



SCIENTIA  
ET  
TECHNICA

ISSN 0122-7701 - ISSN-E 2344-7274

La revista Scientia et Technica tiene inscripción vigente en la Sección de Registro de Propiedad Intelectual y Publicaciones del Ministerio de Gobierno de la República de Colombia, mediante resolución 111 de marzo de 1995. Publicación aceptada en el Índice Nacional de Publicaciones Seriadas de Minciencia, Publindex en categoría B hasta el 31 de diciembre de 2021. Publicación asociada a la Red de Revistas Científicas de América Latina y El Caribe, España y Portugal (Redalyc). Vinculados a DIALNET, Centro de Información Tecnológica CIT, EBSCO-Academic Search Complete.

**VOL 30 N°3**

JULIO - SEPTIEMBRE DE 2025



#### **Editor**

**Ph.D. Jimmy Alexander Cortes Osorio**  
Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

#### **Editor Asociado**

**Ph.D. José Rodrigo González Granada**  
Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

#### **Comité Técnico**

##### **Asistente editorial**

**Ing. María Camila Quintero Sánchez,**  
Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

##### **Asesores Técnicos**

**MSc, Angela María Vivas Cuesta,**  
Sección de Desarrollo y Administración Web,  
Recursos Informáticos y Educativos, CRIE,  
Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia

##### **Asesor de Diseño**

**Lic. Víctor Hugo Valencia,** Centro de  
Recursos Informáticos y Educativos, CRIE -  
Sección Diseño, Universidad Tecnológica de  
Pereira, Colombia

##### **Sello Editorial UTP**

Luis Miguel Vargas

##### **Comité Editorial**

**Ph.D. César Aurelio Herreño Fierro**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

##### **Ph.D. Jhon Alexander Villada**

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial,  
México

##### **Ph.D. Cristian Camilo Villa Zabala**

Universidad del Quindío, Colombia.

##### **Ph.D. Agustín Lagunes Dominguez**

Universidad Veracruzana, México

**Ph.D. Mauricio Fernando Jaramillo Morales**  
Universidad Autónoma de Manizales, Colombia

##### **Comité Científico**

**Ph.D. Nayeli Camacho Tapia**  
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial,  
México.

**Ph.D. Juan Manuel González Carmona**  
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial,  
México.

**Ph.D. Arles Victor Gil Rebaza**  
Instituto de Física La Plata IFLP - CONICET,  
Argentina.

**Ph.D. Isabel Cristina de Castro Monteiro**  
Universidad Estadual Paulista, Brasil.

**Ph.D. Vera Ferro Lebres**  
Instituto Politécnico de Bragança, Portugal.

**Ph.D. Juan Francisco Cabrera Ramos**  
Universidad Católica De Temuco, Chile.

**Ph.D. Dimas Talavera Velázquez,**  
Universidad Autónoma de Querétaro, México.

**Ph.D. Alfredo Campos Otero, Universidad**  
Tecnológica de Panamá, Panamá.

**Ph.D. David Camilo Toquica Cardenas**  
Universidad de Québec en Trois-Rivières,  
Canadá.

---



Facultad  
de Ciencias  
Básicas



SCIENTIA  
ET  
TECHNICA

ISSN 0122-1701 - ISSN-E 2344-7214

## Revista Scientia et Technica

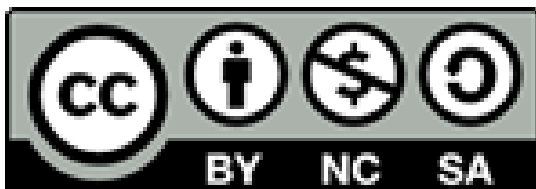
Vol. 30, Núm.01 (enero-marzo) de 2025

<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/index>

Contacto: [scientia@utp.edu.co](mailto:scientia@utp.edu.co)

DOI: <https://doi.org/10.22517/issn.2344-7214>

ISSN Electrónico (2344-7214)



licencia Creative Commons Atribución/Reconocimiento-No  
Comercial-Compartir bajo los mismos términos 4.0  
Internacional — [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

