constituye una alternativa adecuada para representar el carácter gradual y no lineal del desarrollo de competencias en contextos educativos inclusivos.

La aplicación del modelo permitió identificar que el grupo evaluado posee una base funcional de competencias, aunque con necesidad de fortalecimiento en pensamiento computacional y autonomía digital. El 93.3% de los participantes fue clasificado en el nivel *Intermedio*, mientras que las habilidades lógico-matemáticas presentaron el promedio más alto dentro de las variables analizadas.

El instrumento diseñado demostró viabilidad de aplicación en condiciones reales de accesibilidad. La encuesta fue respondida de manera autónoma mediante lectores de pantalla en dispositivos móviles, sin requerir apoyo externo durante el proceso, lo que evidencia la posibilidad de implementar evaluaciones diagnósticas accesibles utilizando herramientas tecnológicas de uso cotidiano.

El modelo propuesto presenta potencial para apoyar procesos institucionales de caracterización y acompañamiento académico. Su estructura basada en código abierto y aplicación autónoma favorece su adaptación y posible replicabilidad en otros contextos educativos interesados en fortalecer estrategias de inclusión en ingeniería.

No obstante, los resultados deben interpretarse considerando las limitaciones de una muestra piloto reducida. Por ello, se recomienda realizar futuras validaciones con un mayor número de participantes, diversidad institucional y mecanismos adicionales de validación experta que permitan fortalecer la robustez del modelo.

En términos generales, el trabajo aporta una aproximación metodológica para la evaluación estructurada de competencias asociadas a trayectorias inclusivas en ingeniería, integrando herramientas de inteligencia computacional y criterios de accesibilidad educativa.

References

[1] Chapman University, "Chapman Engineering Faculty's Research on Education for Visually Impaired STEM Learners," Chapman University, Orange, CA, USA, 2026.

[2] M. Gómez y F. Pérez, "La inclusión de estudiantes con discapacidad visual en Educación Física," *Retos*, vol. 57, 2025.

[3] European Journal of Engineering Education, "Engineering education for inclusion: developing transversal skills," *Eur. J. Eng. Educ.*, 2025.

[4] L. Castro, "Inclusión Educativa para Niños Con Baja Visión," *Ibero Ciencias*, vol. 3, 2025.

[5] C. Méndez, *Educación y evaluación: Una interpretación desde la lógica difusa*. Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones, 2025.

[6] M. Loor y K. Zambrano, "Guía de Evaluación de Aplicaciones Móviles para Personas con Discapacidad Visual," *Encriptar*, ULEAM, vol. 4, 2025.

[7] M. A. Smith et al., "Making STEM Accessible for Students With Visual Impairments," *J. Vis. Impairment Blindness*, vol. 118, 2024.

[8] Stanford Engineering, "Making engineering education accessible to blind and low-vision learners," Stanford University, Stanford, CA, USA, 2024.

[9] R. Betancourt y M. Fuentes, "Lógica difusa: Una nueva epistemología para las Ciencias de la Educación," *Rev. de Educación*, vol. 15, no. 2, 2024.

[10] P. Jones y L. García, "Enhancing Engineering Education for Students with Intellectual Disabilities," *J. Sci. Educ. Students Disabil.*, 2024.

[11] J. Hernández, "Educación Inclusiva: Estado del arte, tendencias investigativas," *Rev. UDES*, 2024.

[12] D. Mosquera, "Educación inclusiva desde la discapacidad visual: Estrategias," *REDIPE*, 2024.

[13] A. Torres y C. Ramírez, "State of the Art on the Teaching of Physics in Students with Visual Disabilities," *Rev. Científica Académica*, vol. 7, no. 2, 2023.

[14] R. Kumar, "Exploring STEM Education for the Visually Impaired," *Int. Educ. Res. J.*, vol. 9, no. 3, 2023.

[15] National Federation of the Blind, *SABER Final Outcomes Report*, National Federation of the Blind, Baltimore, MD, USA, 2023.

[16] Instituto Tecnológico de Costa Rica, "Niños con ceguera contribuyen a mejorar herramienta para aprendizaje matemático," TEC Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2022.

[17] P. Ríos, "Lógica difusa: aportes para procesamiento de rúbricas analíticas," *Epio*, Universidad Nacional de Córdoba, 2022.

[18] L. M. Miner, P. Nieman, A. Swanson y M. Woods, "Advancing participation of blind students in Science, Technology, Engineering, and Mathematics," *Adv. Space Res.*, vol. 42, pp. 1855–1858, 2008.

Plataforma de simulación interactiva para la enseñanza de la ciencia de los materiales en ingeniería

Andrés Felipe Caro Miranda
Esc. de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales
Universidad Industrial de Santander | UIS
Bucaramanga, Colombia
andres2220544@correo.uis.edu.co

José Gabriel Franco Correa
Esc. de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales
Universidad Industrial de Santander | UIS
Bucaramanga, Colombia
jose2180086@correo.uis.edu.co

Carlos Andrés Galán Pinilla
Esc. de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales
Universidad Industrial de Santander | UIS
Bucaramanga, Colombia
cgalanpi@uis.edu.co

Ana Emilse Coy Echeverría
Esc. de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales
Universidad Industrial de Santander | UIS
Bucaramanga, Colombia
anaecoy@uis.edu.co

***Resumen* — La enseñanza de la Ciencia de los Materiales en programas de ingeniería presenta importantes desafíos, especialmente por la necesidad de comprender fenómenos que ocurren a escalas microscópicas y que requieren la articulación de conceptos teóricos complejos con su aplicación práctica. La naturaleza abstracta de temas como la estructura cristalina, los defectos en los materiales y los mecanismos de deformación dificulta su apropiación por parte de los estudiantes, generando brechas en el proceso de enseñanza-aprendizaje.**

En este contexto, este trabajo presenta el diseño de una estrategia didáctica basada en el uso de simuladores interactivos para la enseñanza de conceptos fundamentales en Ciencia de los Materiales en programas de ingeniería. La propuesta integra herramientas digitales orientadas al análisis del ensayo de tracción, la visualización de planos y direcciones cristalográficas, la comprensión de defectos cristalinos y el estudio de los mecanismos de endurecimiento. A través de estas simulaciones, se busca facilitar la comprensión de fenómenos que, por su naturaleza microscópica y abstracta, suelen representar dificultades en los procesos tradicionales de enseñanza-aprendizaje, promoviendo además la articulación entre procesamiento, estructura, propiedades y desempeño de los materiales.

***Palabras clave*—Ciencia de materiales, Simuladores interactivos, enseñanza en ingeniería, aprendizaje activo.**

I. INTRODUCCIÓN

La formación en Ciencia de los Materiales constituye un componente fundamental en los programas de ingeniería, debido a que permite comprender la relación entre procesamiento, estructura, propiedades y desempeño de los materiales. Sin embargo, la enseñanza de esta disciplina presenta desafíos asociados a la comprensión de fenómenos que ocurren a diferentes escalas, especialmente aquellos relacionados con estructuras cristalinas, defectos cristalinos, mecanismos de endurecimiento y comportamiento mecánico del material. La naturaleza abstracta de estos conceptos dificulta su interpretación mediante metodologías tradicionales basadas en representaciones estáticas y bidimensionales.

En respuesta a estas dificultades, diversas instituciones han desarrollado herramientas digitales orientadas al fortalecimiento del aprendizaje en Ciencia de los Materiales. Entre los referentes más representativos se encuentran el proyecto DoITPoMS de la Universidad de Cambridge [1], la plataforma Deremateriala de la Universidad de Sevilla [2], SteelUniversity [3] y diferentes laboratorios virtuales implementados por universidades europeas [4]. Estas iniciativas evidencian el potencial de las tecnologías interactivas para promover estrategias de aprendizaje activo y complementar la formación en ingeniería.

A pesar de estos avances, muchas de las herramientas existentes presentan limitaciones para contextos formativos introductorios. Algunas plataformas se encuentran enfocadas en procesos específicos, en aplicaciones industriales particulares o son de uso privado, mientras que otras dependen de arquitecturas tecnológicas poco flexibles o de software adicional para su funcionamiento. Asimismo, es limitada la disponibilidad de entornos integrados que permitan al estudiante relacionar, de manera simultánea e interactiva, variables estructurales, mecánicas y cristalográficas dentro de una misma experiencia de aprendizaje.

En este contexto, el presente trabajo propone el desarrollo de una plataforma web de simulación interactiva orientada a la enseñanza de conceptos fundamentales de Ciencia de los Materiales en programas de ingeniería. La propuesta integra módulos relacionados con la visualización interactiva de planos y direcciones cristalográficas, mecanismos de endurecimiento y el ensayo de tracción, permitiendo la visualización tridimensional y la interacción en tiempo real con fenómenos asociados al comportamiento de los materiales. La plataforma fue desarrollada mediante una arquitectura modular implementada en JavaScript y Three.js, con el propósito de garantizar accesibilidad desde diferentes dispositivos sin requerir instalación de software adicional.

Finalmente, esta propuesta busca fortalecer estrategias de aprendizaje activo, favoreciendo la comprensión de fenómenos abstractos mediante herramientas interactivas que articulen teoría, visualización y análisis ingenieril.

II. METODOLOGÍA

A. *Identificación de necesidades pedagógicas*

En esta etapa se buscó identificar las dificultades recurrentes que, a lo largo de los años, han presentado los estudiantes en el curso de Ciencia de los Materiales del programa de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander. Con base en ello, y teniendo en cuenta el propósito de la asignatura y las microcompetencias que se busca desarrollar en el estudiante, se definieron los conceptos en los que se enfocaría la plataforma.

Posteriormente, se realizó una revisión bibliográfica de literatura especializada en Ciencia e Ingeniería de Materiales y normativa ASTM relacionada con los temas a desarrollar. A partir de esta revisión, se seleccionaron modelos matemáticos y conceptos físicos fundamentales para representar fenómenos asociados al comportamiento de los materiales. Esta etapa permitió definir los parámetros necesarios para el desarrollo de las simulaciones implementadas en la plataforma.

B. *Desarrollo de la plataforma*

Una vez definidos los conceptos a desarrollar, la plataforma fue estructurada mediante una arquitectura web modular implementada en JavaScript y la biblioteca Three.js. Esta arquitectura permitió integrar simuladores interactivos accesibles desde navegadores web convencionales, sin requerir instalación de software especializado, facilitando su uso local en diferentes dispositivos con conexión a internet.

C. *Verificación conceptual y funcional*

Tras el desarrollo de cada herramienta digital, se ejecutó una etapa de verificación conceptual y funcional orientada a evaluar la coherencia fenomenológica de los simuladores desarrollados. Los modelos implementados y las representaciones gráficas fueron contrastados con literatura especializada en Ciencia e Ingeniería de Materiales [5], [6], [7] y [8], así como con normativa internacional estandarizada [9], [10]. La validación fenomenológica se realizó mediante el análisis de los resultados matemáticos y gráficos generados por los simuladores, verificando su correspondencia con los modelos analíticos y el comportamiento teórico esperado para los fenómenos representados.

Adicionalmente, se realizaron pruebas funcionales orientadas a verificar la estabilidad de los simuladores y su compatibilidad en diferentes navegadores y dispositivos.

III. RESULTADOS

A. *Identificación de necesidades pedagógicas*

El análisis realizado permitió identificar dificultades recurrentes en la enseñanza de fenómenos microscópicos y tridimensionales en cursos introductorios de Ciencia de los Materiales, especialmente en temas relacionados con cristalografía y el comportamiento mecánico. Se observó que, aunque los esquemas bidimensionales y algunos recursos audiovisuales favorecen parcialmente la comprensión conceptual, estos presentan limitaciones para facilitar la interacción dinámica y la visualización espacial de los fenómenos estudiados.

A partir de estas necesidades y considerando las competencias asociadas a la comprensión de la estructura interna de los materiales y su relación con las propiedades mecánicas y físicas, se definieron los contenidos prioritarios para el desarrollo de la plataforma, enfocándose en simuladores orientados a direcciones y planos cristalográficos, mecanismos de endurecimiento microestructural en materiales metálicos y ensayo de tracción.

B. *Desarrollo de la plataforma de simulación interactiva.*

A continuación, se presenta el acceso a nuestra plataforma interactiva. Enlace para el acceso gratuito de la plataforma de simulación interactiva para la enseñanza de la ciencia de los materiales en ingeniería: https://simumetalurgia-arch.github.io/Plataforma-de-simulacion-interactiva-para-la-ense-anza-de-la-ciencia-de-los-materiales-en-ingenieria/.

Como resultado del proceso de desarrollo, se implementó una plataforma web modular para la enseñanza de conceptos fundamentales de Ciencia de los Materiales en ingeniería. La plataforma integra diferentes entornos interactivos orientados a la visualización y comprensión de fenómenos asociados a cristalografía, comportamiento mecánico y mecanismos de endurecimiento (ver Fig.1). La arquitectura desarrollada permitió integrar simuladores tridimensionales desarrollados en una plataforma accesibles desde navegadores web convencionales, facilitando la interacción dinámica con variables asociadas al comportamiento de los materiales.

La plataforma se estructuró en módulos de aprendizaje que combinan contenidos teóricos, interfaces gráficas y simulaciones interactivas, permitiendo complementar estrategias tradicionales de enseñanza mediante recursos orientados a la visualización espacial y fenomenológica. La página principal muestra la interfaz donde se integran los diferentes módulos y simuladores desarrollados (ver Fig. 2).

a)Módulo de ensayo de tracción.

Este módulo fue desarrollado con el propósito de facilitar la comprensión del comportamiento mecánico de materiales metálicos mediante un entorno interactivo basado en los principios fundamentales del ensayo de tracción. La interfaz integra secciones de teoría, navegación y simulación, permitiendo al estudiante relacionar los fundamentos del ensayo con la respuesta mecánica del material durante la deformación, (ver Fig. 3).



Fig. 1. *Interfaz principal de acceso a los módulos de simulación y aprendizaje de la plataforma.*



Fig. 2. *Menú principal de navegación y acceso a los módulos interactivos de aprendizaje de la plataforma.*

El simulador incorpora una base de datos con 50 metales y aleaciones de interés académico e industrial, permitiendo modificar parámetros geométricos de la probeta, como diámetro y longitud inicial, considerando lineamientos generales de la normativa ASTM para ensayos de tracción. Asimismo, el entorno permite visualizar en tiempo real la evolución del ensayo y el correspondiente diagrama esfuerzo-deformación, facilitando la interpretación de propiedades mecánicas asociadas al comportamiento elástico y plástico del material.

Adicionalmente, la simulación posibilita la representación visual de fenómenos asociados a la deformación progresiva y la estricción de la probeta en materiales dúctiles. La interfaz se complementa con un panel de variables mecánicas que registra parámetros como fuerza aplicada y esfuerzo desarrollado durante el ensayo. Finalmente, los resultados obtenidos pueden exportarse en formato CSV para su análisis y representación gráfica en herramientas externas como Excel.

El entorno de simulación y la representación dinámica del comportamiento mecánico de la probeta durante el ensayo con carga dinámica y deformación unitaria en tiempo real, se puede apreciar en el simulador del software de ensayo de tracción (ver Fig. 4).



Fig. 3. *Interfaz de navegación para el acceso a teoría, manual operativo y simulador 3D del ensayo de tracción.*

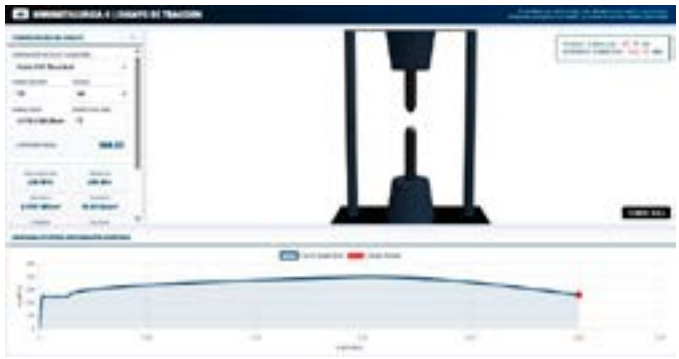


Fig 4. *Entorno interactivo de simulación del ensayo de tracción y visualización del comportamiento mecánico del material.*

b) Módulo de planos y direcciones cristalográficas

El módulo de planos y direcciones cristalográficas fue desarrollado con el propósito de facilitar la comprensión espacial de conceptos asociados a cristalografía mediante entornos tridimensionales interactivos. La plataforma permite al estudiante visualizar y manipular diferentes celdas unitarias, favoreciendo la interpretación de planos cristalográficos y direcciones representadas mediante índices de Miller.

El simulador permite seleccionar distintas estructuras cristalinas y representar interactivamente direcciones [uvw] y planos (hkl) dentro de la celda unitaria. El entorno tridimensional posibilita girar la celda en todos los ejes y explorar las estructuras en tiempo real, facilitando la comprensión de conceptos que tradicionalmente son abordados mediante representaciones bidimensionales estáticas. Adicionalmente, el sistema ajusta automáticamente el punto de origen de planos y vectores para garantizar su adecuada visualización y evitar superposiciones con los ejes de referencia, favoreciendo la comprensión de la relación entre la notación cristalográfica y la orientación espacial de los elementos dentro de la estructura cristalina.

La Figura 5 presenta la interfaz principal del módulo de cristalografía, mientras que la Figura 6 muestra el entorno tridimensional para la representación interactiva de planos y direcciones cristalográficas.



Fig. 5. *Interfaz de inicio del módulo de cristalografía para el trazado de planos y direcciones cristalográficas.*



Fig. 6. *Entorno tridimensional interactivo para la representación e identificación espacial de planos y direcciones cristalográficas.*

c) Módulo de mecanismos de endurecimiento.

Este módulo fue desarrollado con el propósito de facilitar la comprensión de la relación entre defectos cristalinos, microestructura y propiedades mecánicas de los materiales. La plataforma integra diferentes entornos interactivos orientados al análisis de mecanismos de fortalecimiento comúnmente estudiados en cursos introductorios de Ciencia de los Materiales, permitiendo entre otros, al estudiante visualizar fenómenos asociados al movimiento de dislocaciones y su interacción con distintos obstáculos microestructurales.

La interfaz principal del módulo permite acceder a simuladores relacionados con endurecimiento por solución sólida, acritud, endurecimiento por precipitación y reducción de tamaño de grano mediante el modelo de Hall-Petch. Asimismo, se incorporó un entorno orientado a la visualización de transformaciones microestructurales en aceros durante enfriamiento lento, facilitando la interpretación de fases y constituyentes en función del contenido de carbono.

El panel de navegación asociado a los diferentes entornos de simulación desarrollados se puede apreciar en la sección de simulación del software de simulación y aprendizaje mecanismos de endurecimiento (ver Fig. 7).



Fig. 7. *Panel de selección de los cinco entornos virtuales de aprendizaje: Solución sólida, deformación en frío, envejecimiento, dispersión y tamaño de grano tamaño.*

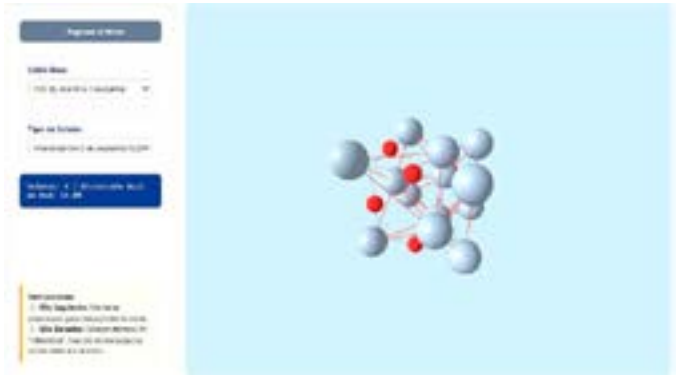


Fig. 8. *Visualización de la distorsión de la red y el bloqueo de dislocaciones por átomos de soluto en el entorno de solución sólida*

El entorno de Endurecimiento por Solución Sólida permite al usuario modelar la interacción entre los átomos de soluto y las dislocaciones dentro de la red matriz. El algoritmo simula cómo la diferencia de radios atómicos genera campos de deformación local de tracción o compresión que actúan como barreras energéticas, dificultando significativamente el deslizamiento plástico. Mediante la manipulación de la concentración de la aleación en la interfaz, el estudiante puede observar cuantitativamente el incremento en el límite elástico del material, facilitando la comprensión de fenómenos abstractos como el anclaje de dislocaciones y la distorsión de la red atómica (ver Fig. 8).

Por otro lado, el simulador de endurecimiento por deformación (acritud) permite visualizar cómo el aumento en la densidad y el "enmarañamiento" de dislocaciones durante la deformación plástica dificulta el deslizamiento dentro de la red cristalina, incrementando la resistencia mecánica del material y disminuyendo su ductilidad. Adicionalmente, el simulador permite comparar procesos de deformación en frío y en caliente mediante la representación de cambios microestructurales asociados a cada mecanismo. A través de un microscopio óptico interactivo, el estudiante puede observar cómo la deformación en frío produce el alargamiento de granos y el incremento de dislocaciones, mientras que la deformación en caliente favorece procesos de recristalización y refinamiento microestructural asociados a la temperatura de procesamiento.

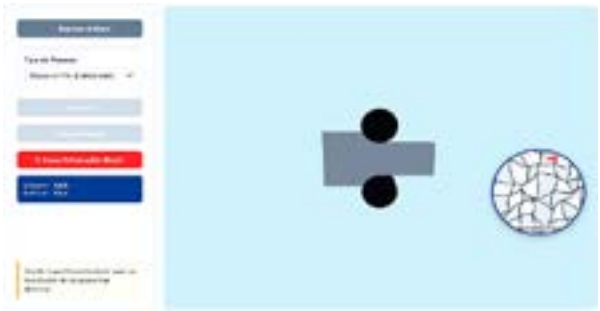


Fig. 9. *Representación del endurecimiento por deformación plástica y del incremento en la densidad de dislocaciones.*



Fig. 10. *Monitoreo dinámico del envejecimiento y visualización de la evolución microestructural de los precipitados coherentes.*

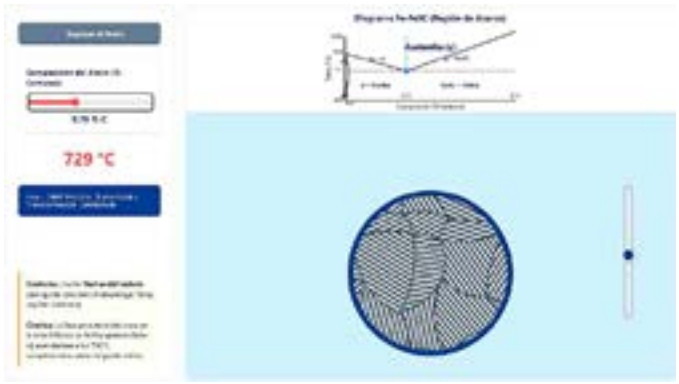


Fig. 11. *Representación de la interacción de fases en el enfriamiento de aceros y determinación de fases y constituyentes.*

El entorno de simulación asociado al endurecimiento por deformación y la representación de los cambios microestructurales generados durante la deformación plástica se puede apreciar en el simulador de deformación (ver Fig.9).

En cuanto al simulador de endurecimiento por envejecimiento, este modela la cinética de precipitación en aleaciones tratables térmicamente, permitiendo al usuario visualizar la evolución de la dureza en función del tiempo y la temperatura de sostenimiento. El algoritmo representa fielmente las etapas de transformación, facilitando la identificación de la máxima resistencia. El simulador es esencial para comprender cómo el control preciso del tiempo de tratamiento térmico determina la morfología de las fases dispersas y, por ende, el éxito en la optimización de las propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio y otros sistemas metálicos (ver Fig. 10).

Complementariamente, el entorno asociado al endurecimiento por dispersión se enfoca en la formación y distribución de fases y constituyentes durante el enfriamiento lento de aceros al carbono. El simulador permite visualizar la descomposición de la austenita y la evolución microestructural hacia estructuras compuestas por ferrita, perlita y cementita en función del contenido de carbono del acero.

A través de esta representación interactiva, el estudiante puede analizar cómo la presencia y distribución de fases duras dentro de la microestructura influye sobre el comportamiento mecánico del material, favoreciendo la comprensión de la relación entre transformaciones de fase, microestructura y propiedades mecánicas (ver Fig. 11).

Finalmente, el simulador asociado al endurecimiento por tamaño de grano fue desarrollado para representar la influencia de los límites de grano sobre la resistencia mecánica de los materiales, considerando el modelo de Hall-Petch. El entorno interactivo permite seleccionar diferentes tamaños de grano de acuerdo con la norma ASTM E112 [10] y visualizar el movimiento de dislocaciones dentro de la microestructura durante la aplicación de esfuerzos mecánicos.

La simulación representa granos con diferentes orientaciones de deslizamiento y permite observar cómo las dislocaciones se desplazan hasta interactuar con los límites de grano más cercanos.

Esta visualización favorece la comprensión del efecto de los límites de grano como barreras al movimiento de dislocaciones y de cómo la disminución del tamaño de grano incrementa la resistencia mecánica del material (ver Fig. 12).

C. Verificación conceptual y funcional

El proceso de verificación permitió corroborar la coherencia conceptual de las simulaciones desarrolladas frente a los modelos teóricos comúnmente utilizados en ciencia e ingeniería de materiales. Los resultados matemáticos y gráficos obtenidos mostraron correspondencia con fenómenos asociados a deformación plástica, interacción entre dislocaciones, transformaciones microestructurales y relaciones entre estructura y propiedades mecánicas.

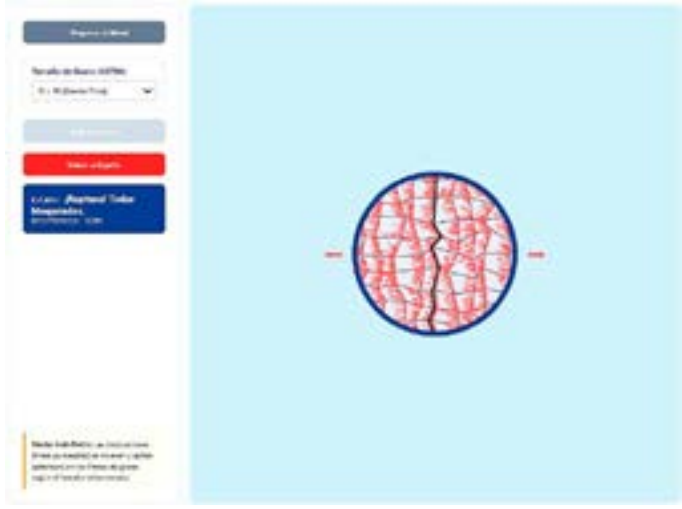


Fig. 12*. Entorno de simulación asociado al efecto Hall-Petch y la interacción entre dislocaciones y límites de grano durante la deformación del material.*

Asimismo, las pruebas funcionales realizadas evidenciaron un comportamiento estable de los simuladores en diferentes navegadores y dispositivos, permitiendo la correcta ejecución de los entornos interactivos y la adecuada visualización de los fenómenos representados.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo de la plataforma de simulación interactiva permitió integrar herramientas orientadas a la enseñanza de conceptos fundamentales de Ciencia de los Materiales mediante entornos gráficos dinámicos y accesibles desde navegadores web convencionales. Los simuladores desarrollados favorecen la visualización de fenómenos microscópicos y tridimensionales asociados a cristalografía, comportamiento mecánico y mecanismos de endurecimiento, complementando las metodologías tradicionales de enseñanza.

La arquitectura modular implementada en JavaScript y Three.js permitió desarrollar una plataforma compatible con diferentes dispositivos sin requerir software especializado, facilitando su integración en contextos educativos. Finalmente, este trabajo constituye una base para la integración de herramientas digitales interactivas en cursos de Ciencia de los Materiales, planteando como trabajo futuro la implementación y evaluación de la plataforma en escenarios reales de aula para analizar su impacto en los procesos de aprendizaje y comprensión conceptual de los estudiantes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los siguientes Semilleros: Semillero Materiales Avanzados del Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales (GIMAT) y Semillero de investigación en corrosión, integridad de equipos y ensayos no destructivos (SICIEND), de la Universidad Industrial de Santander por el apoyo académico y el acompañamiento brindado durante el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS.

[1] *University of Cambridge, Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS). [Online]. Available: https://www.doitpoms.ac.uk/*

[2] *Universidad de Sevilla, Deremateriales: Recursos para la enseñanza de la Ciencia de los Materiales. [Online]. Available: http://asignatura.us.es/materiales/*

[3] *World Steel Association, SteelUniversity: Learning for the global steel industry. [Online]. Available: https://steeluniversity.org/*

[4] *Universidad de Valencia, Laboratorio Virtual de Ciencia de los Materiales. [Online]. Available: https://www.uv.es/*

[5] *D. R. Askeland y W. J. Wright, The Science and Engineering of Materials, 7ma ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2016*

[6] *W. D. Callister y D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10ma ed. New York, NY, USA: Wiley, 2018*

[7] *M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA, USA: University Science, 1989*

[8] *J. Apraiz Barreiro, Tratamientos térmicos de los aceros, 10ma ed. Madrid, España: Editorial Dossat, 2002*

[9] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM E8/E8M-22, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022. [Online]. Available: www.astm.org*

[10] *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM E112-13, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. [Online]. Available: www.astm.org*

Information System for Efficient Energy Management at Tecnológico de Antioquia through Statistical Characterization and Consumption Pattern Analysis

Andrés Felipe Mosquera García
Software Engineering Program
Tecnológico de Antioquia,
University Institution
Medellín, Colombia
andres.mosquera91@correo.tdea.edu.co

Esteban Ramírez Montoya
Software Engineering Program
Tecnológico de Antioquia,
University Institution
Medellín, Colombia
esteban.ramirez@correo.tdea.edu.co

Santiago Horacio Hoyos Velázquez
Software Engineering Program
Tecnológico de Antioquia,
University Institution
Medellín, Colombia
santiago.hoyos@tdea.edu.co

Joan Sebastián Ruiz Zapata
Software Engineering Program
Tecnológico de Antioquia,
University Institution
Medellín, Colombia
joan.ruiz44@tdea.edu.co

Abstract*— Energy consumption in several Colombian higher education institutions lacks a technological system that helps monitor, analyse, and identify patterns based on historical data. This limits the ability of institutions to comply with UPME's Resolution 16 of 2024, which requires energy audits every four years and a minimum savings of 15%. This work proposes the development of SIGE-TdeA (an energy management system for Tecnológico de Antioquia) through statistical characterization, data analysis and identification of energy consumption patterns. To achieve this, as it is a software development project, the Scrum methodology is adopted in two-week sprints, combined with CRISP-DM for the analytical component, processing two years of EPM utility invoices and performing an inventory of electrical equipment. The system uses an MVC architecture, with six functional modules: data loading, interactive dashboard, statistical analysis, unusual consumption alerts, predictive estimates and reports. Functional and usability tests will be carried out with the administrative staff of the institution to validate the system's ability to identify seasonal patterns correlated with the academic calendar, detect consumption anomalies with configurable thresholds and generate projections with reliable information. This article presents advances in the energy management system under development and it is expected that the SIGE-TdeA will improve the use of energy resources, significantly reduce the time spent consolidating the institution's energy information, transform billing data into applicable knowledge for energy efficiency decision-making and establish the technological basis for the integration of TdeA in the energy communities regulated by Decree 2236 of 2023 as an academic mechanism for the contribution of the public education institution to the energy transition, climate change mitigation and sustainable development.

Keywords*— *Energy Efficiency, Consumption Pattern Analysis, Energy Management

I. Introduction

The global energy transition, driven by the climate commitments of the Paris Agreement and the Sustainable Development Goals (SDGs), has prioritized energy efficiency as a strategic one for institutions. In Colombia, public sector entities are legally bound by UPME Resolution 016 of 2024 [1], which imposes periodic energy audits and minimum savings goals of 15% per year in electricity consumption. Despite this regulatory pressure, many public universities continue to manage energy consumption reactively, without supporting technological tools and relying on manual processes and disconnected billing records.

This article presents the development of SIGE-TdeA (Information System for Energy Management of the Tecnológico de Antioquia), a software system exclusively that addresses this gap. Beyond conventional energy management system (EMS) dashboards, SIGE-TdeA incorporates two quantitative calculation engines:

- A tariff decomposition engine based on the official regulatory tariff structure
- An energy and cost per device estimation engine derived from institutional inventory.

These engines, taking into account the wholesale market reports published by XM (operator of the Colombian market and electricity system), will make it possible to calculate costs and project expenses under different scenarios.

This article is organized as follows: Section II reviews related works; Section III describes the methodology; Section IV presents the system design and calculation models; Section V reports the preliminary and expected results; and Section VI presents the preliminary conclusions.

II. Related Work

Energy management systems (EMS) have evolved significantly with advances in IoT, data analytics, and cloud computing. Ahmed et al. [2] conduct a comprehensive review of smart building technologies, highlighting the role of control boards and sensor networks in real-time monitoring. However, most of the systems reviewed rely on dedicated hardware meters, which limits their applicability in budget-constrained institutional environments.

In the Colombian context, companies such as Azimut Energia have implemented the "Energia 4.0" model through the CIRA (Intelligent and Remote Asset Control) platform, which combines proprietary hardware, cloud-based software, and artificial intelligence to automate the monitoring and management of energy-consuming assets [3]. Similarly, EPM offers the Telenergy platform for real-time telemetry and smart metering, financed through its corporate credit scheme linked to the electricity company's billing [4]. Both solutions require

investment in physical infrastructure and specialized technical integration.

Franco et al. [5] present an IoT-based monitoring system for university buildings that applies statistical pattern detection, confirming the feasibility of data-driven EMS in academic settings. Research specifically oriented to tariff-based cost attribution and device-level consumption modeling in Colombian institutional contexts is, however, scarce in the literature reviewed, a gap that SIGE-TdeA seeks to address directly.

Table I summarizes the comparative positioning of SIGE-TdeA compared to existing solutions.

TABLE I. COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS

System	Approach	Technology	SIGE-TdeA Differential
FactoryTalk Energy Manager	Industrial IoT Monitoring	IoT, DataOps, AI	No hardware; Adapted to educational institutions
CIRA – Azimut Energy	Energy 4.0 (purchase, use, generation)	Proprietary HW, Cloud, AI	Software Only; Operates on existing invoice data
EPM Telenergy	Smart Metering and Telemetry	Telemetry, smart meters	No physical investment; Decision-oriented

III. METHODOLOGY

A. Scrum Framework

SIGE-TdeA in development uses the agile Scrum framework [6], organized in two-week sprints. A representative from the TdeA's physical infrastructure office assumes the role of Product Owner; a team member acts as a Scrum Master; and two Software Engineering students make up the Development Team.

B. CRISP-DM for Analytical Modules

The Cross-Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM) [7] structures the development of statistical and tariff modelling components through six phases: Business Understanding, Data Understanding, Data Preparation, Modelling, Evaluation and Deployment. These phases are integrated within each Scrum sprint, allowing the development team to progressively refine the models as data quality improves and the institutional context deepens.

C. Data Collection Instruments

Two main instruments are designed:

- An Equipment Inventory Sheet that records device type, quantity, watt rating, and average hours of daily use per building block
- An EPM Invoice Consolidation Matrix in CSV format that records the billing period, the total consumption in kWh, the cost billed in COP and the applicable tariff category.

A minimum goal is set to have 24 months of billing history to capture the full annual seasonality.

IV. SYSTEM DESIGN

A. Architecture

SIGE-TdeA adopts a Model View Controller (MVC) architecture developed through the Python framework for the system backend and relational databases for data storage. Python libraries—pandas, matplotlib, and statsmodels—are used for the statistical processing and modeling layers.

B. Tariff Decomposition Engine

A central analytical contribution of SIGE-TdeA is the implementation of EPM's regulatory tariff formula for non-residential users (Official and Tax-Exempt category, Level I, OR Property). Unit cost (CU) is calculated as:

$$CUv = Gm,i + Tm + Dn,m + CVm,i,j + PRn,m + Rm \quad [COP/kWh] \quad (1)$$

Where each component corresponds to a regulated position defined by CREG resolutions and published monthly by EPM. Table II presents the values of the components according to EPM's official tariff table for June 2025 [8], applicable to the TdeA as a public institution classified in the 'Official and Exempt from Contribution' category.

TABLE II. FARE COMPONENTS EPM – NON-RESIDENTIAL (OFFICIAL/EXEMPT), TIER I – JUNE 2025

Component	Symbol	Value – June 2025 (COP $/kWh)
Generation Cost	GM,I	268,54
National Transport (STN)	Tm	54,69
Local Distribution (SDL) – Level I, OR prop.	Dn,m	299,85
Marketing margin	CVm,i,j	25,46
Cost of losses (G and T)	PRn,m	55,37
Restrictions	Rm	39,50
TOTAL CU (Non-Residential/Official)	**Cuv**	**743,41 – 811,33**

The total CU for the TdeA under OR owned assets in Tier I is 743.41 COP/kWh, or 811.33 COP/kWh in shared ownership classification. SIGE-TdeA will store this monthly tariff data and will automatically select the appropriate tariff to be applicable when calculating costs from the billed kWh, thus enabling a comparative cost analysis between periods and with tariff revisions.

In addition, the system will record the fixed charge component Cfm,j = 10,172 COP/invoice, applied monthly regardless of consumption, and will use it to separate the fixed amounts from the variable amounts on the financial dashboard

C. Energy Estimation Engine and Cost by Device

The Equipment Inventory module will result in the estimation of consumption in terms of the device category, based on the fundamental energy equation:

$$E = P \times t \times n\ [Wh] \rightarrow E\_kWh = (P \times t \times n) / 1{,}000 \quad (2)$$

Where **P** is the rated power in watts, **t** is the daily operating time in hours, and **n** is the number of identical units recorded in the inventory. Monthly consumption is obtained by multiplying by the number of business days in the billing period (**d**):

$$E\_monthly = (P \times t \times n \times d) / 1{,}000 \text{ [kWh/month]} \quad (3)$$

The corresponding monthly cost is estimated by applying the tariff unit cost:

$$Cost\_monthly = E\_monthly \times CUv \text{ [COP/month]} \quad (4)$$

Table III illustrates the application of equations (2) to (4) to representative categories of equipment present in the academic and administrative buildings of TdeA, using the June 2025 CUv of 743.41 COP/kWh and 30 days per month.

TABLE III. ILLUSTRATIVE ESTIMATE OF CONSUMPTION AND COST PER DEVICE

Device	**Power (V)**	**No.**	**Hours/ day**	**kWh/month**	**COP/month**
Computer	200	50	8	2.400	1.784.184
Projector	300	20	6	1.080	802.883
Air conditioning	2.000	10	8	4.800	3.568.368
Lights	40	100	10	1.200	892.092
Total (Illustrative)	**-**	**-**	**-**	**9.480**	**7.047.527**

These estimates, aggregated over the complete inventory, will produce a baseline theoretical consumption figure that SIGE-TdeA will compare with the actual billed consumption. Divergences between the theoretical and invoiced values will be inventory inaccuracies, unregistered equipment, or anomalous usage patterns, thus directly feeding the anomaly detection module.

D. Functional Modules

- Data upload with manual entry through forms and bulk upload via CSV/Excel of EPM invoice records and equipment inventory. The monthly tariff vectors of EPM publications are stored as reference tables.
- Interactive dashboard for viewing key performance indicators (KPIs) that includes monthly kWh, cost billed in COP, period-to-period variation, and consumption patterns correlated with the academic calendar.
- Statistical analysis with descriptive statistics, analysis of temporal trends and seasonal decomposition using Python and its corresponding libraries. Comparison between theoretical and actual consumption from the device estimate.
- Alerts of unusual consumption through automatic notifications when consumption exceeds statistical thresholds derived from historical baselines or deviates significantly from the theoretical estimate per device.
- Predictive estimates of projections of the future behavior of energy consumption through time series models with simulation of scenarios under tariff change assumptions fed with XM market data [9] and impact of energy saving and efficiency actions.
- Reports: Reports in PDF and Excel with monthly, semi-annual and annual granularities, including summaries with regulatory format for compliance with the UPME

V. PRELIMINARY AND EXPECTED RESULTS

Since SIGE-TdeA is a project in continuous development, the results are expressed in terms of verified functional results by project phase and the expected institutional impact. Fig. 1 illustrates the current state of the system homepage.

A. Functional scope

Upon completion, the system will provide: a structured database with at least one to two years of historical EPM billing data and an inventory of electrical equipment covering all blocks of TdeA's main campus; statistical characterization of consumption patterns correlated with the institutional academic calendar; an interactive dashboard with KPIs accessible to administrative users without specialized technical training; automatic generation of alerts for anomalous consumption; short-term demand projections using time series models; and exportable reports in PDF and Excel format that comply with UPME reporting standards.

B. Validation Strategy

The validation of the system will be carried out through functional tests of units and integration tests covering all modules, as well as usability tests with administrative users of TdeA involved in energy management.

C. Expected Institutional Impact

The development of SIGE-TdeA is expected to generate the following institutional impacts: replacement of the current reactive and manual energy management approach with a data-driven model; provision of reliable inputs for annual budget planning and the formulation of energy-saving strategies; compliance with the efficiency measurement obligations established by UPME Resolution 016 of 2024 [1]; and establishment of a technological base that facilitates the future integration of TdeA in energy communities under Decree 2236 of 2023 [10].



Fig. 1. System homepage illustrating some functionalities.

VI. CONCLUSIONS

The development of SIGE-TdeA will strengthen the energy management capacity of the Tecnológico de Antioquia by enabling real-time monitoring and data analysis, improving resource utilisation, and supporting evidence-based decision-making. In addition, this system contributes to building the institutional capabilities needed to address the challenges of the energy transition and to establish TdeA as a future energy community participant.

The project's innovative component lies in the integration of energy management with data analytics and pattern detection, enabling the institution to progressively adopt technologies that facilitate information and resource exchange within energy communities. Unlike commercially available solutions, this proposal is tailored to the specific operational and regulatory context of TdeA.

SIGE-TdeA will enable the Tecnológico de Antioquia to transition toward more efficient energy management, contributing to cost reduction, lower environmental impact, responsible use of limited resources, improved energy performance, and positioning the institution as a reference in the development of sustainability-oriented technological solutions.

The system also establishes a replicable and scalable low-infrastructure model applicable to similar public higher education institutions in Colombia and Latin America.

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the institutional support of the Tecnológico de Antioquia and the collaboration of the administrative and infrastructure management offices in the provision of the contextual information necessary for this project, as well as the research and innovation system of the TdeA, the GITIMA research group for its technical and financial contributions to the development of the project.

REFERENCES

[1] Mining and Energy Planning Unit (UPME), "Resolution 0016 of 2024: By which the methodology of the baseline of consumption and estimated savings is adopted," Jan. 17, 2024. [Online]. Available: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_upme_0016_2024.htm

[2] M. A. Ahmed, S. A. Chavez, A. M. Eltamaly, H. O. Garces, A. J. Rojas, and Y.-C. Kim, "Toward an intelligent campus: IoT platform for remote monitoring and control of smart buildings," Sensors, vol. 22, no. 23, p. 9045, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/s22239045

[3] Rockwell Automation, "FactoryTalk Energy Manager," 2024. [Online]. Available: https://www.rockwellautomation.com

[4] Empresas Públicas de Medellín (EPM), "Energy Efficiency," [Online]. Available: https://www.epm.com.co/clientesyusuarios/energia/empresa/eficiencia-energetica/

[5] A. Franco, E. Crisostomi, F. Leccese, A. Mugnani, and S. Suin, "Energy savings in university buildings: the potential role of smart monitoring and IoT technologies," Sustainability, vol. 17, no. 1, p. 111, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/su17010111

[6] K. Schwaber and J. Sutherland, The Scrum Guide: The Ultimate Guide to Scrum – The Rules of the Game. Scrum.org, 2020. [Online]. Available: https://scrumguides.org/.

[7] P. Chapman et al., "CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide," SPSS Inc., 2000.

[8] Empresas Públicas de Medellín (EPM), "Tariffs and Cost of Electric Energy – Regulated Market – June 2025," EPM, 2025. [Online]. Available: https://www.epm.com.co/content/dam/epm/clientes-y-usuarios/energia/tarifas-energia/publicacion-tarifas-Junio-2025.pdf.

[9] XM, "XM Report on Energy Market Variables in December 2025," XM – Company of Market Experts, Medellín, 2026. [Online]. Available: https://www.xm.com.co/noticias/8676-informe-de-xm-sobre-las-variables-del-mercado-de-energia-en-diciembre-de-2025

[10] Ministry of Mines and Energy, "Manual de gestión de comunidades energéticas," Bogotá D.C., Colombia, Dec. 2024. [Online]. Available: https://www.minenergia.gov.co/documents/14860/Manual-Gestion-Comunidades-Energeticas-2025.pdf

[11] BBVA, "Energy efficiency: what it is and how to calculate it," BBVA Sustainability, 2024. [Online]. Available: https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-eficiencia-energetica-y-como-se-calcula/

Prototipo de Seguidor Solar de Doble Eje de Bajo Costo para Optimización Fotovoltaica

Juan Diego Vallejo Sepúlveda
Semillero Desarrollo Tecnológico Sostenible – Fac. de Ingeniería
Institución Universitaria de Envigado
Envigado, Colombia
jdvallejo@correo.iue.edu.co

Jorge Mario Beleño Páez
Semillero Desarrollo Tecnológico Sostenible – Fac. de Ingeniería
Institución Universitaria de Envigado
Envigado, Colombia
jmbeleno@correo.iue.edu.co

Mateo Ballesteros Orrego
Semillero Desarrollo Tecnológico Sostenible – Fac. de Ingeniería
Institución Universitaria de Envigado
Envigado, Colombia
mballesteros@correo.iue.edu.co

Oscar Andrés Tobar-Rosero
Semillero Desarrollo Tecnológico Sostenible – Fac. de Ingeniería
Institución Universitaria de Envigado
Envigado, Colombia
oatobar@correo.iue.edu.co

Abstract*—Los sistemas fotovoltaicos de posición fija presentan pérdidas sistemáticas por desalineación angular respecto a la trayectoria solar, limitación que adquiere especial relevancia en contextos de transición energética acelerada como el colombiano, donde la participación de fuentes renovables no convencionales pasó del 1,5 % al 9 % entre 2022 y 2024. Este artículo presenta el diseño, la construcción y la validación preliminar de un prototipo de seguidor solar de doble eje de bajo costo, desarrollado en el Semillero de Desarrollo Tecnológico Sostenible de la Institución Universitaria de Envigado, como plataforma de investigación formativa en energías renovables y sistemas embebidos. El sistema integra cuatro fotorresistencias (LDR), dos servomotores SG90, un microcontrolador ESP32 y una estructura diseñada en Onshape e impresa en 3D con filamento de ABS. El control diferencial implementado orienta automáticamente los paneles hacia la zona de mayor irradiación detectada, con tiempos de respuesta de entre 3 y 13 segundos. Bajo radiación solar directa, el seguimiento activo produjo un incremento del 29,3 % en el voltaje medido frente a la configuración fija (5,60 V vs. 4,33 V), resultado que valida funcionalmente el principio de operación del sistema. Más allá de la autogeneración, el prototipo constituye una plataforma experimental replicable que abre líneas de investigación aplicada en algoritmos híbridos de seguimiento (LDR + modelos astronómicos), en la integración con arquitecturas IoT para monitoreo y telemetría en tiempo real, y en la caracterización energética bajo condiciones ambientales variables. El desarrollo integra competencias de diseño mecánico, manufactura aditiva, electrónica, programación de microcontroladores y validación experimental, lo que lo posiciona como un recurso didáctico pertinente para la formación en ingeniería orientada a la sostenibilidad.