## **Pares evaluadores en este número**

Jorge Ariel Guapacha Martinez  
Raul Andres Becerra Arciniegas  
Herbey Andres Milquez Sanabria  
Aura Paola Andrea Ayala  
Rafael Humberto Merlano Porto  
Ruben Dario Hernandez Beleño  
Favian Enrique Arenas Aparicio  
Miguel Antonio Caro Candelazo  
Christian Camilo Gomez Mosquera  
Juan Pablo Gonzalez Galvis  
Oscar Dario Guarín Villamizar  
Javier Ernesto Holguin Gonzalez  
Jenny Lucia Huertas Delgado

---

# Contenido

## Editorial

Treinta años visibilizando la ciencia

Jimmy Alexander Cortes Osorio

DOI:<https://doi.org/10.22517/23447214.25946>

Páginas.....121-123

## Mecánica

Caracterización mecánica de una pared de acero al carbono fabricada con alambre ER70S-6 empleando un proceso propio de Manufactura Aditiva con Arco Eléctrico (WAAM)

Autores: Elmer Cepeda Gómez, Carlos Alberto Narváez Tovar, Ubaldo Garcia Zaragoza, Yeimy Caterine Poveda Castillo

DOI:<https://doi.org/10.22517/23447214.25681>

Páginas.....124-132

## Sistemas y Computación

Optimización Automatizada del suministro de agua en propiedades horizontales: un enfoque experimental en Ibagué

Autores: Omar Leonardo Leyton Mendieta, Iván Alveiro Quintero Castaño, Yesid Alexander Garces Pulido

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.25829>

Páginas.....133-141

## Ciencias Básicas

Metaheurística de conjuntos para la optimización de problemas relaciones entre variables en contextos estadísticos complejos para el análisis de datos cuantitativos

Autores: Jhon Jairo Mosquera Rodas

DOI <https://doi.org/10.22517/23447214.25807>

Páginas.....142-150

## Ciencias Ambientales

Una propuesta de un índice difuso de clasificación climática para Colombia

Autores: Juan Guillermo Popayán Hernández, Osnamir Elías Bru-Cordero

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.25894>

Páginas.....151-160

---

# Editorial

## Treinta años visibilizando la ciencia



Desde la Dirección de *Scientia et Technica* se celebra una trayectoria que se remonta a marzo de 1995 (Resolución 131 del Ministerio de Gobierno), cuando un grupo de académicos al interior de la UTP, liderados inicialmente por el profesor Carlos Alberto Orozco Hincapié, impulsó una revista destinada a dar identidad a la investigación de la Universidad Tecnológica de Pereira y a socializarla con la comunidad. En sus primeros años fue impresa y esencialmente semestral; luego evolucionó a publicación trimestral en línea y de acceso abierto, con foco en Ciencias Básicas e Ingenierías [1], [2], [13].

A comienzos de los años 2000, la Dra. Sandra Milena Pérez articuló la vinculación con el sistema nacional de ciencia (entonces Colciencias, hoy Minciencias), fortaleciendo la visibilidad y los reconocimientos docentes asociados al Decreto 1279 de 2002. Posteriormente, Edison Duque condujo una transición intermedia al soporte digital (distribución en CD), antesala de la migración plena a plataforma en línea. Entre 2008 y 2017, Hugo Armando Gallego Becerra profesionalizó la operación en Open Journal Systems (OJS) y consolidó la indexación en Publindex/Minciencias (categoría B), además de afianzar la presencia en catálogos y redes de acceso abierto [4], [5], [2].

Desde 2018 y hasta hoy, la Jefatura Editorial está a cargo del Ph.D. Jimmy Alexander Cortes Osorio, con énfasis en la trazabilidad de la revisión por pares, la marcación y preservación digital y la proyección hacia nuevos directorios e índices internacionales (DOAJ, Scopus, Web of Science) [3], [11].