***Palabras clave*— seguidor solar; energía solar fotovoltaica; ESP32; LDR; control diferencial; transición energética; sostenibilidad.**

I. Introducción

La energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las alternativas más relevantes para avanzar hacia matrices energéticas más limpias, diversificadas y sostenibles. Su aprovechamiento permite reducir la dependencia de fuentes fósiles, disminuir emisiones asociadas a la generación eléctrica y ampliar el acceso a soluciones energéticas en diferentes escalas, desde sistemas residenciales hasta aplicaciones comunitarias, educativas e industriales. En países con alta disponibilidad de recursos solares, como Colombia, el desarrollo de tecnologías que mejoren el aprovechamiento de la irradiación adquiere especial importancia para fortalecer los procesos de transición energética y promover soluciones adaptadas a contextos locales.

Colombia cuenta con condiciones favorables para el aprovechamiento de la energía solar debido a su ubicación geográfica y a los niveles de radiación disponibles en gran parte del territorio nacional. De acuerdo con información del IDEAM, el país presenta valores promedio de radiación solar superiores a 4,5 kWh/m² por día en diversas regiones [1]. Además, en los últimos años se ha observado un crecimiento significativo de las fuentes renovables no convencionales en la matriz eléctrica nacional, impulsado principalmente por la incorporación de proyectos solares y eólicos [2]. Este escenario evidencia la necesidad de formar talento humano capaz de diseñar, implementar y validar soluciones tecnológicas asociadas a energías renovables, especialmente desde etapas tempranas de la formación en ingeniería.

A pesar del potencial de la energía solar, los sistemas fotovoltaicos convencionales instalados en posición fija presentan una limitación importante: su capacidad de captación depende del ángulo de incidencia de la radiación solar, el cual varía durante el día debido al movimiento aparente del sol. Cuando el panel no está correctamente orientado, una parte del recurso disponible no se aprovecha de manera eficaz. Una alternativa para mitigar esta limitación consiste en utilizar seguidores solares, dispositivos capaces de modificar la orientación del panel para mantenerlo en una posición más favorable frente a la fuente de irradiación. En particular, los seguidores solares de doble eje permiten ajustar tanto el movimiento horizontal como el vertical, lo que puede mejorar el aprovechamiento de la radiación frente a configuraciones fijas, como se ha reportado en trabajos previos [3], [4].

No obstante, muchos sistemas de seguimiento solar pueden resultar costosos, complejos o poco accesibles para los procesos de formación práctica en ingeniería. Por esta razón, el desarrollo de prototipos didácticos de bajo costo constituye una estrategia pertinente para acercar a los estudiantes al diseño de soluciones tecnológicas reales, integrando conceptos de energía solar

fotovoltaica, electrónica, programación de microcontroladores, sensores, actuadores, diseño mecánico e impresión 3D. Este tipo de experiencias permite fortalecer competencias técnicas y transversales mediante la construcción, la prueba y la mejora de dispositivos funcionales, en coherencia con metodologías de aprendizaje basadas en proyectos.

En este contexto, el presente artículo describe el diseño, la construcción y la validación preliminar de un prototipo de seguidor solar de doble eje de bajo costo, desarrollado en el marco del Semillero de Desarrollo Tecnológico Sostenible de la Institución Universitaria de Envigado. El sistema propuesto integra dos paneles solares de baja potencia, cuatro sensores LDR, dos servomotores SG90, un microcontrolador ESP32 y una estructura mecánica diseñada en Onshape e impresa en 3D. El prototipo tiene como propósito orientar automáticamente los paneles hacia la zona con mayor iluminación mediante un algoritmo de control diferencial basado en sensores fotosensibles.

El alcance del trabajo se centra en la validación funcional del prototipo y en la comparación preliminar de su comportamiento frente a una configuración fija, bajo condiciones controladas de iluminación artificial y de radiación solar directa. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como una evaluación inicial del desempeño del sistema y de su potencial como herramienta formativa, más que como una caracterización energética exhaustiva de un sistema fotovoltaico a escala real. El artículo se organiza de la siguiente manera: primero se presentan los antecedentes relacionados con los seguidores solares y los algoritmos de seguimiento; posteriormente, se describe la metodología de diseño, construcción y prueba del prototipo; luego se exponen los resultados obtenidos; y, finalmente, se discuten las principales limitaciones, aprendizajes y oportunidades de mejora.

II. Antecedentes

El seguimiento solar es una estrategia empleada para mejorar el aprovechamiento de la radiación incidente sobre módulos fotovoltaicos o sistemas solares de concentración. Su principio se basa en modificar la orientación del captador para reducir el ángulo de incidencia entre la radiación solar y la superficie del panel. Cuando este ángulo se aproxima a la perpendicularidad, el sistema puede captar una mayor fracción del recurso disponible, especialmente durante las primeras horas de la mañana y las últimas horas de la tarde, momentos en los que los paneles fijos suelen presentar mayores pérdidas por orientación.

Desde el punto de vista tecnológico, los seguidores solares pueden clasificarse según el número de ejes de movimiento, el tipo de actuador empleado y la estrategia de control implementada. En aplicaciones comerciales, la selección del sistema depende de factores como el costo, la complejidad mecánica, el consumo energético del mecanismo de seguimiento, las condiciones climáticas, la precisión requerida y la escala de la instalación. En contextos educativos y de prototipado, estos sistemas también representan una oportunidad para integrar conocimientos de energía solar, electrónica, programación, sensores, actuadores, diseño mecánico y validación experimental.

A. Seguidores de un eje vs. seguidores de dos ejes

Los seguidores solares de un eje permiten modificar la orientación del panel en una única dirección, generalmente asociada al movimiento azimutal o al cambio de elevación solar. Esta configuración tiene como principal ventaja una menor complejidad mecánica y de control, lo que reduce el costo del sistema y facilita su implementación en arreglos fotovoltaicos de mayor escala. Por esta razón, los seguidores de un eje son una alternativa frecuente cuando se busca un equilibrio entre la mejora del rendimiento, la simplicidad constructiva y la viabilidad económica [5].

Sin embargo, al limitar el movimiento a un solo grado de libertad, estos sistemas no siempre logran mantener el panel orientado de forma óptima frente a la trayectoria solar completa. Esta restricción puede ser relevante en aplicaciones que requieren un mayor grado de precisión en el seguimiento o cuando se busca maximizar la captación en distintos momentos del día. En contraste, los seguidores solares de dos ejes permiten ajustar tanto la orientación horizontal como la vertical del panel, lo que mejora la capacidad del sistema para mantener una orientación más favorable frente a la radiación incidente [3].

La principal ventaja de los seguidores de dos ejes es su mayor capacidad de alineación con la fuente solar. No obstante, esta mejora implica una estructura mecánica más compleja, un mayor número de actuadores, más variables de control y posibles incrementos en el consumo energético del propio mecanismo de seguimiento. Por tanto, su adopción debe evaluarse considerando no solo el aumento de la captación, sino también la relación entre el beneficio energético, el costo, la robustez y el mantenimiento. En el caso del presente proyecto, la selección de una arquitectura de doble eje se justifica por su valor didáctico y por la posibilidad de estudiar de manera práctica el control de dos grados de libertad mediante componentes de bajo costo.

B. Algoritmos de seguimiento

El control de un seguidor solar puede implementarse mediante diversas estrategias. Una de las más utilizadas en prototipos educativos es el seguimiento basado en fotosensores, en particular mediante fotorresistencias LDR. Este método consiste en comparar la intensidad luminosa detectada por sensores ubicados en distintas posiciones a lo largo del panel. Cuando existe una diferencia significativa entre las lecturas, el sistema interpreta que la fuente de iluminación no está centrada y ordena el movimiento de los actuadores hasta reducir el error de orientación [6].

La principal ventaja del enfoque con LDR es su bajo costo, la facilidad de implementación y la respuesta directa ante cambios reales en la iluminación. Estas características lo hacen adecuado para prototipos académicos, prácticas de laboratorio y proyectos de semillero, en los que se busca que los estudiantes comprendan de manera tangible la relación entre la medición, el procesamiento y la acción de control. Además, permite implementar algoritmos sencillos de error diferencial, en los que la comparación entre sensores ubicados a la izquierda, a la derecha, arriba y abajo define el sentido de movimiento del sistema.

A pesar de estas ventajas, el seguimiento basado exclusivamente en fotosensores presenta limitaciones. Su desempeño puede verse afectado por sombras parciales, nubosidad, reflejos, diferencias de calibración entre sensores o condiciones de iluminación difusa. En estos casos, el sistema puede interpretar de manera incorrecta la dirección de mayor irradiación o no generar movimiento si las diferencias entre los sensores son inferiores al umbral establecido. Por esta razón, algunos desarrollos emplean algoritmos astronómicos, los cuales calculan la posición del sol a partir de variables como fecha, hora, latitud y longitud [7].

Los algoritmos astronómicos tienen la ventaja de no depender directamente de la lectura instantánea de sensores ópticos, por lo que pueden mantener una trayectoria de seguimiento aun en condiciones de nubosidad o baja radiación directa. Sin embargo, requieren mayor complejidad matemática, una configuración geográfica precisa y, en algunos casos, una sincronización horaria confiable. En el presente prototipo se adopta un enfoque basado en LDR, no porque sea el método más preciso en todos los escenarios, sino porque se ajusta mejor al objetivo formativo del proyecto: desarrollar un sistema funcional, de bajo costo y comprensible para estudiantes de pregrado, que permita integrar sensores, microcontroladores, actuadores y control diferencial.

C. Trabajos relacionados

La literatura reporta diversos desarrollos de seguidores solares orientados a optimizar el aprovechamiento de los sistemas fotovoltaicos. Algunos trabajos han demostrado que el seguimiento solar puede incrementar la captación en comparación con configuraciones fijas, aunque la magnitud de esta mejora depende de la ubicación geográfica, el tipo de seguidor, la precisión del control, las condiciones ambientales y la metodología de medición empleada [3], [4]. Estos antecedentes muestran que el seguimiento solar es una alternativa técnicamente viable, pero que su desempeño debe evaluarse con cuidado en función del contexto y del tipo de aplicación.

Dentro de los desarrollos con orientación educativa, los prototipos basados en Arduino y sensores LDR constituyen una referencia frecuente por su bajo costo y facilidad de implementación [8]. Estos sistemas permiten introducir conceptos básicos de electrónica, de lectura analógica, de comparación de señales y de control de servomotores. No obstante, muchos de estos prototipos se enfocan en un solo eje de movimiento o presentan una capacidad limitada de procesamiento, comunicación y expansión.

El presente proyecto retoma esta línea de trabajo, pero incorpora algunas diferencias relevantes para el contexto formativo del semillero. En primer lugar, se utiliza un microcontrolador ESP32, que ofrece mayor capacidad de procesamiento y mayores posibilidades de conectividad inalámbrica frente a plataformas básicas de prototipado [9]. En segundo lugar, el sistema implementa un seguimiento en dos ejes, lo que permite explorar el control simultáneo de los movimientos horizontales y verticales. En tercer lugar, la estructura mecánica se diseñó con una herramienta CAD e impresa en 3D, integrando así competencias de diseño, manufactura digital y validación funcional.

De esta manera, el aporte del proyecto no se limita a la construcción de un dispositivo de seguimiento solar, sino que se orienta a la consolidación de una plataforma didáctica para el aprendizaje aplicado de energías renovables y sistemas embebidos. Esta perspectiva es relevante en programas de ingeniería, donde resulta necesario complementar la formación teórica con experiencias prácticas que permitan a los estudiantes enfrentarse a problemas reales de integración tecnológica, calibración, pruebas experimentales y análisis de resultados.

D. Limitaciones conocidas del enfoque adoptado

El enfoque adoptado en este trabajo presenta limitaciones que deben reconocerse desde la etapa de diseño. En primer lugar, el uso de sensores LDR ofrece una solución económica y sencilla, pero su respuesta depende de las condiciones de iluminación y de la correcta ubicación de los sensores. Diferencias pequeñas entre lecturas pueden generar movimientos innecesarios si el sistema es demasiado sensible, mientras que umbrales altos pueden reducir la capacidad de respuesta ante cambios reales en la posición de la fuente luminosa.

En segundo lugar, al tratarse de un prototipo de pequeña escala, los resultados obtenidos no deben extrapolarse directamente a instalaciones fotovoltaicas comerciales. Factores como el tamaño del panel, la rigidez de la estructura, la precisión de los servomotores, la estabilidad mecánica, el consumo energético de los actuadores y las condiciones ambientales pueden modificar el desempeño del sistema al operar a mayor escala. Por tanto, el prototipo debe entenderse como una herramienta de validación funcional y aprendizaje, no como una solución final para aplicaciones industriales.

Finalmente, la evaluación preliminar basada en mediciones de voltaje permite observar diferencias de comportamiento entre una configuración fija y otra con seguimiento activo, pero por sí sola no es suficiente para caracterizar completamente la ganancia energética del sistema. Una validación más robusta debería incorporar mediciones simultáneas de corriente, potencia y energía acumulada en intervalos definidos de operación. Esta limitación no invalida el valor del prototipo, pero sí delimita el alcance de los resultados y orienta futuras mejoras experimentales.

III. Metodología

La metodología empleada se estructuró en cinco etapas orientadas al diseño, la construcción y la validación funcional preliminar de un prototipo de seguidor solar de doble eje (Fig.1). Estas etapas fueron: definición de requerimientos, diseño mecánico, integración electrónica, implementación del algoritmo de control y validación experimental preliminar. Esta organización permitió abordar el proyecto de manera progresiva, desde la concepción del sistema hasta la verificación de su funcionamiento en condiciones controladas. El alcance de la validación se limitó a comprobar el comportamiento funcional del mecanismo de seguimiento y a comparar el voltaje medido en una configuración fija con el de una configuración con seguimiento activo, sin realizar una caracterización completa de la potencia o de la energía acumulada.

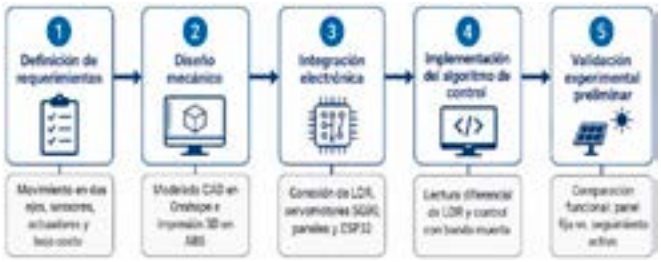


Fig. 1. Metodología de la investigación

A. Definición de requerimientos del prototipo

La primera etapa consistió en establecer los requisitos funcionales y constructivos del sistema. Se definió que el prototipo debía cumplir con cuatro condiciones principales: permitir el movimiento del panel en dos ejes, detectar diferencias de iluminación mediante sensores fotosensibles, ejecutar acciones de control mediante un microcontrolador y utilizar componentes accesibles para facilitar su reproducción en un contexto académico.

A partir de estos requerimientos, se seleccionó una arquitectura basada en cuatro sensores LDR, dos servomotores SG90, un microcontrolador ESP32, dos paneles solares de baja potencia y una estructura mecánica diseñada para su fabricación mediante impresión 3D. La selección de estos elementos respondió al propósito de desarrollar un sistema funcional, de bajo costo y adecuado para actividades de formación práctica en ingeniería. No se buscó desarrollar un sistema fotovoltaico comercial ni una solución optimizada a escala industrial, sino un prototipo didáctico que permitiera validar el principio de seguimiento solar de doble eje

B. Diseño general, mecánico y fabricación del sistema

El sistema fue concebido como un prototipo electromecánico capaz de orientar los paneles solares hacia la zona de mayor iluminación detectada por los sensores. Para ello, los cuatro sensores LDR se dispusieron en configuraciones superior e inferior, así como en los ejes de izquierda y derecha, de modo que sus lecturas permitieran estimar diferencias relativas de iluminación en ambos ejes de movimiento (Fig. 2).



Fig. 2. Diseño de prototipo de seguidor solar de bajo costo

El microcontrolador ESP32 se encargó de adquirir las señales provenientes de los sensores, procesar las diferencias entre pares opuestos y generar las señales de control para los servomotores. Un servomotor se destinó al movimiento horizontal del sistema y el otro, al vertical. De esta manera, el prototipo pudo ajustar la orientación de los paneles en función de la distribución de luz detectada por los sensores.

La arquitectura general del sistema incluyó los siguientes bloques: captación solar, sensado de iluminación, procesamiento y control, actuación mecánica y soporte estructural. Esta división permitió separar las funciones principales del prototipo y facilitar los procesos de diseño, conexión, programación y validación.

La estructura mecánica del seguidor fue diseñada con la herramienta CAD Onshape (Fig 3). El diseño consideró el soporte de los paneles solares, la ubicación de los sensores LDR, el acople con los servomotores y la estabilidad general del sistema durante el movimiento. La estructura debía permitir dos grados de libertad, correspondientes a los desplazamientos horizontal y vertical del conjunto.

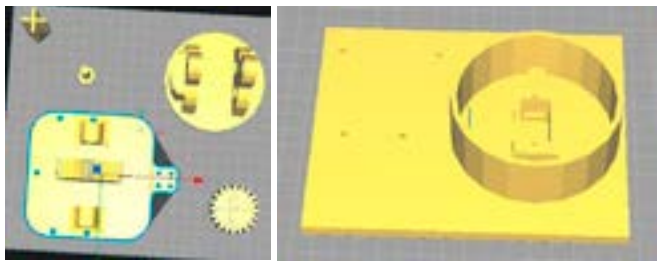


Fig. 3. Diseño de prototipo de seguidor solar de bajo costo en CAD onshape

Una vez definido el modelo CAD, las piezas fueron fabricadas mediante impresión 3D con filamento de ABS (Fig. 4). Esta elección permitió obtener una estructura liviana, de bajo costo y adaptable a las necesidades del prototipo. Además, la manufactura aditiva facilitó la iteración del diseño, permitiendo modificar dimensiones, soportes y puntos de acople durante el proceso de construcción.

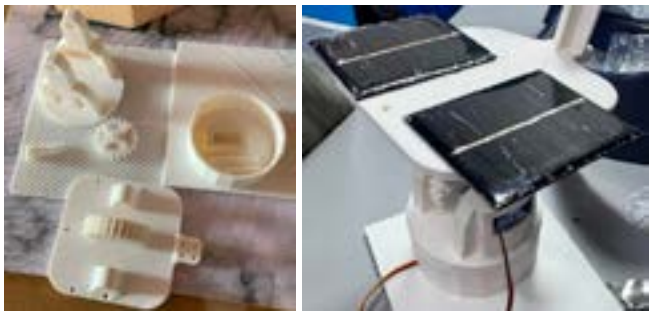


Fig. 4. Prototipo de seguidor solar de bajo costo impreso en 3D.

Con el propósito de evidenciar la viabilidad económica del prototipo, en la TABLA I se presenta el costo aproximado de los componentes principales. Los valores corresponden al mercado colombiano en 2024 y no incluyen costos de diseño ni acceso a equipos de impresión 3D. Los valores corresponden a costos aproximados de referencia en pesos colombianos y pueden variar según proveedor, disponibilidad y cantidad adquirida. El costo del filamento ABS se reporta como valor estimado asociado al material utilizado durante la fabricación de la estructura.

TABLA I. Costo aproximado del prototipo de seguidor solar

Componente	Cantidad	Costo unitario aprox. (COP)	Costo total aprox. (COP)
Microcontrolador ESP32	1	$35.000	$35.000
Servomotor SG90	2	$11.000	$22.000
Panel solar 5 V – 100 mA	2	$19.500	$39.000
Filamento ABS	1 rollo / fracción usada	$ 70.000	$50.000
Fotorresistencia LDR	4	$500	$2.000
Total aproximado			**$148.000**

El costo total aproximado del prototipo fue de $148.000 COP, equivalente a menos de 35 USD, lo que confirma su viabilidad como herramienta de formación replicable en programas de ingeniería con recursos limitados.

Durante el ensamblaje se verifica que los servomotores puedan desplazar la estructura sin interferencias mecánicas visibles y que el peso de los paneles no impida el movimiento del sistema. Esta verificación es necesaria para evitar que las limitaciones mecánicas afecten la respuesta del algoritmo de control.

C. Intergación Electrónica

Esta etapa consiste en conectar los sensores LDR, los servomotores y los paneles solares al sistema de control. Cada LDR se integra mediante una configuración de lectura analógica, lo que permite que el ESP32 registre variaciones de tensión asociadas a cambios en la iluminación. Las señales obtenidas se utilizan como referencia para determinar el sentido de movimiento requerido en cada eje.

Los servomotores SG90 reciben las señales de control del ESP32. Estas señales determinan la posición angular de cada eje dentro del rango de operación permitido por los actuadores. La integración electrónica se realizó con el objetivo de mantener una correspondencia clara entre la posición física de cada sensor y el movimiento generado por los servomotores.

Los paneles solares se emplean como elementos de captación para observar el efecto de la orientación sobre el voltaje medido en sus terminales. En esta etapa no se incorporó una caracterización completa de la potencia o de la energía acumulada, ya que el alcance de la validación se centró en una comparación preliminar del comportamiento entre la posición fija y el seguimiento activo.

D. Implementación del algoritmo de control

El algoritmo de control se basó en la comparación diferencial de las lecturas obtenidas por los sensores LDR. Para el eje horizontal, se compararon las lecturas de los sensores ubicados a la izquierda y a la derecha. Para el eje vertical, se compararon las lecturas de los sensores ubicados en la parte superior e inferior. Cuando la diferencia entre los sensores opuestos superaba un umbral definido, el microcontrolador ajustaba la posición del servomotor correspondiente para reducir el desbalance de iluminación.

El uso de un umbral o banda muerta tuvo como propósito evitar movimientos innecesarios ante pequeñas variaciones de lectura, ruido de medición o diferencias menores entre sensores. Esta condición permitió mejorar la estabilidad del sistema, reduciendo las oscilaciones continuas cuando la fuente luminosa estaba aproximadamente centrada.

Este enfoque fue seleccionado por su simplicidad, bajo costo de implementación y utilidad pedagógica. Aunque existen algoritmos más precisos basados en modelos astronómicos, el método diferencial con LDR permite observar directamente la relación entre el sensado, el procesamiento y la actuación, lo cual resulta adecuado para el alcance formativo del proyecto.

El funcionamiento general del algoritmo puede describirse como se muestra en la Fig. 5.

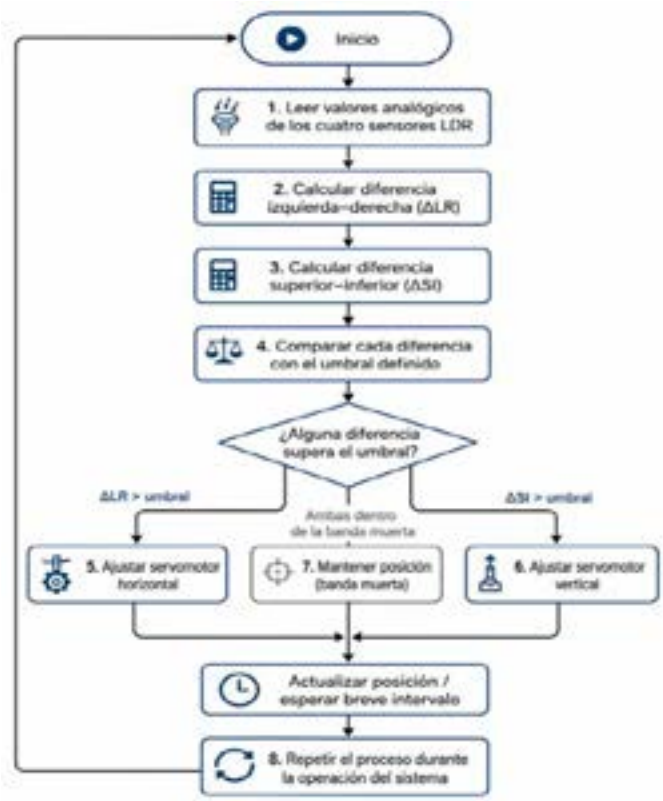


Fig. 5. Diagrama esquemático secuencial para el algoritmo de control propuesto

E. Validación experimental

La validación experimental se realizó con el propósito de comprobar el funcionamiento básico del prototipo y comparar su comportamiento con el de una configuración fija. Para ello, se evaluaron dos condiciones de operación: panel en posición fija y panel con seguimiento activo. Ambas condiciones se analizaron con iluminación artificial y con radiación solar directa.