En materia de indización y visibilidad, *Scientia et Technica* mantiene presencia en Redalyc, Latindex y Dialnet, lo que potencia su descubribilidad en Iberoamérica y consolida su vocación de acceso abierto [4], [5]. En Publindex/Minciencias figura en categoría B con vigencia hasta el 31 de diciembre de 2021 [1]. En Google Scholar, la cobertura asegura la recuperabilidad de los artículos y el conteo de citas; en Scholar Metrics, el impacto reciente se sintetiza mediante el h5-index y la h5-median, calculados sobre los últimos cinco años completos [2]. Para *Scientia et Technica*, el h5-index es 44, lo que significa que, en ese quinquenio, al menos 44 artículos de la revista recibieron 44 citas o más cada uno, un indicador que refleja simultáneamente productividad e influencia en la comunidad científica [3]. [6], [7], [8], [2], [12], [11].

La gobernanza editorial descansa en la Facultad de Ciencias Básicas, y en el soporte administrativo y financiero de la Universidad Tecnológica de Pereira (Revistas UTP), con política de acceso abierto. Esta gestión se alinea con la visión institucional de la Rectoría del Dr. Luis Fernando Gaviria Trujillo y de la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión, a cargo del Dr. Mauricio Holguín Londoño (posesión 3 de febrero de 2025) [4], [1], [5], [9], [10].


En octubre de 2025, en el marco de la Feria del Libro, la comunidad académica de la universidad tecnológica de Pereira rindió homenaje a quienes han sostenido y hecho crecer este proyecto. Se reconoció el trabajo de los editores Jefes, Carlos Alberto Orozco Hincapié (1995 - 2001), Sandra Milena Pérez (2002 - 2007), Edison Duque Cardona (2004 - 2007), Hugo Armando Gallego Becerra (2008–2017) y Jimy Alexander Cortes Osorio (2018 –Actual editor Jefe de la revista), así como al Comité Científico, Comité Editorial, autores, lectores, y al equipo técnico y administrativo. Hoy la revista *Scientia et Technica* recibe contribuciones de Colombia y de países como Ecuador, Cuba, Venezuela y México, y se proyecta como referente nacional con vocación internacional. [5], [2].

## Referencias:

- [1] *Scientia et Technica* — “Sobre la revista,” Revistas UTP, Univ. Tecnol. de Pereira. [En línea]. Disponible: [revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/about](http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/about). Accedido: 9-nov-2025. [Revistas UTP](#)
- [2] *Scientia et Technica* — “Página principal (Sobre la revista / Avisos),” Revistas UTP. Incluye nota: “Reconocida en Publindex-Minciencias en B hasta el 31 de diciembre de 2021.” Accedido: 9-nov-2025. [Revistas UTP+1](#)
- [3] *Scientia et Technica* — “Equipo editorial,” Revistas UTP. Editor en Jefe: Ph.D. Jimy Alexander Cortes Osorio (UTP). Accedido: 9-nov-2025. [Revistas UTP](#)
- [4] A. J. Rodríguez-Morales y H. A. Gallego Becerra, “Un nuevo horizonte editorial para *Scientia et Technica*,” *Scientia et Technica*, UTP, 2013. (editorial que anuncia profesionalización y adopción de OJS; H. A. Gallego figura como Editor en Jefe). Accedido: 9-nov-2025. [Revistas UTP+1](#)
- [5] H. A. Gallego Becerra, “Editorial,” *Scientia et Technica*, Año XXII, Vol. 22, No. 4, dic. 2017 (transición 2017 con editoriales firmadas por H. A. Gallego y menciones a J. A. Cortes). Accedido: 9-nov-2025. [Revistas UTP+1](#)
- [6] Redalyc, “*Scientia et Technica*,” Red de Revistas de Acceso Abierto (ID revista 849). Accedido: 9-nov-2025. [Redalyc](#)
- [7] Latindex, “*Scientia et Technica (En línea)* — Ficha 17004 (situación: vigente),” Accedido: 9-nov-2025. [Latindex+1](#)
- [8] Dialnet, “*Scientia et Technica* — Ficha de la revista,” Univ. de La Rioja, Accedido: 9-nov-2025. [Dialnet](#)
- [9] Comunicaciones UTP, “Luis Fernando Gaviria Trujillo tomó posesión como rector de la UTP para el periodo 2024–2028,” 26-dic-2024. Accedido: 9-nov-2025. [comunicaciones.utp.edu.co+1](http://comunicaciones.utp.edu.co+1)
- [10] Comunicaciones UTP, “Mauricio Holguín Londoño asume como Vicerrector de Investigaciones, Innovación y Extensión,” 3-feb-2025. Accedido: 9-nov-2025. [comunicaciones.utp.edu.co](http://comunicaciones.utp.edu.co)
- [11] Google, “Scholar Metrics Help (definiciones de h-index, h5-index y h5-median),” 22-jul-2025 (actualización). Accedido: 9-nov-2025. [Google Académico+1](#)