En la configuración fija, el panel permaneció en una posición determinada durante la medición, sin intervención de los servomotores. En la configuración con seguimiento activo, el sistema ajustó automáticamente la orientación del panel a partir de las lecturas de los sensores LDR y del algoritmo implementado en el ESP32.

La variable registrada durante las pruebas fue el voltaje suministrado por el panel solar en cada condición de operación. Esta variable permitió realizar una comparación preliminar entre ambas configuraciones. Sin embargo, dado que no se midieron simultáneamente la corriente, la potencia ni la energía acumulada, los resultados deben interpretarse como una evaluación inicial del comportamiento eléctrico del prototipo y no como una caracterización energética completa.

Para reducir la ambigüedad en la comparación, las mediciones se organizaron según el tipo de iluminación y la condición de operación del sistema. De esta forma, se comparó el voltaje medido con el panel fijo frente al voltaje medido con el seguidor activo, manteniendo la misma fuente de iluminación para cada caso.

Posteriormente, los resultados obtenidos se analizaron según tres criterios: el funcionamiento mecánico, la respuesta del sistema de seguimiento y la variación del voltaje medido. El funcionamiento mecánico se verificó observando la capacidad del prototipo para desplazarse en ambos ejes sin bloqueo ni inestabilidad evidentes. La respuesta del sistema de seguimiento se evaluó en función de la capacidad del algoritmo para orientar el panel hacia la zona de mayor iluminación detectada por los sensores. La variación del voltaje se utilizó como indicador preliminar del efecto de la orientación en la captación del panel.

Es importante precisar que el incremento de voltaje observado no debe interpretarse directamente como una ganancia de energía. Para demostrar una mejora energética completa, sería necesario medir la corriente, la potencia y la energía en intervalos definidos de operación, idealmente bajo condiciones repetibles y con una carga eléctrica controlada. Por tanto, la metodología propuesta permite validar funcionalmente el prototipo y obtener una comparación eléctrica inicial, pero no sustituye una caracterización fotovoltaica exhaustiva.

Esta delimitación metodológica es coherente con el alcance del proyecto, el cual se orienta al desarrollo de un prototipo académico de bajo costo y a su validación preliminar como herramienta de aprendizaje en energías renovables, sistemas embebidos y control electromecánico

IV. Resultados

La validación preliminar del prototipo se realizó con el propósito de verificar su funcionamiento mecánico, observar la respuesta del algoritmo de seguimiento y comparar el voltaje medido en los paneles solares bajo dos configuraciones: panel en posición fija y panel con seguimiento activo. Las pruebas se realizaron bajo dos condiciones de iluminación: luz artificial con linterna y radiación solar directa al aire libre.

El análisis de resultados se estructuró en tres aspectos: la respuesta mecánica del sistema, el comportamiento del seguimiento bajo diferentes condiciones de iluminación y la comparación del voltaje medido entre la configuración fija y la de seguimiento.

A. Respuesta Mecánica del Prototipo

Durante las pruebas funcionales, los servomotores SG90 permitieron el desplazamiento del prototipo en ambos ejes de movimiento previstos: horizontal y vertical. El sistema respondió de forma estable ante variaciones en la dirección de la fuente luminosa, sin bloqueos mecánicos ni movimientos bruscos visibles durante la operación.

El comportamiento observado estuvo asociado a los parámetros definidos en el algoritmo de control, en particular al límite de desplazamiento máximo de 3° por ciclo y al período de muestreo de 150 ms. Estos valores permitieron obtener una respuesta progresiva del sistema, evitando cambios bruscos en la posición de los paneles. El tiempo de respuesta observado estuvo entre 3 y 13 s, según el ángulo inicial del panel y la posición relativa de la fuente de iluminación.

Este resultado indica que la estructura mecánica, los acoples impresos en 3D y los servomotores seleccionados resultaron adecuados para la escala del prototipo.

B. Respuesta del sistema bajo diferentes condiciones de iluminación

El prototipo se evaluó bajo dos escenarios de prueba, esta comparación permitió observar el comportamiento del sistema ante una fuente controlada y localizada, así como frente a una condición de iluminación más representativa de la operación real de un panel fotovoltaico. En ambos casos, el algoritmo de seguimiento respondió a las diferencias detectadas por los sensores LDR y actuó orientando a través de los servomotores. En la TABLA II se presenta una síntesis de las pruebas realizadas y su análisis correspondiente.

El sistema presentó una respuesta funcional en ambas condiciones de prueba. No obstante, el comportamiento bajo luz artificial fue más sensible a la posición de la fuente luminosa, ya que la linterna genera una iluminación puntual. Esta condición permitió verificar el principio de funcionamiento del algoritmo, pero no reproduce completamente la distribución espacial ni la intensidad de la radiación solar directa.

TABLA II. Respuesta funcional del prototipo bajo diferentes condiciones de iluminación

Condición	Respuesta observada	Interpretación
Luz artificial	El sistema respondió a cambios en la dirección de la fuente luminosa, aunque con mayor sensibilidad a la ubicación de la linterna y posibles sombras locales.	Valida el principio de funcionamiento del algoritmo en una condición controlada, pero no representa completamente la operación solar real.
Radiación solar directa	El seguimiento fue más estable debido a diferencias más claras entre las lecturas de los sensores LDR.	Es la condición más representativa para evaluar preliminarmente el desempeño funcional del seguidor.

En contraste, durante las pruebas con radiación solar directa se observó una respuesta más estable del sistema. La mayor intensidad de iluminación permitió observar diferencias más claras en las lecturas de los sensores LDR, lo que facilitó la operación del algoritmo de control. Cuando las diferencias entre sensores superaron el umbral definido, los servomotores ajustaron la orientación del panel; cuando dichas diferencias permanecieron dentro de la banda muerta, el sistema mantuvo su posición. Este comportamiento evidencia que la banda muerta contribuyó a reducir movimientos innecesarios y a mejorar la estabilidad funcional del seguimiento.

C. *Comparación de tensión de circuito abierto: configuración fija vs. seguimiento activo*

La comparación eléctrica preliminar se realizó midiendo la tensión de circuito abierto (Voc) de los paneles solares con un multímetro en modo VDC. Esta variable constituye un indicador de respuesta válido para la validación funcional de prototipos de seguimiento, ya que refleja la condición de irradiación percibida por el panel en cada orientación, aunque no permite cuantificar la potencia entregada a una carga. Una caracterización energética completa requeriría la medición simultánea de la corriente, la potencia y la energía acumulada bajo una carga controlada, lo cual se plantea como un trabajo futuro.

Para cada condición de iluminación, se comparó el voltaje medido en una configuración fija con el medido con el sistema de seguimiento activo. Los resultados se presentan en la TABLA III.

TABLA I. Comparación preliminar de la tensión de circuito abierto medida

Condición de prueba	Configuración	Voltaje medido (V)	Incremento relativo de voltaje
Luz artificial mediante linterna	Panel fijo	2,78	—
Luz artificial mediante linterna	Seguimiento activo	2,88	3,6 %
Radiación solar directa	Panel fijo	4,33	—
Radiación solar directa	Seguimiento activo	5,60	29,3 %

Bajo luz artificial, el voltaje pasó de 2,78 V en la configuración fija a 2,88 V con seguimiento activo, lo que representa un incremento relativo de 3,6 %. Este aumento fue bajo, lo cual puede explicarse por la menor intensidad de la fuente artificial y por la distribución no uniforme de la iluminación entre los sensores y los paneles.

Bajo radiación solar directa, el voltaje medido aumentó de 4,33 V en la configuración fija a 5,60 V con seguimiento activo. Esto corresponde a un incremento relativo de 29,3 % en el voltaje medido. Este resultado sugiere que la orientación activa del panel permitió una condición de captación más favorable que la de la configuración fija durante la prueba. Los resultados relativos a la evaluación del nivel de voltaje en el panel para los escenarios evaluados pueden observarse en la Fig. 4.

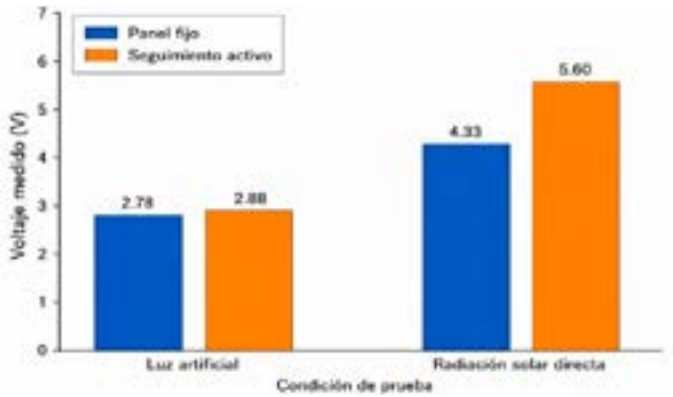


Fig. 6. Mediciones de voltaje en panel fotovoltaico para los escenarios de prueba considerados

Sin embargo, este resultado debe interpretarse con cautela. El voltaje medido permite realizar una comparación preliminar del comportamiento eléctrico del prototipo, pero no constituye, por sí solo, una medición completa de la ganancia energética. Para demostrar una mejora energética, sería necesario medir simultáneamente la corriente, la potencia y la energía acumulada durante un intervalo de operación definido, preferiblemente bajo una carga eléctrica controlada y con varias repeticiones experimentales.

Por tanto, los resultados obtenidos permiten afirmar que el prototipo logró modificar su orientación de forma funcional y que, bajo las condiciones de prueba realizadas, el seguimiento activo estuvo asociado con un mayor voltaje medido en los paneles. Esta evidencia es suficiente para validar preliminarmente el funcionamiento del sistema como prototipo académico, aunque no sustituye una caracterización fotovoltaica completa.

V. Discusión y Trabajo Futuro

Los resultados obtenidos validan funcionalmente el prototipo de seguidor solar de doble eje desarrollado. El sistema integró adecuadamente los sensores LDR, el microcontrolador ESP32, los servomotores SG90 y la estructura impresa en 3D, orientando los paneles en respuesta a las diferencias de iluminación detectadas. La banda muerta y el límite de desplazamiento por ciclo contribuyeron a una respuesta progresiva, evitando movimientos innecesarios ante pequeñas variaciones de lectura.

Bajo radiación solar directa, la tensión de circuito abierto aumentó un 29,3 % con seguimiento activo frente a la configuración fija (5,60 V vs. 4,33 V). Este resultado es coherente con los rangos reportados por Al-Mohamad (2004) y Bakos (2006), quienes documentaron mejoras de entre el 20 % y el 30 % para seguidores de doble eje bajo condiciones de cielo despejado [3], [4]. Aunque las condiciones de medición y la escala difieren, la magnitud obtenida se sitúa dentro del rango esperado, lo que respalda la validez funcional del sistema, sin constituir una caracterización energética completa.

Las pruebas bajo luz artificial permitieron verificar el principio de funcionamiento del algoritmo en un entorno controlado, aunque su carácter puntual aumentó la sensibilidad a la posición de la fuente. La radiación solar directa produjo una respuesta más estable, lo que confirma que las condiciones reales son más adecuadas para evaluar el desempeño del seguidor.

Desde el punto de vista formativo, el principal aporte radica en la articulación práctica de diseño CAD, manufactura aditiva, electrónica embebida y control automático en torno a una aplicación de energías renovables, configurando una plataforma didáctica replicable para semilleros y programas de ingeniería.

La validación funcional del prototipo abre líneas de investigación que trascienden la autogeneración. En primer lugar, la caracterización energética completa, que mida corriente, potencia y energía acumulada bajo carga controlada, permitiría calcular el balance energético neto, descontando el consumo de los actuadores. En segundo lugar, el sistema es una plataforma adecuada para investigar algoritmos híbridos que combinen control diferencial con LDR y modelos astronómicos,

mejorando el comportamiento ante nubosidad, sombras parciales o iluminación difusa. En tercer lugar, la conectividad nativa del ESP32 habilita arquitecturas IoT para monitoreo y telemetría en tiempo real, enriqueciendo las capacidades investigativas y formativas del sistema.

Finalmente, el estudio de la escalabilidad del principio de control hacia estructuras de mayor potencia conecta directamente con problemáticas del sector energético colombiano y abre oportunidades de articulación con proyectos de investigación aplicada en energías renovables a nivel regional.

VI. Conclusiones

Se diseñó, construyó y validó preliminarmente un prototipo de seguidor solar de doble eje basado en sensores LDR, servomotores SG90, un microcontrolador ESP32 y una estructura impresa en 3D. El sistema demostró una operación funcional, orientando los paneles en los ejes horizontal y vertical de acuerdo con las diferencias de iluminación detectadas.

La evaluación experimental mostró que el seguimiento activo se asoció con un mayor voltaje medido frente a la configuración fija. Bajo radiación solar directa, la tensión de circuito abierto aumentó un 29,3 % con seguimiento activo frente a la configuración fija, lo que valida funcionalmente el principio de operación del sistema. Este indicador no equivale a una ganancia energética neta, pero es consistente con el alcance de un prototipo académico de validación preliminar y con mejoras de orientación reportadas en trabajos similares de la literatura. No obstante, este resultado corresponde a una comparación preliminar de voltaje y no a una caracterización completa de desempeño energético.

El desarrollo del prototipo aportó una experiencia formativa relevante para estudiantes de pregrado, al integrar diseño mecánico, manufactura aditiva, electrónica, programación de microcontroladores y validación experimental en torno a una aplicación de energías renovables. Esto refuerza su pertinencia como proyecto de semillero y como herramienta didáctica para la formación en ingeniería.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Institución Universitaria de Envigado, al grupo de investigación GITESI y al Semillero de Desarrollo Tecnológico Sostenible por el acompañamiento académico y el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto. Asimismo, reconocen el aporte de los espacios de formación e investigación aplicada que permitieron la construcción, la prueba y la validación preliminar del prototipo.

References

[1] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. https://www.ideam.gov.co

[2] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2024). Informe de integración de energías renovables no convencionales en Colombia. Ministerio de Minas y Energía. https://www1.upme.gov.co

[3] Al-Mohamad, A. (2004). Efficiency improvements of photovoltaic panels using a sun-tracking system. Applied Energy, 79(3), 345–354. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.12.004

[4] Bakos, G. C. (2006). Design and construction of a two-axis solar tracking system for parabolic trough collector efficiency improvement. Renewable Energy, 31(15), 2411–2421. https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.12.003

[5] Chong, K. K., & Wong, C. W. (2009). General formula for on-axis sun-tracking system and its application in improving tracking accuracy. Solar Energy, 83(3), 298–305. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.07.009

[6] Sánchez, R., & Martínez, J. (2018). Diseño e implementación de un seguidor solar de dos ejes usando LDR y servomotores. Revista de Ingeniería Energética, 45(2), 55–62.

[7] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes (4th ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118671603

[8] Universidad Politécnica de Madrid. (2021). Proyecto de seguidor solar didáctico con LDR y Arduino. Repositorio Institucional UPM. https://oa.upm.es

[9] Espressif Systems. (2023). ESP32 Series Datasheet v4.4. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

[10] Chua, C. K., Leong, K. F., & Lim, C. S. (2010). Rapid Prototyping: Principles and Applications (3rd ed.). World Scientific Publishing. https://doi.org/10.1142/6665

[11] Lorenzo, E. (2010). Electricidad solar fotovoltaica: Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos. Progensa.

[12] Villalva, M. G., & Gazoli, J. R. (2017). Fundamentals of photovoltaic systems. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49457-9

[13] Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., & Sharifi, A. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(8), 1800–1818. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022

[14] Habib, M. A., Said, S. A., El-Hadidy, M. A., & Al-Zaharna, I. (1998). Optimization procedure of a hybrid photovoltaic wind energy system. Energy, 23(1), 1–7. https://doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00063-0

[15] International Electrotechnical Commission. (2016). IEC 61724-1: Photovoltaic system performance – Monitoring. IEC Standard.

[16] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2016). NTC 2050: Código Eléctrico Colombiano. ICONTEC.

[17] Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022. https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022

Effect of Outlier Treatment on the Performance of Machine Learning Classifiers for Diabetes Detection

María Fernanda Holguín Hernández and Juan Camilo Zapata Hernández
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia
maria.holguin637@pascualbravo.edu.co, juan.zapatah@pascualbravo.edu.co

***Abstract*—Diabetes mellitus is a major global public health challenge due to its high prevalence and association with severe cardiovascular, renal, neurological, and ophthalmological complications. Machine learning has emerged as a promising approach for diabetes prediction; however, diabetes-related datasets may contain outliers that reflect not only measurement errors but also clinically relevant physiological variability. This study evaluated the effect of median-based outlier imputation on the performance of Logistic Regression, Support Vector Machine (SVM), XGBoost, and k-Nearest Neighbors (KNN) classifiers for diabetes prediction. The results showed that outlier imputation reduced the F1-score across all classifiers. The largest reductions were observed in KNN and Logistic Regression, with decreases of 20.65 percent and 18.50 percent, respectively. The radial basis function kernel SVM achieved the best overall performance, although its F1-score also decreased from 0.416 to 0.397 after imputation. These findings suggest that outliers in the DiaBD dataset may contain relevant information for class discrimination. Therefore, median-based imputation may reduce discriminative information and compromise the predictive performance of machine learning models.**

Keywords—Diabetes prediction; Outlier detection; Median imputation; Machine learning; Classification; F1-score; Support Vector Machine.

I. Introduction

Diabetes mellitus is a metabolic disorder characterized by chronic hyperglycemia resulting from impaired insulin secretion, impaired insulin action, or both [1], [2], [3]. In 2021, its global prevalence reached approximately 537 million adults [4], with projections indicating an increase to 783 million by 2045 [5].This disease is one of the leading causes of mortality worldwide, causing 6.7 million deaths in 2021 [4]. Beyond its clinical and epidemiological burden, diabetes imposes a substantial economic burden, with direct healthcare expenditures estimated at approximately USD 670 billion in 2021 [6].

Patients with diabetes are at increased risk of developing both microvascular and macrovascular complications, such as neuropathy, renal failure, myocardial infarction, and stroke. In addition, diabetes mellitus may cause severe dysfunction in multiple organs and tissues, particularly the eyes, kidneys, and peripheral nerves [5], [7]. Consequently, early diagnosis is essential for timely clinical management and for reducing the likelihood of diabetes-related complications [8].

Conventional diagnostic approaches for diabetes rely mainly on clinical evaluation and biochemical markers, which may present logistical constraints, particularly in resource-limited settings. In addition, the variability of clinical manifestations and their overlap with other metabolic disorders may hinder the early detection and accurate classification of the disease [9].

In recent years, machine learning techniques have been extensively employed in diabetes research with the aim of supporting healthcare professionals in timely, accurate, and reliable clinical decision-making [10]. Several machine learning algorithms have been employed for this purpose, including Logistic Regression, Naive Bayes, k-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machines (SVM), Random Forest, XGBoost, among others [1], [3], [11]

The use of machine learning approaches for diabetes diagnosis faces several methodological challenges, particularly the presence of outliers. In metabolic disorders such as diabetes mellitus, these values constitute a critical issue because they may reflect not only noise or measurement errors, but also genuine physiological variability, rare clinical conditions, or severe metabolic dysregulation in patients [12]. Consequently, their indiscriminate removal or imputation could be result in the loss of clinically and biologically relevant information, potentially compromising the performance and generalizability of classification models [2], [12].

II. Methodology

A. Dataset description

Table 1 summarizes the main characteristics of the DiaBD dataset, which was collected from local clinics and hospitals in Khulna, Bangladesh [13]. The dataset comprises demographic variables, including gender and age, together with relevant clinical and anthropometric measurements such as height, weight, blood pressure, heart rate, glucose levels, and body mass index (BMI). In addition, it includes information on hypertension status, medical history, including family history

of diabetes and hypertension, and current comorbid conditions such as stroke and heart disease.

TABLE I. Description of DiaBD dataset

Feature	Data Type	Description
Age	Integer	Patient's age in years
Gender	Categorical	Male, Female
Pulse Rate	Float	Number of times the heart beats per minute (bpm)
Systolic BP	Float	The pressure exerted by blood against the walls of arteries during each heartbeat
Diastolic BP	Float	The pressure exerted by blood against the walls of arteries when the heart is at rest between beats.
Hypertension	Boolean	Hypertension is defined as blood pressure consistently at or above 140/90 mm Hg. (No=0 or Yes=1)
Family Hypertension	Boolean	Having one or both parents with hypertension. (No=0 or Yes=1)
Family Diabetes	Boolean	Having a parent, sibling, or other close relative with type 2 diabetes. (No=0 or Yes=1)
Glucose	Float	The blood contains the amount of glucose (sugar) at a given time.
Body Mass Index (BMI)	Float	Body mass index = (weight in kg/(height in m)^2)
Height	Float	Height (Meter)
Weight	Float	Weight (KG)
Stroke	Boolean	Affected by stroke (No=0 or Yes=1)
Cardiovascular Disease (CVD)	Boolean	Having cardiovascular disease (No=0 or Yes=1)
Diabetic	Boolean	Class variable (No=Non-diabetic or Yes=Diabetic)

B. Exploratory data analysis

In this study, the missing value rate for each column was calculated as the proportion of missing observations in that variable. Let $m_{ij} = 1$if the value $x_{ij}$is missing and $m_{ij} = 0$ otherwise. Thus, the missing rate for the j-th column is defined as:

$$MR_{cj} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_{ij}}{n},\ j = 1, 2, ..., k. \qquad (1)$$

Where n represents the total number of instances and $k$the total number of variables in the dataset.

Additionally, descriptive statistics, including the mean, standard deviation, minimum, and maximum values, were calculated for the continuous variables. Categorical and Boolean variables were analyzed using bar charts. Outlier detection was also performed for each variable using the boxplot method. This graphical approach identifies outliers based on the interquartile range (IQR), which is defined by the first quartile (Q1) and the third quartile (Q3). Specifically, data points located below the lower bound, Q1 − 1.5 × IQR, or above the upper bound, Q3 + 1.5 × IQR, were considered outliers [14]. Furthermore, class distribution was analyzed because the dataset exhibits an imbalance between diabetic and non-diabetic patients [13]. Additionally, the correlation among numerical variables was assessed through a correlation matrix using Pearson's correlation coefficient.

C. Data preprocessing

As gender and diabetes status are categorical variables, they were numerically encoded to ensure compatibility with machine learning algorithms. The encoding scheme used for these variables is presented below:

$$Gender\ (a) = \{0,\ if\ a = female\ \ 1,\ if\ a = male \qquad (2)$$

$$Diabetic\ (c) = \{0,\ \ if\ c = No\ \ 1,\ if\ c = Yes \qquad (3)$$

Furthermore, the numerical predictor variables were standardized using the Z-score method, which transforms the original values into standardized scores with a mean of zero and a standard deviation of one. The formula used for Z-score standardization is presented below.

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \qquad (4)$$

Where x denotes the original value, μ represents the mean of the variable, and σ corresponds to the standard deviation.

D. Nested Stratified Cross-validation

Stratified k-fold cross-validation generates folds that preserve the class distribution of the original dataset. This approach is especially relevant for imbalanced datasets, as it ensures that minority classes are represented across all folds [15]. In this study, a nested stratified k-fold cross-validation strategy was employed due to class imbalance. In both the inner and outer loops, stratified folds were generated to preserve the proportion of diabetic and non-diabetic samples across the training, validation, and test partitions. The inner loop consisted of three folds and was used for hyperparameter optimization through Optuna.

E. Hyperparameters optimization

The selection of hyperparameters plays a critical role in model performance. In this study, Optuna was used for hyperparameter optimization. Optuna is an open-source Python library developed to automated hyperparameter optimization [16]. It is based on the define-by-run principle, which enables flexible, efficient, and automatic construction of the hyperparameter search space [17]. This approach allows users to dynamically define and modify the search space during the optimization process [16].

F. *Classification algorithms*

In this study, the performance of several machine learning models was evaluated, including k-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Machines (SVM), Logistic Regression (LR), and XGBoost. The objective was to assess the predictive performance of different modeling paradigms for diabetes classification.

a) *Extreme Gradient Boosting (XGBoost):* is a tree-based ensemble learning algorithm widely used for supervised learning tasks. It sequentially combines weak learners by minimizing a regularized loss function using first-order gradients and second-order Hessian information. By iteratively modeling the residual errors of previous trees and aggregating their outputs, XGBoost enhances predictive performance, computational efficiency, and robustness [18]

b) *Support Vector Machine (SVM):* is a supervised learning algorithm for classification. It finds the best hyperplane to classify the data. Kernels turn non-linearly separable data into a higher-dimensional space. The kernel helps SVM manage complex data relationships.

c) *k-Nearest Neighbors (KNN):* is a non-parametric, instance-based learning algorithm used for classification and regression tasks. For classification, it assigns a class label to a new observation based on the majority class among its k nearest neighbors in the feature space. The value of k is a critical hyperparameter, as it directly influences model complexity, sensitivity to noise, and classification performance. KNN is intuitive and can be effective when decision boundaries are relatively simple or locally well-defined [19].

d) *Logistic regression:* is a statistical tool for binary categorization. It uses the logistic function (sigmoid function) to calculate a probability between 0 and 1. The model calculates the probability of a binary response (diabetes: 0 or 1) based on one or more predictor variables.

G. *Model evaluation*

Evaluation metrics are essential for quantifying the predictive performance of machine learning models. Accordingly, the performance of each model was assessed using the F1-score (see equation (5)), which represents the harmonic mean of precision and recall, balancing the trade-off between false positives and false negatives. Its value ranges from 0 to 1, where higher values indicate better overall performance. This metric is particularly useful when dealing with imbalanced datasets [20].

$$F1\ score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

III. Results

Table I shows the mean, standard deviation (std), minimum (min), maximum (max), and percentage of missing values for the following variables: pulse rate, systolic blood pressure, diastolic blood pressure, glucose, body mass index (BMI), height, and weight. The DiaBD dataset does not show the presence of missing values.

Table I. Continuous variables included in the dataset

Variable	Mean	Std	Min	Max	Missing values (%)
Pulse rate	76.6	12.2	5.0	133.0	0
systolic BP	134.0	22.2	62.0	231.0	0
diastolic BP	82.2	12.5	45.0	119.0	0
Glucose	7.6	2.9	0.0	33.5	0
BMI	22.5	8.8	1.2	574.1	0
Height	1.5	0.1	0.4	2	0
Weight	53.6	10.1	3.0	100.7	0

Fig. 2 shows the categorical and Boolean variables, including gender, hypertension, family history of hypertension, family history of diabetes, stroke, cardiovascular disease, and diabetes status. These variables exhibited no missing values. The dataset is predominantly composed of male participants (70.95%) and shows a class imbalance, with non-diabetic individuals representing 93.53% of the samples and diabetic individuals representing 6.47%. This imbalance may compromise the generalization ability of machine learning models and lead to biased classification performance toward the majority class [13].

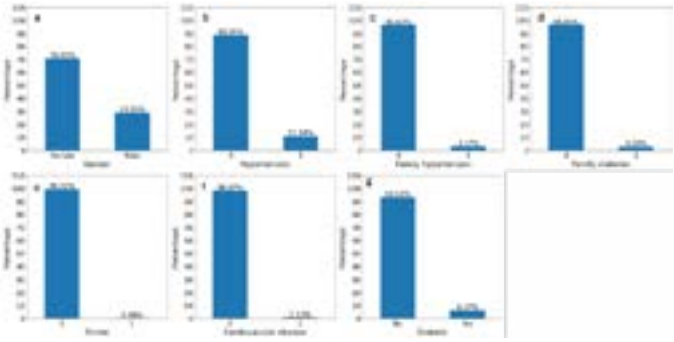


Fig. 2. Categorial and boolean variables: a) gender, b) hypertension, c) family hypertension, d) family diabetes, e) stroke, f) cardiovascular disease, g) diabetic

Fig. 3 shows the boxplots for the continuous variables, including pulse rate, systolic blood pressure, diastolic blood pressure, glucose level, body mass index (BMI), height, and weight.

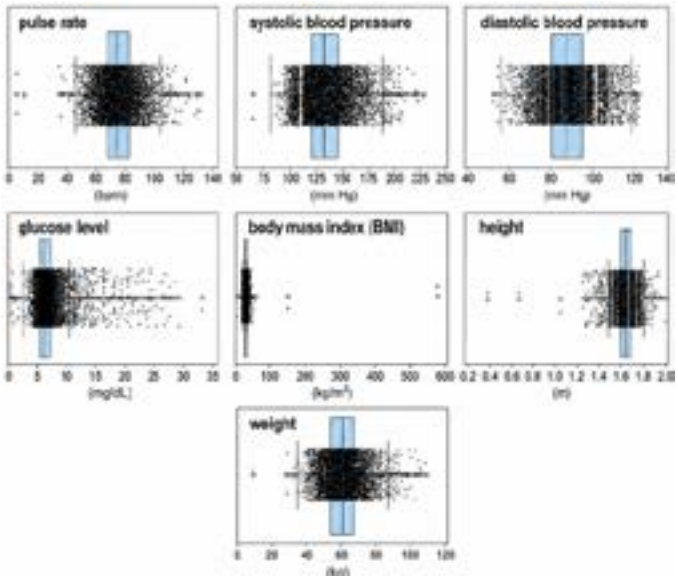


Fig. 3. Boxplot of continuous variables, a) pulse rate, b) systolic blood pressure, c) diastolic blood pressure, d) glucose level, e) body mass index (BMI), f) height, g) weight.

The correlation matrix is presented in Figure 4. The color scale represents the Pearson correlation coefficient, where red indicates a positive correlation, blue indicates a negative correlation, and white indicates the absence of correlation. Systolic and diastolic blood pressure showed a correlation coefficient of 0.72, which may be associated with their physiological interdependence. In addition, family history of hypertension and family history of diabetes evidenced a strong correlation coefficient of 0.97, which may be related to genetic predisposition [13].

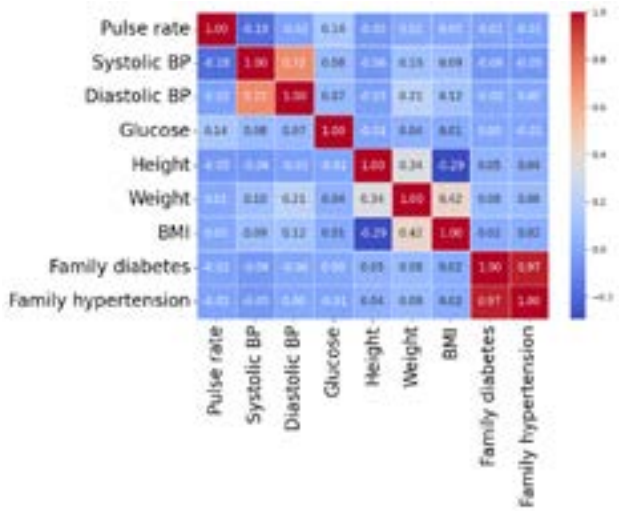


Fig. 4. Correlation matrix

Fig. 5 shows the performance of the classifiers under two scenarios: with median-based outlier imputation and without outlier imputation. The results evidenced that outlier imputation led to a reduction in the mean F1-score across all evaluated models. The most affected classifiers were KNN and Logistic Regression, with decreases of 20.65% and 18.50%, respectively. Specifically, the mean F1-score of Logistic Regression decreased from 0.373 to 0.304, and KNN decreased from 0.310 to 0.246. In contrast, XGBoost showed a reduction from 0.384 to 0.368. The radial basis function kernel SVM achieved the best overall performance; however, its mean F1-score also decreased from 0.416 to 0.397 after outlier imputation.

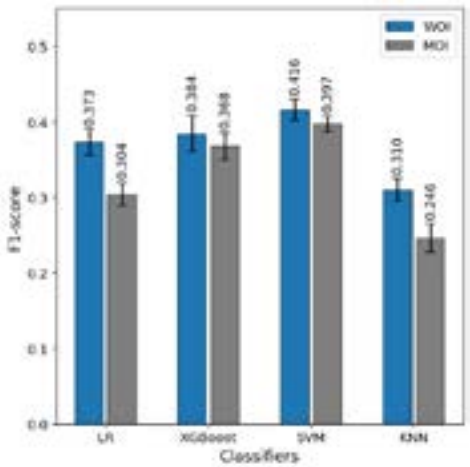


Fig. 5. F1-score performance of classifiers under two scenarios: without outlier imputation (WOI) and median-based outlier imputation (MOI).

Diabetes classification using machine learning represents a challenging task due to the complexity of clinical data, which may exhibit nonlinear relationships, non-normal distributions, correlations among variables, and high physiological variability across patients [3], [21]. Although outliers are often treated as noise or measurement errors in many modeling approaches [22], the results of this study show that median-based imputation reduced the F1-score across all evaluated classifiers. This behavior suggests that the extreme values present in the DiaBD dataset may contain clinically relevant information. In the context of medical data, these values may correspond to atypical physiological profiles, critical metabolic conditions, or specific clinical manifestations.

This interpretation is particularly relevant in diabetes mellitus, as the disease is characterized by substantial clinical and metabolic heterogeneity [23]. The metabolic alterations associated with diabetes primarily affect adipose tissue, skeletal muscle, and the liver through mechanisms related to insulin resistance. Likewise, diabetes mellitus has been associated with cardiovascular and nervous system dysfunction [24], [25]. The severity of symptoms may vary

depending on disease duration and the type of diabetes [26]. Consequently, replacing outliers with the median may attenuate part of the clinically relevant variability in the dataset and, therefore, compromise the predictive capacity of the models.

IV. Conclusions

This study evaluated the effect of median-based outlier imputation on diabetes prediction using machine learning classifiers. The results showed that imputing outliers reduced the mean F1-score across all models, with the largest decreases observed in KNN and Logistic Regression. Although the radial basis function SVM achieved the best overall performance, its F1-score also decreased after imputation. These findings suggest that outliers in the DiaBD dataset may contain relevant information for class discrimination; therefore, median-based imputation should not be applied automatically without evaluating its impact on model performance.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank the SAMDATA Undergraduate Student Research Group at Institución Universitaria Pascual Bravo for its support during the development of this research.

REFERENCES

[1] A. El-Sayyid El-Bashbishy y H. M. El-Bakry, «Pediatric diabetes prediction using machine learning», Sci. Rep., vol. 16, no.1, p. 1979, ene. 2026, doi: 10.1038/s41598-025-24964-y.

[2] X. Feng, Y. Cai, y R. Xin, «Optimizing diabetes classification with a machine learning-based framework», BMC Bioinformatics, vol. 24, no.1, p. 428, nov. 2023, doi: 10.1186/s12859-023-05467-x.

[3] Md. Maniruzzaman et al., «Accurate Diabetes Risk Stratification Using Machine Learning: Role of Missing Value and Outliers», J. Med. Syst., vol. 42, n.o 5, p. 92, may 2018, doi: 10.1007/s10916-018-0940-7.

[4] OECD, Health at a Glance 2023: OECD Indicators. en Health at a Glance. OECD Publishing, 2023. doi: 10.1787/7a7afb35-en.

[5] N. Obeidat, M. Obeidat, M. Zihlif, S. Ababneh, y I. Yousef, «Machine Learning-Based Classification of Diabetes: Model Accuracy, Feature Importance, and Clinical Implications», Acta Inform. Medica, vol. 33, n.o 4, p. 279, 2025, doi: 10.5455/aim.2025.33.279-283.

[6] OECD, Health at a Glance 2025: OECD Indicators. en Health at a Glance. OECD Publishing, 2025. doi: 10.1787/8f9e3f98-en.

[7] H. Naz y S. Ahuja, «Deep learning approach for diabetes prediction using PIMA Indian dataset», J. Diabetes Metab. Disord., vol. 19, n.o 1, pp. 391-403, jun. 2020, doi: 10.1007/s40200-020-00520-5.

[8] A. Ahmed et al., «Machine Learning Algorithm-Based Prediction of Diabetes Among Female Population Using PIMA Dataset», Healthcare, vol. 13, n.o 1, p. 37, dic. 2024, doi: 10.3390/healthcare13010037.

[9] M. T. Islam et al., «DiaBD: A novel benchmark dataset for diabetes prediction», Alex. Eng. J., vol. 132, pp. 435-455, nov. 2025, doi: 10.1016/j.aej.2025.08.017.

[10] C. C. Olisah, L. Smith, y M. Smith, «Diabetes mellitus prediction and diagnosis from a data preprocessing and machine learning perspective», Comput. Methods Programs Biomed., vol. 220, p. 106773, jun. 2022, doi: 10.1016/j.cmpb.2022.106773.

[11] P. B. Khokhar, C. Gravino, y F. Palomba, «Advances in artificial intelligence for diabetes prediction: insights from a systematic literature review», Artif. Intell. Med., vol. 164, p. 103132, jun. 2025, doi: 10.1016/j.artmed.2025.103132.

[12] N. Nnamoko y I. Korkontzelos, «Efficient treatment of outliers and class imbalance for diabetes prediction», Artif. Intell. Med., vol. 104, p. 101815, abr. 2020, doi: 10.1016/j.artmed.2020.101815.

[13] T. T. Prama, Md. J. Rahman, M. Zaman, F. Sarker, y K. A. Mamun, «DiaBD: A diabetes dataset for enhanced risk analysis and research in Bangladesh», Data Brief, vol. 61, p. 111746, ago. 2025, doi: 10.1016/j.dib.2025.111746.

[14] H. Hu, W. Dong, J. Yu, S. Guan, y X. Zhu, «Utilizing Attention-Enhanced Deep Neural Networks for Large-Scale Preliminary Diabetes Screening in Population Health Data», Electronics, vol. 13, n.o 21, p. 4177, oct. 2024, doi: 10.3390/electronics13214177.

[15] T. Leinonen et al., «Empirical investigation of multi-source cross-validation in clinical ECG classification», Comput. Biol. Med., vol. 183, p. 109271, dic. 2024, doi: 10.1016/j.compbiomed.2024.109271.

[16] R. M. Munshi et al., «Optimising hyperparameters with a tree structured Parzen estimator to improve diabetes prediction», Sci. Rep., vol. 15, n.o 1, p. 35430, oct. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-19295-x.

[17] Y. Unal, «Automated seven-stage diabetic retinopathy grading using optimized deep networks through systematic hyperparameter tuning», Discov. Comput., vol. 29, n.o 1, p. 200, abr. 2026, doi: 10.1007/s10791-026-10091-3.

[18] V. M. Ngo, N. Bharot, F. Donohue, P. M. Kearney, J. G. Breslin, y M. Roantree, «Analyzing and predicting diabetes with deep learning and visual insights», Intell.-Based Med., vol. 14, p. 100368, jun. 2026, doi: 10.1016/j.ibmed.2026.100368.

[19] S. S. Bontha, S. K. R. Jammalamadaka, C. P. Vudatha, S. B. Jammalamadaka, B. K. Duvvuri, y B. C. Vudatha, «Predicting Risk and Complications of Diabetes Through Built-In Artificial Intelligence», Computers, vol. 14, n.o 7, p. 277, jul. 2025, doi: 10.3390/computers14070277.

[20] M. A. Walauskis y T. M. Khoshgoftaar, «Scalable unsupervised labeling with SHAP feature selection for fraud detection in imbalanced data», J. Big Data, vol. 12, n.o 1, p. 236, oct. 2025, doi: 10.1186/s40537-025-01248-w.

[21] E. D. Abel et al., «Diabetes mellitus—Progress and opportunities in the evolving epidemic», Cell, vol. 187, n.o 15, pp. 3789-3820, jul. 2024, doi: 10.1016/j.cell.2024.06.029.

[22] M. A. N. D. Sewwandi, Y. Li, y J. Zhang, «k-outlier removal based on contextual label information and cluster purity for continuous data classification», Expert Syst. Appl., vol. 237, p. 121347, mar. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.121347.
[23] E. Młynarska et al., «Type 2 Diabetes Mellitus: New Pathogenetic Mechanisms, Treatment and the Most Important Complications», Int. J. Mol. Sci., vol. 26, n.o 3, p. 1094, ene. 2025, doi: 10.3390/ijms26031094.
[24] W. Wang et al., «Association of heart rate and diabetes among 0.5 million adults in the China Kadoorie biobank: Results from observational and Mendelian randomization analyses», Nutr. Metab. Cardiovasc. Dis., vol. 31, n.o 8, pp. 2328-2337, jul. 2021, doi: 10.1016/j.numecd.2021.04.015.
[25] G. Aguiar Mesquita Galdino et al., «Heart rate fragmentation is impaired in type 2 diabetes mellitus patients», Diabetes Res. Clin. Pract., vol. 196, p. 110223, feb. 2023, doi: 10.1016/j.diabres.2022.110223.
[26] S. A. Antar et al., «Diabetes mellitus: Classification, mediators, and complications; A gate to identify potential targets for the development of new effective treatments», Biomed. Pharmacother., vol. 168, p. 115734, dic. 2023, doi: 10.1016/j.biopha.2023.115734.

Normalización de los procesos judiciales en Bogotá a través de la Inteligencia Artificial: un enfoque desde la ingeniería industrial

Ever Angel Fuentes Rojas
Facultad de Ingeniería
Universidad Libre
Bogotá, Colombia
orcid.org/0000-0001-9671-5884

Santiago Moreno Alvarez
Facultad de Ingeniería
Universidad Libre
Bogotá, Colombia
orcid.org/0009-0006-4842-1543

Luis Javier Luna Silgado
Facultad de Ingeniería
Universidad Libre
Bogotá, Colombia
orcid.org/0009-0002-8968-3954

Resumen*—La congestión judicial es uno de los problemas estructurales más persistentes del sistema de justicia colombiano y afecta de manera directa el acceso oportuno a la tutela judicial efectiva. Este artículo analiza la normalización de los procesos judiciales en Bogotá como estrategia para reducir cuellos de botella, reprocesos y tiempos de trámite, a partir de herramientas propias de la ingeniería industrial —estandarización de procedimientos, gestión por procesos (BPM), indicadores de desempeño y automatización— combinadas con el uso de la inteligencia artificial (IA). La investigación combina un enfoque descriptivo, uno cualitativo, basado en revisión documental y casos reales de implementación de IA en la Rama Judicial colombiana, y uno cuantitativo, apoyado en estadísticas oficiales del Consejo Superior de la Judicatura y la Corporación Excelencia en la Justicia. Se examinan experiencias concretas como el sistema PretorIA de la Corte Constitucional, los pilotos de IA del Consejo de Estado, el caso del juez de Cartagena que empleó ChatGPT en una decisión de tutela y los recientes pronunciamientos judiciales sobre citas jurisprudenciales inexistentes generadas por IA. Los resultados sugieren que la IA, integrada dentro de procesos judiciales previamente normalizados y bajo supervisión humana, puede reducir significativamente los tiempos de selección y trámite, pero que su implementación sin una base de estandarización de procesos previa incrementa riesgos de error, sesgo y pérdida de trazabilidad.

***Palabras clave*—inteligencia artificial, procesos judiciales, congestión judicial, normalización, ingeniería industrial, gestión por procesos, BPM.**

I. INTRODUCCIÓN

El sistema judicial colombiano enfrenta desde hace más de dos décadas una crisis de congestión que se traduce en procesos que tardan años en resolverse, expedientes acumulados y una percepción ciudadana de ineficiencia e inseguridad jurídica. Bogotá, como sede de las altas cortes y del mayor volumen de despachos judiciales del país, concentra buena parte de esta problemática.

Desde la ingeniería industrial, este fenómeno puede leerse como un problema de procesos mal normalizados: actividades que se repiten sin un estándar único, reprocesos generados por errores evitables y cuellos de botella que limitan la capacidad de respuesta de jueces y despachos. La normalización de procesos —entendida como la definición de procedimientos, tiempos y responsables bajo un único criterio documentado— es precisamente la herramienta que la ingeniería industrial ha utilizado por décadas para resolver problemas estructuralmente similares en manufactura y servicios.

En los últimos años, la inteligencia artificial se ha sumado como un habilitador tecnológico de esa normalización. Sistemas como PretorIA en la Corte Constitucional o los pilotos de clasificación documental del Consejo de Estado muestran que la IA puede reducir drásticamente los tiempos de tareas repetitivas cuando se apoya sobre un proceso ya estandarizado. Sin embargo, casos recientes de uso indebido de IA generativa en la redacción de providencias —incluyendo la cita de jurisprudencia inexistente— evidencian que la tecnología sin un marco de procesos normalizado y sin control humano puede introducir nuevos riesgos en lugar de resolverlos.

El presente artículo tiene como objetivo analizar cómo la normalización de procesos, como disciplina de la ingeniería industrial, constituye la base necesaria para que la inteligencia artificial genere beneficios reales en el sistema judicial bogotano, y documentar experiencias concretas —tanto exitosas como problemáticas— de implementación de IA en la Rama Judicial colombiana entre 2023 y 2026.

II. MARCO CONCEPTUAL

Diferentes términos que se utilizan en la jerga de la ingeniería industrial son aplicables a una gran variedad de ámbitos, y uno de ellos es el ámbito judicial. Para analizar la congestión judicial desde una perspectiva de procesos es necesario precisar algunos conceptos clave.

A. Normalización de procesos

La normalización de procesos consiste en definir, documentar y estandarizar la secuencia de actividades, responsables, tiempos y criterios de decisión de un procedimiento, de manera que este se ejecute siempre bajo el mismo estándar, independientemente de quién lo realice. En el contexto judicial, esto se traduce en protocolos únicos para el reparto de procesos, la notificación de las partes, la elaboración de autos y la gestión documental, entre otros.

Sin normalización previa, cualquier tecnología que se incorpore —incluida la inteligencia artificial— hereda la variabilidad e inconsistencia del proceso original, lo que limita su capacidad de generar mejoras sostenibles.

B. Reproceso y cuellos de botella

Cuando se habla de reproceso, se hace referencia a la repetición de una o más actividades que hacen parte de un proceso y que necesitan ser corregidas por errores o fallas, con el objetivo de recuperar el valor del trabajo realizado.

Una de sus principales causas son los cuellos de botella, es decir, los puntos de un proceso donde se limita la capacidad total del sistema.

En el ámbito judicial, los cuellos de botella se evidencian en tareas repetitivas que deben realizar los abogados y jueces —como la verificación manual de jurisprudencia o la elaboración de fichas de selección de tutelas— mientras que los reprocesos ocurren cuando es necesario repetir una actuación procesal debido a errores, omisiones o infracciones al debido proceso. La consecuencia directa de ambos fenómenos es la prolongación de los términos procesales.

C. BPM y AS IS / TO BE en el contexto judicial

La gestión por procesos de negocio (Business Process Management, BPM) ofrece un marco metodológico para modelar el proceso judicial actual (AS IS), identificar sus ineficiencias y diseñar un proceso futuro optimizado (TO BE) en el que la tecnología, incluida la IA, se incorpora en los puntos donde genera mayor valor. Herramientas de modelado como BPMN —soportadas en motores como Camunda o Bizagi— permiten representar gráficamente el flujo de un proceso judicial, sus actores, sus reglas de negocio (BRE) y sus puntos de interoperabilidad con otras entidades del Estado.

D. Inteligencia artificial como herramienta de apoyo

Para efectos de este artículo, se entiende la inteligencia artificial como un conjunto de técnicas computacionales —incluyendo el aprendizaje automático y los modelos de lenguaje generativo— capaces de ejecutar tareas que tradicionalmente requerían criterio humano, tales como clasificar documentos, extraer información relevante de un expediente o redactar borradores de texto. En el sistema judicial colombiano, el Consejo Superior de la Judicatura ha adoptado esta misma distinción, entre herramientas de IA de apoyo documental o estadístico y herramientas de IA generativa, estas últimas sujetas a un régimen de autorización más estricto.

III. LA CONGESTIÓN JUDICIAL COMO PROBLEMA DE PROCESOS

Nelson Pinilla, expresidente de la Corte Constitucional, parte en su artículo "La crisis del sistema judicial" de una idea central: la justicia nunca será perfecta [1]. Para comprender esta afirmación es necesario entender que la crisis que enfrenta el sistema judicial colombiano obedece a múltiples causas simultáneas, y no a un solo factor.

Entre las causas identificadas por Pinilla se encuentran la falibilidad humana inherente a quienes administran justicia, las deficiencias en la formación de los profesionales del derecho, la baja credibilidad de la ciudadanía hacia la administración de justicia —asociada a percepciones de corrupción, desinformación mediática e inestabilidad normativa— y una responsabilidad compartida entre la Rama Judicial, otros entes gubernamentales que producen normas inestables o improvisadas, y la sociedad misma [1]. Estos factores se traducen en una sobrecarga laboral que se refleja en procesos extensos, reprocesos y, en última instancia, en la congestión judicial.

Frente a estas dificultades, la inteligencia artificial se plantea no como un sustituto del profesional del derecho, sino como un colaborador en las tareas repetitivas generadas por la diversidad y el volumen de los casos atendidos. El objetivo de incorporar IA es reducir los cuellos de botella y reprocesos presentes en los procesos judiciales mediante la automatización de actividades que restan productividad a jueces y abogados, sin remplazar el juicio jurídico que únicamente puede ejercer un ser humano.

IV. TIEMPOS PROCESALES Y ESTADÍSTICAS DE CONGESTIÓN

A. Magnitud del problema

La mora en los procesos judiciales en Colombia se presenta de manera frecuente y se ha convertido en una percepción generalizada entre los ciudadanos que enfrentan algún tipo de proceso judicial. Es común escuchar comentarios relacionados con la excesiva duración de los casos, la falta de resultados efectivos, la ineficiencia institucional e incluso percepciones asociadas a corrupción dentro del sistema. Esta problemática ha generado una creciente desconfianza de la población hacia la administración de justicia y hacia la capacidad del Estado para garantizar procesos ágiles y eficientes.

Esta situación ocurre debido a la alta acumulación de expedientes y al incremento constante de procesos judiciales que ingresan a los juzgados y tribunales del país. Como consecuencia, se generan retrasos significativos en la resolución de conflictos jurídicos. Diversos estudios han señalado que la congestión judicial en Colombia constituye un problema estructural y permanente dentro del sistema de justicia, que afecta directamente la eficiencia operativa de las instituciones judiciales y limita el acceso oportuno de los ciudadanos a la justicia.

La congestión judicial se presenta cuando la cantidad de casos que ingresan en un determinado periodo supera la capacidad de respuesta de jueces, magistrados y despachos judiciales. Esto provoca que muchos procesos tarden varios años en resolverse, afectando el derecho fundamental de los ciudadanos a una justicia pronta, eficaz y transparente. La Corte Constitucional de Colombia se ha pronunciado sobre esta problemática, definiéndola como un fenómeno multicausal que restringe el acceso efectivo a la justicia y vulnera derechos fundamentales como el debido proceso.

B. Causas identificadas

- Exceso de procesos frente al número insuficiente de jueces y despachos judiciales.
- Falta de recursos tecnológicos, humanos y presupuestales.
- Complejidad de los procedimientos judiciales.
- Estrategia dilatoria utilizada por algunas partes involucradas en los procesos.

- Limitada capacidad institucional del Estado para responder al crecimiento constante de demandas judiciales.

C. Estadísticas



Figura 1. Índice de congestión judicial de la Rama Judicial en Colombia. Tomado de la Corporación Excelencia en la Justicia, CEJ (2026) [2].

La primera gráfica ("Gestión de procesos judiciales") muestra los ingresos efectivos de procesos judiciales, los egresos efectivos y el total de inventario inicial; es decir, cuántos procesos no se resolvieron en cierto año en comparación con los procesos que ingresaron para ser resueltos en ese mismo año.

Según los datos de la misma fuente, el comportamiento de la congestión de la Rama Judicial en Colombia a lo largo de 11 años indica que el punto máximo se alcanzó en 2020, durante la pandemia, con 61,5% de congestión. A pesar de una reducción de 8,6 puntos porcentuales en cuatro años, el índice de congestión no ha logrado bajar del 40% en los últimos ocho años, lo que evidencia un retraso estructural en el sistema judicial que ninguna mejora aislada de productividad ha logrado revertir [2].

V. INNOVACIÓN, RIESGOS Y CASOS REALES DE IA EN LA RAMA JUDICIAL COLOMBIANA

La innovación y el desarrollo tecnológico han modernizado la forma en que se imparte justicia en distintos sistemas judiciales del mundo. El desarrollo y la modernización de las instituciones de justicia varía según el contexto y la latitud [3], lo que permite entender que la labor judicial —con miles de años de práctica— no es ajena al uso de tecnologías emergentes. Estas tecnologías suelen clasificarse en dos niveles: tecnología instrumental, orientada a digitalizar y automatizar tareas administrativas, y tecnología funcional, orientada a apoyar directamente el razonamiento y la toma de decisiones jurídicas.

A. PretorIA y los pilotos del Consejo de Estado

El caso más documentado de IA judicial en Colombia es PretorIA, el sistema desarrollado por la Corte Constitucional en conjunto con la Universidad del Rosario y el laboratorio IALAB de la Universidad de Buenos Aires entre 2018 y 2021 [3]. PretorIA nació como evolución del proyecto Prometea y fue concebido para apoyar la selección de las más de 600.000 acciones de tutela que ingresan anualmente a revisión de la Corte, identificando mediante técnicas de aprendizaje estadístico y modelado temático los expedientes que cumplen criterios de relevancia constitucional para su revisión prioritaria [4].

El impacto en tiempos ha sido significativo: distintas fuentes reportan que el proceso de selección de casos urgentes pasó de tomar alrededor de 96 días a apenas un par de minutos, con el sistema generando en 16 minutos documentos que antes tomaban más de dos horas a un funcionario experimentado [5]. Es relevante destacar que, tras una primera versión basada en redes neuronales, PretorIA fue rediseñado en 2020 para utilizar modelos de tópicos interpretables, precisamente para garantizar mayor explicabilidad y mantener la decisión final de selección en manos de los magistrados [4].

De manera paralela, el 18 de enero de 2021 el Consejo de Estado presentó dos pilotos de inteligencia artificial ante su Sala de Gobierno, orientados al manejo de sentencias relacionadas con propiedad industrial (marcas y patentes) en la Sección Primera, y con procesos de nulidad electoral en la Sección Quinta [3]. Estos pilotos, igualmente desarrollados con apoyo de la Universidad del Rosario y el IALAB, evidencian que la incorporación de IA en las altas cortes colombianas no ha sido un hecho aislado, sino un esfuerzo institucional sostenido durante varios años.

B. El caso del juez de Cartagena y el fallo de la Corte Constitucional

En enero de 2023, un juez de Cartagena incorporó respuestas generadas por ChatGPT a una decisión de tutela mediante la cual resolvía si un niño con trastorno del espectro autista debía pagar cuotas moderadoras y copagos para acceder a sus terapias de rehabilitación [6]. El juez consultó a la herramienta preguntas como si un menor con autismo estaba exento de pagar dichas cuotas, y transcribió las respuestas obtenidas como parte de la motivación de su decisión.

El caso llegó en revisión a la Corte Constitucional, que en agosto de 2024 concluyó que no se había vulnerado el debido proceso, en la medida en que el juez había definido primero su tesis, identificado las normas y la jurisprudencia aplicable y resuelto el caso de fondo, y solo después de ello había consultado la IA, sin que esta sustituyera el razonamiento judicial [6]. No obstante, la Corte fue enfática en advertir que los jueces no deben depender excesivamente de los sistemas

de IA generativa, pues ello podría comprometer el derecho al debido proceso y la independencia judicial, y ordenó al Consejo Superior de la Judicatura crear espacios de formación sobre IA y publicar pautas integrales de uso en un plazo de cuatro meses [7].

Este pronunciamiento —calificado como histórico por organismos como la UNESCO, que acompañó el proceso a través de su Red de Expertos sobre IA y Estado de Derecho— marcó un precedente regional sobre los límites del uso de IA generativa en la motivación de decisiones judiciales, estableciendo principios de transparencia, verificación y no sustitución de la racionalidad humana [7].

C. El Acuerdo PCSJA24-12243: normalización normativa del uso de IA

Como respuesta directa a estos episodios, el Consejo Superior de la Judicatura expidió el 16 de diciembre de 2024 el Acuerdo PCSJA24-12243, mediante el cual se adoptan lineamientos para el uso y aprovechamiento respetuoso, responsable, seguro y ético de la inteligencia artificial en la Rama Judicial [8]. El Acuerdo aplica a magistrados, jueces y empleados de todas las jurisdicciones, así como a directores y empleados de las dependencias administrativas, y distingue entre el uso de IA no generativa —de libre disposición para apoyo de labores— y el uso de IA generativa, que solo puede emplearse a través de herramientas determinadas, provistas o avaladas por el propio Consejo Superior de la Judicatura [9].

Para la presidenta del Consejo Superior de la Judicatura, Diana Alexandra Remolina Botía, estos lineamientos constituyen "el primer impulso al uso de la IA con autocontrol", concebidos como reglas que deben evolucionar conforme avance la tecnología, la normatividad y la jurisprudencia [10]. Desde una perspectiva de ingeniería industrial, este Acuerdo cumple precisamente la función de normalizar el proceso de adopción tecnológica: define roles, responsabilidades, deberes de verificación y mecanismos de seguimiento, evitando que cada despacho judicial incorpore IA bajo criterios distintos.

D. Sentencias inexistentes: el riesgo de la IA sin procesos normalizados

La advertencia de la Corte Constitucional sobre la dependencia excesiva de la IA se materializó en casos posteriores. En noviembre de 2025, la Corte Suprema de Justicia anuló, por primera vez en el país, una decisión judicial del Tribunal Superior de Sincelejo que había citado apartes de dos sentencias —identificadas como STC13560-2023 y STC4734-20— que no existían dentro del archivo judicial de la propia Corte [11]. La providencia conecta este episodio con debates internacionales sobre las llamadas "citas alucinadas", ya examinadas en tribunales de Estados Unidos, Canadá, Israel, Brasil y la Unión Europea [11].

Un caso similar y más reciente fue resuelto por el Consejo de Estado en junio de 2026, al estudiar un recurso extraordinario de unificación de jurisprudencia en el que el abogado recurrente citó sentencias que, al ser verificadas, resultaron inexistentes o no correspondían a los datos del expediente, presumiblemente generadas por una herramienta de IA generativa [12]. El Consejo de Estado fue claro en señalar que la IA puede servir de apoyo para buscar, organizar y procesar información, pero no remplaza el deber de verificación ni la responsabilidad profesional de jueces y abogados sobre lo que presentan o deciden, y ordenó remitir el expediente a la Comisión Seccional de Disciplina Judicial de Bogotá para evaluar una posible falta disciplinaria [12].

Estos episodios ilustran, desde la óptica de la ingeniería industrial, lo que ocurre cuando una tecnología se inserta en un proceso que carece de puntos de control normalizados: el error no se contiene, se propaga. La ausencia de un protocolo obligatorio de verificación cruzada de citas jurisprudencial —es decir, de un punto de control de calidad dentro del flujo de redacción de la providencia— permitió que una alucinación del modelo de lenguaje llegara hasta la decisión final.

E. Experiencias internacionales de referencia

La experiencia colombiana no está aislada. En Brasil, el sistema VICTOR AI automatiza ante la Corte Suprema de Justicia la verificación de si un recurso cumple los requisitos de "repercusión general" necesarios para su trámite, reduciendo una tarea que tomaba 44 minutos a un funcionario a apenas segundos de procesamiento [13]. El Consejo Superior de Justicia Laboral de Brasil lanzó además, en febrero de 2025, la herramienta Chat-JT, que automatiza tareas de investigación jurídica y redacción de resúmenes estandarizados para jueces y personal judicial [13]. Estos casos confirman que, cuando la IA se aplica sobre tareas previamente normalizadas y bien delimitadas —como la verificación de un requisito formal específico— los resultados en eficiencia son consistentes y replicables.

VI. HACIA UNA NORMALIZACIÓN DE PROCESOS JUDICIALES ASISTIDA POR IA

A partir de la evidencia recogida, este artículo propone que la incorporación de inteligencia artificial en los procesos judiciales de Bogotá debe seguir una secuencia metodológica propia de la ingeniería industrial, antes que una adopción tecnológica aislada:

1. Levantamiento AS IS: modelar mediante notación BPMN el proceso judicial actual —por ejemplo, el reparto y la selección de tutelas, o la elaboración de un auto admisorio— identificando actividades, tiempos, responsables y puntos de reproceso.
2. Identificación de cuellos de botella: aplicar herramientas de análisis de capacidad y diagramas de causa-efecto (Ishikawa) para localizar los puntos donde se concentra la mayor parte del tiempo de ciclo del proceso.
3. Estandarización del proceso (normalización): documentar un único procedimiento, con reglas de negocio (BRE) explícitas, antes de introducir cualquier herramienta tecnológica.
4. Selección del punto de incorporación de IA: identificar, dentro del proceso ya normalizado, las actividades repetitivas, de alto volumen y bajo nivel de discrecionalidad jurídica —como la clasificación

documental o la verificación de requisitos formales— como candidatas prioritarias para automatización con IA, replicando el enfoque de PretorIA y de VICTOR AI.

5. Diseño TO BE con puntos de control humano: definir explícitamente los puntos del flujo donde un humano debe validar la salida de la IA antes de que esta tenga efectos procesales, como medida de control de calidad frente al riesgo de alucinaciones.
6. Medición y mejora continua: establecer indicadores de desempeño (tiempos de ciclo, tasa de reproceso, índice de congestión) que permitan evaluar de manera objetiva si la incorporación de IA está reduciendo efectivamente la congestión judicial, en línea con los mecanismos de seguimiento previstos en el Acuerdo PCSJA24-12243 [9].

Esta secuencia evidencia que la inteligencia artificial no sustituye el trabajo de normalización: lo presupone. Los casos exitosos documentados en este artículo —PretorIA, los pilotos del Consejo de Estado, VICTOR AI— comparten la característica de haberse desarrollado durante varios años de trabajo conjunto entre ingenieros, juristas y la institución judicial, con fases piloto y de prueba de concepto antes de su despliegue. Por el contrario, los casos problemáticos —el uso no supervisado de ChatGPT y las citas jurisprudenciales inexistentes— corresponden a un uso individual e improvisado de herramientas de IA generativa, sin un proceso normalizado ni puntos de control que advirtieran el error antes de que este llegara a una decisión judicial.

VII. CONCLUSIONES

La congestión judicial en Bogotá y en Colombia es un problema estructural y multicausal que combina factores normativos, presupuestales, organizacionales y humanos. Los datos de la Corporación Excelencia en la Justicia muestran que, a pesar de mejoras puntuales, el índice de congestión se ha mantenido por encima del 40% durante los últimos ocho años, lo que evidencia que las soluciones aisladas no han sido suficientes.

La inteligencia artificial ofrece una oportunidad real de reducir cuellos de botella y reprocesos, como lo demuestran experiencias documentadas como PretorIA, los pilotos del Consejo de Estado y sistemas internacionales como VICTOR AI en Brasil. Sin embargo, los casos del juez de Cartagena, del Tribunal Superior de Sincelejo y del recurso resuelto por el Consejo de Estado en 2026 muestran que la IA, aplicada sin un proceso previamente normalizado y sin puntos de control humano explícitos, introduce riesgos de error, sesgo y pérdida de confiabilidad que pueden ser más costosos que el problema que pretende resolver.

Desde la ingeniería industrial, la lección central es que la normalización de procesos no es un paso opcional ni posterior a la incorporación tecnológica, sino su condición de posibilidad. El Acuerdo PCSJA24-12243 expedido por el Consejo Superior de la Judicatura representa, en este sentido, un primer ejercicio de normalización a nivel normativo del uso de IA en la Rama Judicial, que debería complementarse con ejercicios de modelado de procesos AS IS/TO BE en cada despacho y jurisdicción, de manera que la inteligencia artificial se incorpore como un colaborador del trabajo jurídico humano, y no como un sustituto no controlado de su criterio.

REFERENCIAS

[1] N. Pinilla Pinilla, "La crisis del sistema judicial," Vniversitas, no. 105, pp. 375–414, jun. 2003.

[2] Corporación Excelencia en la Justicia (CEJ), "Índice de congestión judicial de la Rama Judicial en Colombia," Bogotá, 2026.

[3] G. Sierra Cadena, "Implementación de la Inteligencia Artificial en las Altas Cortes de Colombia: los casos de la Corte Constitucional y el Consejo de Estado," Rev. Eurolatin. Derecho Adm., vol. 11, no. 1, e253, ene./jun. 2024. DOI: 10.14409/redoeda.v11i1.13824.

[4] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), "IA en la administración y acceso a la justicia," en Gobernar con la inteligencia artificial, OCDE/CAF, 2025.

[5] "Inteligencia Artificial y Administración de Justicia," Protección Data, 2024. [En línea].

[6] "La IA en procesos judiciales en Colombia: casos y retos," FEPASDE, sep. 2025. [En línea].

[7] UNESCO, "Inteligencia Artificial en la sala de audiencias: fallo histórico de la Corte Constitucional de Colombia," ago. 2024. [En línea].

[8] Consejo Superior de la Judicatura, Acuerdo PCSJA24-12243, "Por el cual se adoptan lineamientos para el uso y aprovechamiento respetuoso, responsable, seguro y ético de la inteligencia artificial en la Rama Judicial," Bogotá, 16 dic. 2024.

[9] Rama Judicial de Colombia, "Consejo Superior de la Judicatura expidió lineamientos para el uso responsable y seguro de la IA generativa en la Rama Judicial," Bogotá, dic. 2024. [En línea].

[10] D. A. Remolina Botía, declaraciones con ocasión de la expedición del Acuerdo PCSJA24-12243, Consejo Superior de la Judicatura, Bogotá, dic. 2024.

[11] "Histórico fallo de la Corte Suprema sobre el uso de la IA en Colombia: por primera vez anuló una decisión judicial apoyada en citas falsas," Infobae Colombia, 12 nov. 2025. [En línea].

[12] "Abogado inventó sentencias con ChatGPT y el Consejo de Estado fijó reglas para usar la inteligencia artificial en la justicia," Infobae Colombia, 9 jun. 2026. [En línea].

[13] Supreme Court of Brazil, "VICTOR AI: inteligencia artificial para el examen de recursos," en OCDE, Gobernar con la inteligencia artificial, 2025.

Assessment of a Dust Control Additive for Unpaved Roads in Panama

1st María Tejedor-Mendoza
Department of Civil Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Santiago, Panamá
maria.tejedor1@utp.ac.pa

2nd Andrea Giron
Department of Civil Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Santiago, Panamá
andrea.giron@utp.ac.pa

3rd Aníbal Santos
Department of Civil Engineering
Universidad Tecnológica de Panamá
Santiago, Panamá
anibal.santos@utp.ac.pa

***Abstract*— Panama has a significant percentage of its road system in unpaved condition, creating a substantial issue due to dust emissions from vehicular traffic and wind, particularly during the dry season. Residents living near these unpaved roads attempt to mitigate the problem by implementing temporary and unsustainable approaches such as water spraying and improvised speed bumps. These techniques are not only ineffective in mitigating the problem, but they also affect the resources that communities have. There are sustainable dust control treatments; however, the lack of published scientific data on their performance and technical specifications limits their use in Panama. Hence this research is focused on assessing the performance of a calcium lignosulfonate-based additive as a sustainable method to mitigate dust generation on unpaved roads in rural areas of Panama by implementing laboratory and field testing in different scenarios. Laboratory testing included characterizing different soil types and used those results for developing lab-controlled simulations of air exposure and traffic flow to assess dust emissions and surface degradation in treated soils. On the other hand, field monitoring was conducted in a test track in Santiago, Veraguas, Panama, where particulate matter concentrations (PM2.5 and PM10) were measured to evaluate the additive field performance. The laboratory and field test results demonstrated that applying calcium lignosulfonate-based additive to an unpaved road surface improves soil particle bonding and stability, reduces dust emissions, and decreases the need for frequent maintenance. Also, high-speed traffic and wind were found to play a significant role in reducing the longevity of superficial dust control treatments, which contributes to the understanding of calcium lignosulfonate-based treatment under combined environmental and traffic loading conditions. Finally, this research supports the development and implementation of more effective and sustainable dust control strategies for unpaved roads in Panama.**

Keywords: (Dust, suppressant, sustainable, unpaved, roads)

I. Background

In Panama, unpaved roads constitute about 58% of the network, posing challenges to nearby communities [1]. As the road network grows, this option is widely used due to its low cost and ease of construction. However, these types of roads produce dust suspension, as the nearby communities attempt to mitigate this issue with inefficient techniques such as improvised speed bumps (made of tree branches, thick ropes or soil), periodic water spraying (contributes to unsustainable practices), and adding gravel to the road. The last technique is mostly used by local government entities, but it fails to address the primary cause that is soil fines content [2][3]. Fines control the mechanical behavior of these roads through load transfer, drainage, and deformation capabilities. These directly control pavement durability, stability, and permeability, with civil engineering implications.

Panama has two seasons: dry and rainy. During the dry season (typically from January to April), unpaved road surfaces vastly reduce their moisture content, becoming loose (fine particles) and generating dust. Also, according to data collected by IMHPA (Institute of Meteorology and Hydrology of Panama), the monthly average wind speed during January in the area is 30.9 km/h, and reaches a maximum of 68.4 km/h. The previously mentioned data corresponds to winds in the 2m range [4]. Therefore, these dried fine particles are easily lifted by wind and vehicular traffic, affecting pedestrians and the local area by creating dust clouds that extend meters away, and generating considerable risk for air pollution [5].

Current dust control methods are limited, especially in tropical climates such as Panama's. Water spraying utilizes a limited natural resource to obtain temporary relief (typically less than a day) from particulate matter emissions, resulting in an ineffective solution [6]. Using gravel in the soil also provides an extremely short-lived relief, since heavy traffic aids in the mixing of gravel with the soil (high in fines content) [7]. Other unconventional methods are the use of speed bumps made of different materials to slow down the speed of vehicles. However, none of these methods are effective in providing a more sustainable and lasting solution to the affected communities.

Recent research in this field has focused on dust suspension in the earthwork sector, mining, and agriculture during material transportation and other vehicular traffic activities [8][9][10]. Some of these studies mention the term "anthropogenic dust", which is described as particulate matter produced by human activities [11], which is directly linked to the subject of this study. For dust suppressants, field testing is less common since it is difficult to obtain quantitative results without proper equipment, but some studies propose different alternatives that include both quantitative and qualitative evaluations [12]. This research aims to target a gap in research on a chemical dust suppressant, specifically a calcium lignosulfonate-based additive [13]. The additive integrates with soil particles without adversely affecting groundwater [14]. It is relevant to note that an investigation of this nature has not been done in Panama.

The main objective of this research, aside from the assessment of the performance of the additive itself, is to determine whether different variables (wind and traffic) play a role in treatment effectiveness over time. Moreover, distinct phases of experimentation were conducted to approach this hypothesis, and the results were compared.

Two different communities (located in La Peña and Guayaquil in Santiago de Veraguas, Panama) were chosen to be investigated in this research because both communities suffer from uncontrollable airborne dust emissions during the year, specifically during the dry season. Therefore, this characteristic provides ideal conditions for this research, since the current problem of dust suspension in Guayaquil and La Peña's communities is illustrated in Fig. 1.



Fig. 1. Guayaquil and La Peña's communities affected by airborne dust emissions

II. Methodology

The methodology presented in this study was divided into two sections for the evaluation of a calcium lignosulfonate-based chemical dust suppressant: laboratory and field testing.

The laboratory phase was conducted to characterize the soil samples and assess the additive's behavior in a controlled environment. This allowed for the observation of dust suspension caused by wind and vehicular traffic, while excluding external variables. Field testing was then performed to validate laboratory results under real wind and traffic conditions.

The implementation of both phases enabled laboratory experimentation, which allowed for the gathering of qualitative and quantitative results regarding the reduction of particulate matter emissions from unpaved roads.

A. Laboratory Analysis

This phase aimed to characterize the soil material and examine characteristics like the effectiveness of the calcium lignosulfonate-based suppressant under controlled conditions. The following experimental setups were prepared for simulating wind exposure and traffic loading: an acrylic box for wind-flow simulations and a wooden track for traffic simulations.

As the field application test track was chosen, soil samples were extracted and characterized for laboratory analysis. This included granulometric analysis, and Atterberg limits were carried out according to ASTM standards [15]. These tests determined the fines content and plasticity parameters of the soil in the chosen area.

Once the soil was characterized, samples were sieved using No. 16, No. 30, and No. 40 mesh sieves. The material passing the No. 30 sieve was used in the acrylic box for laboratory simulations, with the objective of reproducing the fine particles responsible for generating dust emissions from unpaved roads.

An acrylic box with dimensions of 0.30m x 0.30m x 0.46 m was developed to be used to recreate wind conditions, allowing for more particulate matter readings using an air quality monitor, as illustrated in Fig. 2. Airflow inside the chamber was generated using a fan, while progressively increasing its speed to simulate the typical wind speed (between 30 to 60 km/hr.) during the dry season in the investigated area. Measurements were taken under untreated conditions, one day and seven days after adding the product. This was done to evaluate short-term performance over a period.



Fig. 2. Acrylic box used for replicating airflow at a smaller scale

The suppressant was applied on the soil surface inside the box using a handheld spray bottle with an application rate of 1 L/m^2. The tests were conducted three times over 15-minute time intervals, to ensure the reliability of the results. Comparisons were conducted between treated and untreated conditions of the substance's effects in reducing airborne dust emissions.

For replicating vehicular traffic and surface degradation, a wooden track with dimensions of 4m x 0.60m x 0.30m was designed and filled with soil extracted from one of the chosen areas, in representation of unpaved road conditions in Fig. 3. Traffic loading was performed using a remote-control vehicle, which was driven across it several times, reproducing the tire's effect on dust suspension and the durability of the treatment. The track was monitored, and the product was then added to the center of the path on an area of 0.60m x 2m, leaving "unpaved" conditions on either side.



Fig. 3. Wooden track used for the replication of the field conditions

As shown in Fig 4, particulate matter measurements were registered when the remote-control vehicle passed by the air quality monitor. This was conducted before and after treatment with the calcium lignosulfonate-based additive.



Fig. 4. Particulate matter readings taken in the wooden track with a passing remote-controlled vehicle

B. Field Testing

To validate laboratory results, field testing was conducted under real environmental and traffic conditions in a selected area of La Peña, Santiago de Veraguas, Panamá. La Peña was chosen due to its social implications, since the road leads to residential areas and the local high school. The field application was performed on a pilot test track with dimensions of 5.70m x 27m exposed to wind and vehicular circulation, as indicated in Fig. 5. Before treatment with the additive, baseline measurements of particulate matter were registered as the area was being monitored. The product was then applied at the same rate of 1 L/m^2, as done in the laboratory.



Fig. 5. Pilot test track in La Peña

III. Results

The preliminary readings of particulate matter 2.5 (PM2.5) and 10 (PM10) that were taken with an air quality monitor suggested the polluting presence of these in the selected study areas. In communities like La Peña and Guayaquil, those were extremely high.

In the case of La Peña, concentrations of PM2.5 reach 190 µg/m^3 and PM10 290 µg/m^3, as shown in Fig. 6. Correspondingly, in Guayaquil, previously mentioned concentrations of PM2.5 and PM10 reach 249 µg/m^3 and 396 µg/m^3, respectively. The average temperature during monitoring oscillated between 30°C and 40°C, characteristic of the dry season. This information was obtained before the application of the chemical dust suppressant.

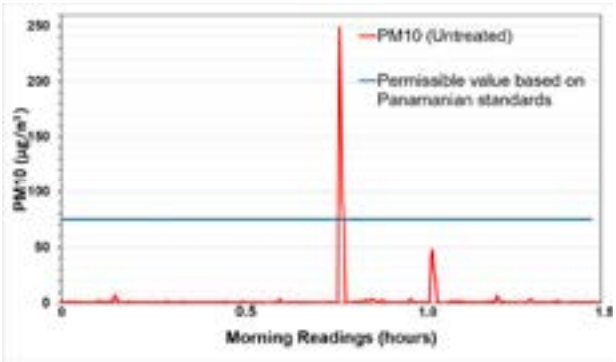


Fig. 6. PM 2.5 and PM10 levels in Guayaquil taken during preliminary monitoring

In Panama, the levels of PM2.5 and PM10 in 24h exposure must not be higher than 37.5 and 75, respectively [16].

As shown in Fig. 7, the levels of those particles in the sample correspond to the acrylic box. The measurements were taken prior to and after treatment. It's necessary to mention that the samples from La Peña were the ones used in this part of the evaluation. The levels for the untreated soil surpassed the threshold for the permissible value according to Panamanian standards.

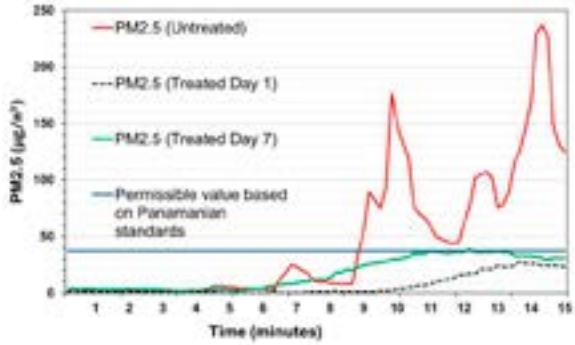


Fig. 7. Particulate matter 2.5 readings taken in a controlled environment (acrylic box)

Subsequently, in the wooden track, samples from Guayaquil were utilized. The measurements of P.M 2.5 in the aforementioned conditions were elevated as well, as indicated in Fig. 8, with the difference in the recreation of traffic playing a role as a variable.

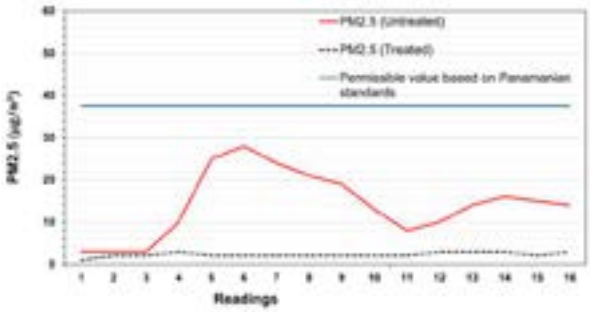


Fig. 8. Particulate matter 2.5 readings taken in a controlled environment (wooden track)

The analysis undertaken after the application of the calcium lignosulfonate-based additive revealed, in both laboratory and field observations, that the difference between treated and untreated surfaces was significant, as is evident in Fig. 9.

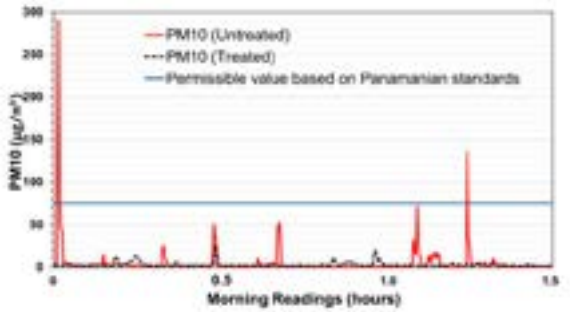


Fig. 9. Particulate Matter 10 readings taken in pilot test track in La Peña

IV. Conclusions

The findings of this study suggest the following conclusions:

- **Potential of a calcium lignosulfonate-based additive:** the utilization of this chemical dust suppressant allowed the decrease of airborne dust particles present in unpaved surfaces. It improves air quality and does not negatively impact groundwater, both of which are vital elements for use in residential and populated areas, as they were the focus of this research.
- **Practical dust mitigation strategy**: the usage of the preceding additive represents a scalable and sustainable airborne dust control solution, highlighting its capability in civil engineering areas.
- **Qualitative observations:** there was a noticeable reduction in airborne dust generation on the treated surface in comparison to the untreated one. The former exhibited improved particle cohesion, shown in photographic evidence in its behavior. Nonetheless, since during the dry season the soil has low moisture content, cracking on the surface was exhibited over time.
- **Quantitative analysis:** the recorded data indicates that the additive is effective in the reduction of PM2.5 and PM10 to under normal limits. The conduct of traffic in the area also influenced the results, since the wet film left behind on the treated surface allowed drivers to think the road was wet and pass at higher speeds, contaminating the area at a faster rate.

It is also important to emphasize that different limitations are identified throughout the experimental procedure of this research, including the incorrect size of the remote-controlled vehicle, an uncertified air quality monitor, a short monitoring period, fine particle contamination in the treated area of a small road section attributable to wind erosion and traffic stream, therefore reducing the additive's life span.

Finally, further studies are encouraged to explore different variables in the functionality of the chemical dust suppressant, evaluating how fines contamination proceeding from nearby areas affects the overall performance of the additive. Additionally, deepening and expanding future study regions.

Acknowledgment

The authors thank Erosion Panamá and Humicorp for providing the dust mitigation product used in this investigation. This work was developed at the Universidad Tecnológica de Panamá, with the support of the Laboratorio de Suelos y Materiales (LASYMA).

References

[1] Ministerio de Obras Públicas, "Rehabilitación, mejora y mantenimiento de la Carretera Panamericana Oeste," Panamá, Jul. 2022.

[2] C. Turan, A. A. Javadi, R. Vinai, and R. Beig Zali, “Geotechnical characteristics of fine-grained soils stabilized with fly ash: A review,” Sustainability, vol. 14, no. 24, 2022, doi: 10.3390/su142416710.

[3] S. Huang and X. Gong, “Effect of fines content on the compression behavior of calcareous sand,” Applied Sciences, vol. 14, no. 22, 2024, doi: 10.3390/app142210457.

[4] “Datos Diarios - Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá.” Accessed: May 06, 2026. [Online]. Available: https://www.imhpa.gob.pa/es/datos-diarios?estacion=7&mes=1&ano=2026

[5] L. Castro et al., “Guía de producción mas limpia para el sector construcción,” 2008.

[6] H. Sun, Y. Liu, T. Jiang, T. Liu, and D. Liu, “Application of dust control method based on water medium humidification in tunnel drilling and blasting construction environment,” Build. Environ., vol. 234, p. 110111, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110111.

[7] S. Morales and I. E. Zuniga, “Impact of fines on various base material properties,” Transp. Res. Rec., vol. 2677, no. 11, pp. 367–374, 2023, doi: 10.1177/03611981231166389.

[8] Q. Luo, L. Huang, Y. Liu, X. Xue, F. Zhou, and J. Hua, “Monitoring study on dust dispersion properties during earthwork construction,” Sustainability, vol. 13, no. 15, 2021, doi: 10.3390/su13158451.

[9] D. Brauer, A. Giubergia, and V. Gil-Costa, “Products evaluation for controlling environmental dust in mining roads ,” Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, vol. 35, no. 2, pp. 165–182, Apr. 2019, doi: 10.1002/pros.21091.

[10] T. M. Zobeck and R. S. Van Pelt, “Wind-induced dust generation and transport mechanics on a bare agricultural field,” J. Hazard. Mater., vol. 132, no. 1, pp. 26–38, 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.090.

[11] S. Chen et al., “Anthropogenic dust: sources, characteristics and emissions,” Environmental Research Letters, vol. 18, no. 10, p. 103002, Sep. 2023, doi: 10.1088/1748-9326/acf479.

[12] A. Ulate Castillo and C. Vargas Sobrado, “Control de polvo en caminos no pavimentados,” Mar. 2018, Lanamme UCR, San Pedro.

[13] X. Ouyang, X. Qiu, and P. Chen, “Physicochemical characterization of calcium lignosulfonate—A potentially useful water reducer,” Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp., vol. 282–283, pp. 489–497, 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.12.020.

[14] X. Du, Q. Wu, Q. Ma, Y. Tian, and J. Zhang, “Study on strengthening and waterproofing mechanism of calcium lignosulfonate in silty soil sites,” Coatings, vol. 13, no. 8, 2023, doi: 10.3390/coatings13081402.

[15] “Test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis,” Jul. 01, 2009, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D6913-04R09E01.

[16] G. Oficial, “Gaceta Oficial Digital,” Panama, Jan. 2023. Accessed: Nov 03, 2025. [Online]. Available: https://www.minsa.gob.pa/normatividad/resolucion-ndeg-021-de-martes-24-de-enero-de-2023-por-la-cual-se-adoptan-como-valores

Multisalto: A mobile application for post-disaster communication based on a multihop ad-hoc network of smartphones

Sergio Galindo
Dept. of Systems Engineering
Antonio Nariño University
Bogota, Colombia
sgalindo93@uan.edu.co

Katherine Buitrago
Dept. of Systems Engineering
Antonio Nariño University
Bogota, Colombia
kbuitrago58@uan.edu.co

David Rey
Dept. of Systems Engineering
Antonio Nariño University
Bogota, Colombia
drey83@uan.edu.co

Heidy Jimenez
Dept. of Graphic Design
Antonio Nariño University
Bogota, Colombia
hjimenez42@uan.edu.co

Juan Camilo Ramírez
Dept. of Systems Engineering
Antonio Nariño University
Bogota, Colombia
juan.ramirez@uan.edu.co

Elio Cables
Dept. of Systems Engineering
Antonio Nariño University
Bogota, Colombia
ehcables@uan.edu.co

Jaime Vallejo
Dept. of Graphic Design
Antonio Nariño University
Bogota, Colombia
jvallejo40@uan.edu.co

***Abstract*—Traditional communications often fail during disasters, making infrastructure-free coordination vital. This paper presents Multisalto, an Android application that creates spontaneous ad hoc networks via Wi-Fi Direct. It enables group chat functionality without internet access, cellular signal, or prior device pairing. To extend coverage, the system implements a controlled flooding algorithm for multihop retransmission, utilizing unique 128-bit identifiers and timestamps to mitigate the "broadcast storm" problem. The interface was developed using User-Centered Design (UCD) to counteract physiological effects like "tunnel vision" experienced during emergencies. By applying Miller's Law for information chunking and Fitts' Law for ergonomic button placement, the design ensures accessibility for single-handed use under high stress. Field tests with devices running Android 10–14 confirmed 100% message propagation success across multihop chains up to 200 meters, even through natural obstructions. This interdisciplinary solution provides a resilient, accessible communication alternative for critical post-disaster scenarios.**

Keywords—Multihop Ad-Hoc Networks, Post-Disaster Communication, Wi-Fi Direct, User-Centered Design (UCD), Controlled Flooding Algorithm.

I. Introduction

In emergency situations where telecommunications are compromised, wireless ad-hoc networks emerge as a viable solution [1]. In general terms, an ad-hoc network is defined as "a wireless network that allows easy connection establishment between wireless client devices in the same physical area without the use of an infrastructure device, such as an access point or base station" [2]. In an ad-hoc network, there is no centralized management; nodes share the same hierarchy and can cooperate with each other by forwarding or retransmitting their packets, potentially involving numerous intermediate relay nodes. This allows a node that is not directly within range of another to communicate through intermediate relays without increasing transmission power [3].

On top of this connectivity provided by the ad-hoc network, a communication model known as peer-to-peer (P2P) can be implemented. In this model, several interconnected devices share resources directly with each other without relying on a central server. Each device within the network is called a node and can act as both sender and receiver of information, provided it uses the same software or application to establish communication [4].

The Multisalto mobile application is software designed to spontaneously form an ad-hoc network of smartphones. It can be used on phones running Android version 10 or higher. The application enables a group chat among all devices that form the ad-hoc network and have the application installed and active. The chat is group-based, with the purpose of keeping all people in the disaster area connected. The application is easy to use, specifically designed for people without technical knowledge who are in a high-stress situation. Under these conditions, people have noticeable difficulties using technology, which is why designing an application suitable for such circumstances is both a technical and graphical challenge.

Multisalto seeks to provide an effective communication alternative in situations where traditional networks cease to function, such as after a natural disaster. Its purpose is to maintain the flow of information among affected persons, facilitating coordination and timely assistance. For this reason, the development of a clear interface and a stable algorithm based on ad-hoc networks is fundamental, as both allow for simple navigation and a quick user response even in moments of high tension.

TABLE I. COMPARISON OF AD-HOC COMMUNICATION APPLICATIONS

App name	Connection type	Single-hop or multihop	Main focus	Limitations / Range
Multisalto	Wi-Fi Direct	Multihop	Disaster communication with intuitive interface and local message storage	Does not encrypt user information
Briar [5]	Bluetooth / Wi-Fi / Tor network	Multihop	Secure and private communication in critical security contexts	Limited range; technical interface aimed at advanced users
Bridgefy [6]	Bluetooth	Multihop	Communication at events or emergencies without internet	Has a premium option that restricts access to all features
Bitchat [7]	Bluetooth	Multihop	Encrypted messaging and natural disasters	High energy consumption (requires disabling battery optimization)
Conecta2 [8]	Wi-Fi Direct / Bluetooth	Singlehop	Communication between rescuers and survivors; text, photo, and audio	Range dependent on technology used; high battery consumption

With this in mind, the application's design is primarily aimed at people under high stress loads, as commonly occurs in post-disaster scenarios. For this reason, the interface aims to be simple and intuitive, allowing users to easily operate it even under pressure. The application uses Wi-Fi Direct to establish connections between devices, which allows for greater range compared to Bluetooth-only solutions. Additionally, it requires no prior registration or internet connection; the user only needs to enter their name to begin using it. Once devices are connected, users can send and receive messages within the network, which can also be relayed by nearby devices to extend the reach of communication.

The main contributions of the Multisalto application are:

- A decentralized communication system based on ad-hoc networks that allows messages to be sent and relayed between nearby devices without requiring an internet connection or network infrastructure.
- A lightweight and efficient application that automatically establishes a group chat among connected devices, without requiring manual contact addition or complex user configurations.
- A multihop communication mechanism, whereby messages can be relayed by other network devices, significantly extending the reach of communication and ensuring message delivery even when senders and receivers are not within direct coverage range.
- An intuitive and visually clear interface, optimized for emergency contexts where users may be under high levels of stress. This approach seeks to minimize cognitive load and promote quick response in critical situations.
- A contextual identification model that associates each message with the sender, time of sending and reception, improving the traceability and reliability of information transmitted within the network.

Section II presents the state of the art and related work. Section III describes the solution design. Section IV presents the testing methodology. Section V shows the results obtained, and finally Section VI presents the conclusions and future work.

II. RELATED WORK

This section presents an analysis of various applications that use ad-hoc networks as a communication medium (Table 1). Through this review, the goal is to recognize the particularities and approaches that characterize each one, in order to better understand the context in which the proposed application arises and the role it can play within this type of technological solution.

Briar specializes in messaging designed for activists, journalists, and anyone else who needs a secure, simple, and robust way to communicate [5]. Briar offers two ways to connect and send messages: the first is to add a contact remotely via a link, and the second is to add a nearby contact using a QR code provided by the application. It also offers options such as group chat or one-on-one chat. Notably, an internet connection is required for login; once registered, users can use the application without a central network.

Bridgefy is an application aimed at people at concerts, sporting events, travel, or emergencies [6]. Bridgefy enables communication through public chat and one-on-one chat and requires an internet connection for login. It also has a premium option, which limits all users from accessing the full range of features.

Bitchat offers two ways to maintain communication: one-on-one chats or a general chat with all users, whether through sending images, audio, or written messages [7]. It is a practical application and does not require internet for login. When re-entering the application, previously sent or received messages are deleted.

Conecta2 is an Android application designed to facilitate communication between survivors and rescue teams when a natural or man-made disaster occurs and there is no internet connection or mobile signal [8]. The app works by creating an ad-hoc network using Wi-Fi Direct or Bluetooth, allowing nearby phones to communicate directly with each other. Conecta2 offers three main features:

- Group communication, where multiple users can exchange messages simultaneously.
- One-on-one communication, for direct conversations between two devices.
- Location of nearby devices, helping to identify the position of other users in the area.

Users can send text, photos, and audio, and the system does not require internet access or cellular networks. Its range is limited to a single hop and, depending on the technology used (Bluetooth or Wi-Fi Direct), can be between 50 and 100 meters.

III. Methodology

The development of this project was structured under an iterative and interdisciplinary approach, integrating software engineering and interaction design principles to create a robust communication tool for crisis scenarios. The methodology combined User-Centered Design (UCD) and Lean UX for the conceptualization and validation of the graphical interface, along with the agile Scrum framework for the progressive management and programming of the mobile application. This synergy ensured that both the underlying network architecture (Wi-Fi Direct) and the final user experience responded efficiently to the severe cognitive and operational limitations inherent to an emergency.

A. User Interface (UI) and User Experience (UX) Design

The interface design was approached through an interdisciplinary collaboration with the Graphic Design Department of Antonio Nariño University, prioritizing usability in high-stress scenarios where users may experience physical and psychological phenomena such as "tunnel vision" [13]. Tunnel vision is a cognitive and physiological response triggered by the release of adrenaline (fight-or-flight response) in the face of a threat; this phenomenon causes the individual to temporarily lose peripheral visual perception in order to focus exclusively on an immediate focal point or danger, drastically reducing situational awareness. To counteract these effects, a User-Centered Design (UCD) methodology combined with Lean UX was adopted, enabling rapid iterations based on continuous prototype validation.

To mitigate cognitive load in critical situations, a design system based on Neo-Brutalism was established. This style prioritizes functionality over decorative aesthetics, using high visual contrast and legible typefaces (Verdana and Roboto) to facilitate reading under pressure.

The information architecture was governed by two fundamental principles from cognitive psychology and human-computer interaction (HCI):

- Miller's Law [14]: This principle establishes that the human brain can only actively retain an average of 7 (plus or minus 2) elements or "chunks" of information in working memory at a time. By applying this law to interface design, the number of on-screen elements was strictly grouped and limited (chunking technique) to avoid saturating the user's processing capacity and prevent cognitive overload or decision paralysis.
- Fitts' Law [15, 16]: This is a predictive ergonomics model stating that the time required to reach a target (such as tapping a button on a touchscreen) depends on the distance to the target divided by its size. Ensuring compliance with this law, the application's critical action buttons (such as sending alerts) were designed with a large interactive area and placed in finger resting zones, ensuring fast and precise motor access that minimizes accidental taps.

Usability tests were conducted in simulated low-light environments and single-handed use [16, 17]. Single-hand interaction design is fundamental in mobile interface design (Mobile HCI), and is especially relevant in disaster or emergency scenarios. In these circumstances, users are frequently on the move, have divided visual attention, or have only one hand free because the other is occupied (holding objects, helping others, or immobilized due to injury). These tests resulted in the implementation of preset messages (Fig. 1). This feature speeds up communication when the user cannot type (saving time and motor effort) and optimizes data packet transmission on the ad-hoc network, ensuring intuitive and efficient interaction.

B. Scrum

Application development was executed using an agile framework, structured in a series of four (4) Sprints. This methodology enabled iterative development and continuous validation of design components and network logic.

- Sprint 1: Dedicated to the design of the User Interface (UI) and User Experience (UX), using Figma for wireframe and mockup creation. In parallel, the development environment in Android Studio with Kotlin was configured and the Wi-Fi Direct technology was studied (Fig. 2).
- Sprint 2: Focused on the implementation of the application's core: the Multihop chat. This included developing the messaging system, the message broadcast mechanism, service discovery, and the retransmission (multihop) logic.
- Sprint 3: During this stage, the user creation system and data persistence implementation were developed (using Android's Room library), along with local storage tests.
- Sprint 4: Finally, this sprint focused on completing user support features, notably the "Emergency Tips Library", culminating in comprehensive system validation and testing across various devices.

IV. Results

A. Communication technology

To implement the ad-hoc network in Multisalto, Wi-Fi Direct technology was used, which allows Wi-Fi devices to connect directly to each other without joining a traditional home, office, or public network (Fig. 2). While the traditional Wi-Fi Direct standard structures networks through hierarchical groups where one device assumes the role of 'Group Owner' (GO) to centralize traffic [9], this application implements a decentralized approach by leveraging the Service Discovery (NSD) functionality.

Unlike conventional P2P connections requiring IP negotiation and formal pairing, the implementation uses the Service Discovery protocol (based on DNS-SD records over 802.11 action frames) as a data transport channel. This allows devices to:



Fig. 1. Default Messages *(preset quick-response buttons displayed in the chat interface)*

1. Operate without a central node: By not establishing a persistent network-layer (IP) connection, no device needs to act as a DHCP server or permanent GO.
2. Asynchronous communication: Messages are transmitted encapsulated within Action frames, allowing any device in listening range to 'discover' the message and process it without needing to formally join a group.

This facilitates the rapid and truly distributed exchange of information, where each node is autonomous and acts simultaneously as sender, receiver, and repeater, eliminating the single point of failure that a traditional GO would represent. The following sections explain the message retransmission algorithm within the network.

B. Architecture of the Multihop Application

In the application, each mobile phone functions as a node within a decentralized network. Upon launching the application, the system auto-assigns each device a unique 128-bit address generated randomly. Given the size of this identifier, the probability of two nodes generating the same number is statistically negligible, guaranteeing unique identification within the network without the need for a central server. This approach avoids using the MAC address as a unique device identifier, since due to security restrictions in the Android operating system, it is not programmatically possible to obtain the MAC address of the adapter, as Android devices use a randomized MAC address with different characteristics depending on the operating system version.

Each device in this network fulfills three fundamental functions: send, receive, and relay messages (Fig. 3). To structure these functions robustly, the system design is conceptually divided into a static architecture based on functional layers containing the operation flows.

To provide a comprehensive view of the system structure, Fig. 4 illustrates the static model of the Multisalto application.

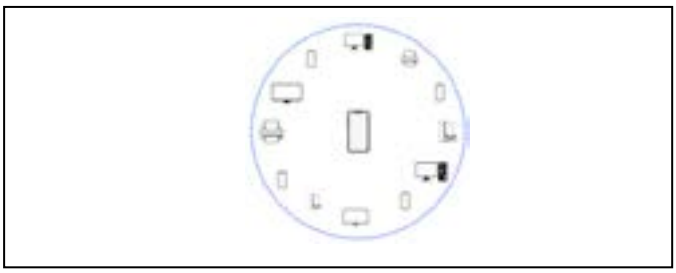


Fig. 2. WiFi Direct

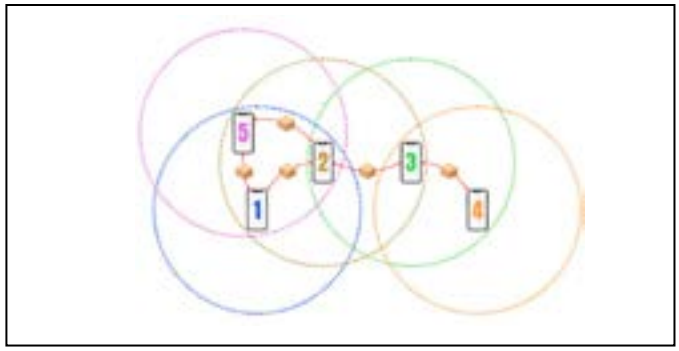


Fig. 3. Ad-Hoc Network

The system was designed following a layered architecture pattern, separating responsibilities into three main functional blocks:

- Presentation Layer (UI/UX): Responsible for direct user interaction. It houses the Chat Module and the Emergency Tips Library. It sends requests to the logic layer for processing text messages and quick alerts.
- Application Logic Layer: Acts as the processing core. It contains the Data Packager, responsible for serializing text to HashMap format and assigning the multihop tag ('g'). It also includes the Redundancy Controller, which implements the controlled flooding logic.
- Infrastructure Layer (Network and Data): Subdivided into two modules. The Network Module interacts with Android's Wi-Fi P2P API, managing packet announcement and capture via Service Discovery (NSD). The Data Module manages local persistence using Android Room, ensuring the storage of message history and the rapid validation of duplicate packets by the logic layer.
- The flow of information between these layers is bidirectional: the logic layer receives packets captured by the network, validates their existence in the local database, and if they are new, orders the presentation layer to display them and the network layer to re-transmit them.

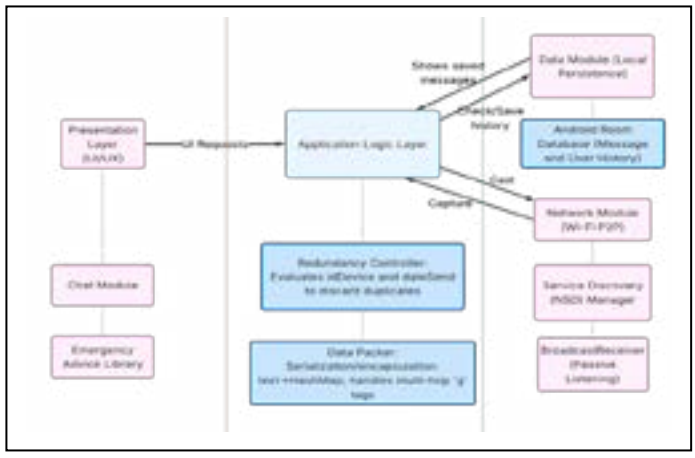


Fig. 4. Multisalto application architecture.

From this base structure, the components of the different layers interact with each other to carry out the network's dynamic processes. The main operation flows of the system are detailed below.

1) First Launch and User Management

The system includes an initial setup flow to identify new users of the application.

- Verification: Upon opening the application, local storage is queried to verify whether the user has previously registered. If so, they are immediately redirected to the main menu.
- Registration: If it is the first entry, the application requests the necessary connection permissions. Subsequently, the user must enter a name, which passes through a validation filter.
- Persistence: Once validated, the user's name and data are permanently saved in the device's local database, completing the setup and granting access to the main menu.

2) Message Transmission

For sending information, the application uses an asynchronous broadcast mechanism rather than direct peer-to-peer connections.

- Packaging: When a user writes and sends a message, the system packages the information in a structured format. This packet contains the sender's name, the text content, the timestamp (date and time), and the device's unique 128-bit identifier.
- Announcement: Once packaged, the device announces this packet to the local network, making it available for any nearby node to "listen" and capture it.

3) Discovery, Reception, and Rendering

Nodes maintain a continuous and silent search for new messages in their environment (Fig. 5).

- Capture and Unpacking: When the system detects an announcement on the network, it captures the packet and unpacks its information.
- Interface Update: The processed information is sent to the graphical interface. The system evaluates whether the message was sent by the user themselves or by a third party, aligning it to the right or left on the screen, respectively.
- Storage: Finally, the message is saved to the local database through a background process, ensuring that the chat history is not lost when the application is closed.

4) Retransmission Logic (Multi-hop) and Traffic Control

For messages to reach devices not within direct range of the original sender, nodes act as repeaters (Fig. 6). However, blind message propagation in ad-hoc networks generates the well-known Broadcast Storm Problem [10], characterized by redundant transmissions, channel contention, and severe packet collisions [11].



Fig. 5. Message Rendering and Persistence Flow

To mitigate this problem and optimize spectrum use, the application replaces pure flooding with a Controlled Flooding algorithm [12] based on message history:

- History Validation (Unique Identification): Upon intercepting a packet, the node consults its local registry. The system evaluates the tuple formed by the original sender's 128-bit identifier and the exact message timestamp.
- Redundancy Suppression (Stop Condition): If this combination already exists in the receiving node's database, it means the packet is a redundant copy that has already been processed. The message is immediately discarded, thus avoiding channel saturation and cutting any infinite retransmission loop.
- Conditional Propagation: If the message is new to the node, it processes it, stores it, and proceeds to repackage it. In this new packet, the integrity of the original author's information is preserved, but a tag is added identifying the current node as the "retransmitter". Subsequently, the packet is retransmitted to the network to efficiently expand coverage toward more distant nodes.

5) Emergency Library Module

In addition to communication, the application integrates a support module for emergency situations. Rather than switching screens, this module deploys as an overlay on the current view using modal views. It works through a dynamic



Fig. 6. Discovery, Reception and Multi-hop Flow.

template system that processes a predefined data structure, enabling efficient rendering of both text and images with survival tips or first aid information, adapting in real time to the category selected by the user.

C. *Field tests*

In order to evaluate the performance of the message sending mechanism and the robustness of the Multisalto application's service discovery algorithm, a field test scenario was designed. The main objective was to verify message propagation in a heterogeneous network and to assess retransmission capacity (multihop) under different topologies and environmental conditions. The field tests were conducted at the training center (CIGER) of the Colombian Red Cross, Cundinamarca and Bogotá Chapter.

1. Devices used: Six mobile devices from different manufacturers were used, with Android OS versions ranging from 10 to 14 (Table II).
2. Scenario 1: Linear Topology with Three Nodes

Three devices (E, F, and B) were selected and positioned in a linear arrangement with asymmetric separation: 100 meters between nodes E and F, and 50 meters between nodes F and B (Fig. 7).

TABLE II Devices Used in the Field Test

Id	Mobile Device	Android Version
A	Vivo Y 21	13
B	Nokia 53	12
C	Samsung A05	14
D	Motorola G7	10
E	Xiaomi Note Remi 9	10
F	Oppo	11

Messages were sent from each node at three different times to observe propagation. Result: In all cases, the message was correctly relayed through the intermediate node, confirming the functioning of the multihop routing mechanism (Fig. 8).

3. Scenario 2: Scalability and Resilience Against Obstacles

To evaluate the multihop capacity across a longer chain and under signal obstruction conditions, a second test was conducted with five devices (A, B, C, D, and E).

The configuration maintained a linear alignment with a constant 50-meter separation between each node. An environmental variable was introduced: device E was located inside a wooded area, adding signal attenuation due to vegetation. The test flow consisted of injecting a message from the origin node (A), located at the opposite end from the wooded area (Fig. 9).

D. *Field tests results*

The propagation analysis in the second scenario showed that the original message emitted by node A was able to reach node E (located 200 meters from the origin and under vegetation cover) through the sequential retransmission by the intermediate nodes (B, C, and D) (Fig. 10).

- The service discovery mechanism successfully replicated messages among all devices in the coverage area in 100% of tested cases.
- The heterogeneity of Android versions (from 10 to 14) did not represent an impediment to the formation of the ad-hoc network.
- The system demonstrated resilience in environments with natural obstacles (wooded area), validating the utility of the multihop architecture for disaster scenarios where direct line of sight is not always guaranteed.

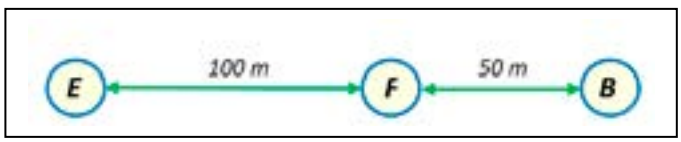


Fig. 7. Arrangement of nodes in scenario 1.

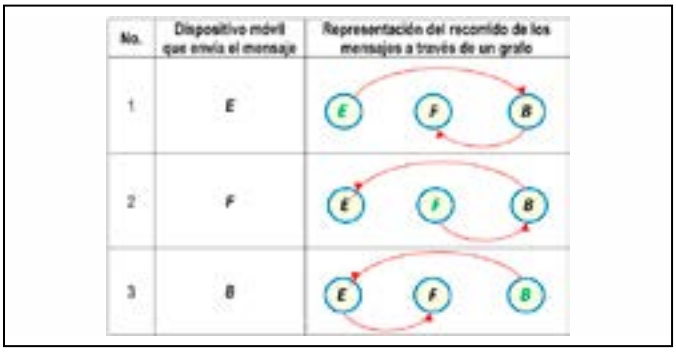


Fig. 8. Message transmission scheme Source 1.

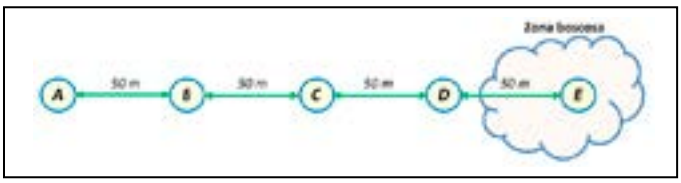


Fig. 9. Arrangement of nodes in scenario 2.

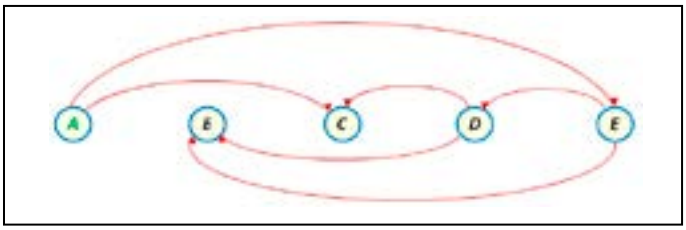


Fig. 10. Message transmission scheme Source 2.

The main result of this project was the development and delivery of a functional mobile application for the Android operating system, which implemented a graphical interface and key functionalities for use in post-disaster scenarios.

E. Graphic Design

A user interface (UI) was successfully integrated into the Multisalto application, designed by graphic designers from the Faculty of Arts at Universidad Antonio Nariño. The UI prioritizes an intuitive and seamless user experience (UX) through high color contrast, recognizable icons, and appropriately sized buttons based on Fitts's Law — design choices that facilitate use by individuals with reduced vision or operating under stress conditions (Fig. 11). This section presents two application modules that illustrate these design principles in practice.

- User Registration and Profile Module: To minimize friction and cognitive load in high-stress post-disaster situations, a simple registration system was implemented requiring only the user's name for first entry (Fig. 12). This functionality is important because it allows each sent message to include the sender's identification, making it easier for rescuers or other users to identify who is requesting help. Furthermore, once the user is safe or stable, they can access their profile configuration to optionally complete secondary data, such as a personal phone number or an emergency contact.



Fig. 11. UI designed by the graphic design team.

- Emergency Library Module: Recognizing that communication is only one aspect of disaster response, an offline Emergency Library module was integrated (Fig. 13). This module locally stores an "Emergency Kit" and survival guides. Consequently, users have instant access to first aid protocols without relying on an internet connection, providing a significant operational advantage over standard messaging applications.

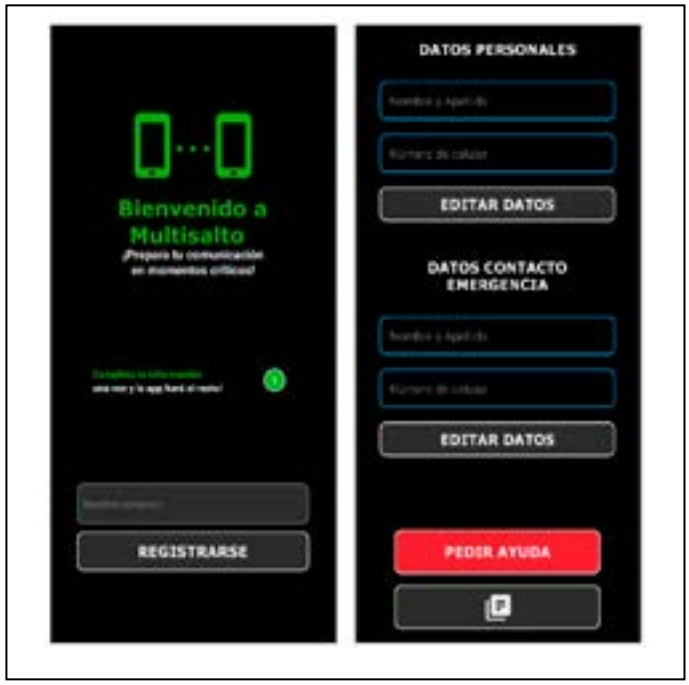


Fig. 12. Registration Module.



Fig. 13. Library Module.

V. Conclusion

The development and experimental validation of Multisalto confirm that a multihop ad-hoc network based on Wi-Fi Direct is a viable and resilient solution for communication in post-disaster scenarios where traditional infrastructure has failed. The field tests demonstrated that the application successfully propagates messages across multiple nodes, achieving 100% delivery success in linear topologies of up to 200 meters. This capability represents a significant improvement over existing single-hop solutions, such as Conecta2, whose range is limited to the immediate vicinity of the signal. Furthermore, the system showed remarkable resilience in environments with natural signal attenuation, such as wooded areas, validating the robustness of the multihop routing mechanism for complex, real-world terrains.

The implementation of a controlled flooding algorithm proved essential for maintaining network stability by effectively mitigating the "broadcast storm problem". By utilizing a unique 128-bit identifier and an exact message timestamp for each packet, the system is able to identify and suppress redundant transmissions. This logic ensures that messages are only processed and retransmitted if they are new to the node, thereby preventing infinite loops and reducing channel contention. The successful integration of the Android Room library further enhances this process by ensuring local persistence for message history, which allows users to maintain a continuous record of communications even if the application is restarted.

A critical component of this research is the interdisciplinary approach to User-Centered Design (UCD), which accounted for the cognitive and physiological impairments experienced by individuals during high-stress events. To counteract phenomena such as "tunnel vision," the interface incorporates high visual contrast and legible typefaces, adhering to Neo-Brutalism principles to prioritize functionality over aesthetics. The application of Miller's Law for information chunking and Fitts's Law for Interactive area placement ensures that the interface remains intuitive and accessible for single-handed use, even when the user's situational awareness is diminished.

While the project successfully delivered a functional and user-friendly communication tool, several areas for future improvement were identified during the comparative analysis. Currently, Multisalto does not encrypt user information, a limitation that must be addressed to ensure privacy and security in sensitive crisis environments. Additionally, the high energy consumption associated with continuous service discovery and packet retransmission suggests that battery optimization is a paramount concern for long-term deployment. Future work should also explore the saturation limits of the network in more densely populated, non-linear topologies to ensure scalability during mass-casualty events.

In conclusion, Multisalto provides a robust, decentralized communication alternative that significantly improves information flow in disaster zones. By integrating technical networking efficiency with a deep understanding of human factors in emergencies, this research offers an accessible tool for both survivors and rescue teams. This work not only provides a practical solution for immediate crisis response but also establishes a rigorous foundation for the next generation of survival-oriented mobile technologies.

Acknowledgment

The authors would like to express their gratitude to Universidad Antonio Nariño for the financial support offered during the completion of this research (grant 2023212)

References

[1] Universidad Politécnica de Cataluña, "Estudio de prestaciones en redes wireless ADHOC multisalto para servicios de emergencia," [Online]. Available: https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/8c79ee36-7aff-4823-91c7-30adb682e81d/content. [Accessed: Oct. 15, 2025].

[2] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Ad hoc network," *A Computer Security Resource Center (CSRC)*. [Online]. Available: https://csrc.nist.gov/glossary/term/ad_hoc_network. [Accessed: Oct. 15, 2025].

[3] International Journal of Computer Applications, "Efficient routing by power optimization using minimum hop count routing protocol in WSN," *Foundation of Computer Science*. Available: https://www.ijcaonline.org/archives/volume180/number16/29018-2018916367. [Accessed: Oct. 15, 2025].

[4] I. Huguet, "InterPlanetary File System and peer-to-peer networks," *UXmatters*, Feb. 18, 2013. [Online]. Available: https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/b66cb079-4d4b-48c5-ba5f-f383d3aacf47/content.

[5] Briar Project, "How it works Briar," *Briar Official Website*. Available: https://briarproject.org. [Accessed: Oct. 15, 2025].

[6] Bridgefy, "How does the Bridgefy app work," *Bridgefy Official Website*. Available: https://bridgefy.me/blog/como-funciona-la-aplicacion-bridgefy. [Accessed: Oct. 15, 2025].

[7] Permissionless Tech, "bitchat," GitHub repository, 2025. [Online]. Available: https://github.com/permissionlesstech/bitchat.

[8] M. P. Salamanca, E. H. Cables, and J. C. Ramírez, "Conecta2: An Android App for Communication between Disaster Survivors through an ad hoc Network," *Ingeniería e Investigación*, vol. 44, no. 3, p. e110710, Dec. 2024. [Online]. Available: https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingeinv/article/view/110710.

[9] V. Arnaboldi, M. G. Campana, and F. Delmastro, "Context-aware configuration and management of WiFi Direct groups for real opportunistic networks," 2023. doi: 10.1109/MASS.2017.40. [Accessed: Nov. 4, 2025].

[10] Y.-C. Tseng, S.-Y. Ni, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu, "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network," *Wireless Networks: The Journal of Mobile Communication, Computation and Information*, vol. 8, no. 2–3, pp. 153–167, 2002. doi: 10.1023/a:1013763825347.

[11] arXiv:1907.07078.

[12] R. Ashikur, W. Olesinski, and P. Gburzyński, "Controlled flooding in wireless ad-hoc networks," pp. 73–78, 2004. doi: 10.1109/IWWAN.2004.1525544.

[13] M. A. Staal, "Stress, cognition, and human performance: A literature review and conceptual framework," NASA, Ames Research Center, Moffett Field, CA, Tech. Mem. NASA/TM-2004-212824, 2004.

[14] G. A. Miller, "The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information," *Psychological Review*, vol. 63, no. 2, pp. 81–97, 1956.

[15] P. M. Fitts, "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement," *Journal of Experimental Psychology*, vol. 47, no. 6, pp. 381–391, 1954.

[16] I. S. MacKenzie, "Fitts' Law as a research and design tool in human-computer interaction," *Human-Computer Interaction*, vol. 7, no. 1, pp. 91–139, 1992.

[17] A. K. Karlson, B. B. Bederson, and J. SanGiovanni, "Understanding single-handed mobile device interaction," in *Handbook of Research on User Interface Design and Evaluation for Mobile Technology*. Hershey, PA: IGI Global, 2008, pp. 86–101.

Asociación Colombiana
de Facultades de Ingeniería

Carrera 68D 25B - 86 oficina 205, Edificio Torre Central

Fijo (57 601) 696 6285 - **Móvil** (57) 300 322 1059 - Bogotá, D.C., Colombia