- [12] Comunicaciones UTP, “*Scientia et Technica* reconocida en categoría B en Publindex de Colciencias,” 30-ago-2019 (vigencia informada hasta 31-dic-2020; posteriormente actualizada en el sitio de la revista a 31-dic-2021). Accedido: 9-nov-2025. [comunicaciones.utp.edu.co](http://comunicaciones.utp.edu.co)
- [13] *Scientia et Technica* — “Enfoque y alcance / Frecuencia de publicación,” Revistas UTP. Accedido: 9-nov-2025. [Revistas UTP](#)

## Autores

**PhD. Jimmy Alexander Cortes Osorio**   
Docente Titular Departamento de Física  
Editor jefe -Revista Scientia et Technica  
Grupo Investigación Robótica Aplicada  
Línea: Computer Vision and Machine Learning  
Investigador Senior Reconocido por MINCIENCIAS  
Universidad Tecnológica de Pereira  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0413-807X>

# Caracterización mecánica de una pared de acero al carbono fabricada con alambre ER70S-6 empleando un proceso propio de manufactura aditiva con arco eléctrico (WAAM)

Mechanical characterization of a carbon steel wall manufactured with ER70S-6 wire by an in-house Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process

E. Cepeda Gómez  , Y. C. Poveda Castillo  , U. García Zaragoza  , C.A. Narváez-Tovar  

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.25681>

Scientific and technological research paper

**Abstract**— The additive manufacturing of metals can be made with the same welding techniques used for joining of materials, in this process called Wire Arc Additive Manufacturing WAAM, a heat source melts the filler metal, and it is deposited layer by layer along a predefined path. This Directed Energy Deposition technique is used to manufacture medium to large scale parts that may require subsequent finishing process. To guarantee the quality of the produced parts it is required to assess their mechanical properties which depend on the welding process variables. This paper exposes the study carried out on a carbon steel wall deposited using GMAW and with a ER70S-6 wire. Horizontal and vertical oriented tensile specimens were machined from the wall according with test method ASTM E8M-21 and mechanical properties were obtained and compared against the values expected by the filler metal specification. Finally, some suggestions are presented that will possibly improve the process aiming to increase yield strength, tensile strength and elongation, especially in the transverse direction to the advance, it requires a greater number of tests throughout the operative range of the equipment used.

**Index Terms**—ER70S-6, GMAW process parameters, mechanical properties, WAAM.

**Resumen**— La manufactura aditiva de metales se puede realizar con las mismas técnicas de soldadura utilizadas en la unión de materiales, de manera tal, que una fuente de calor funde el metal de aporte que se deposita capa por capa siguiendo una trayectoria establecida y con ello se manufacturan partes de mediana a gran escala que pueden requerir procesos posteriores de acabado. Para realizar piezas funcionales es importante asegurar su calidad partiendo de sus propiedades mecánicas y que dependen de las variables propias del proceso de soldadura. En este artículo se presenta el estudio realizado a una pared de acero al carbono depositada con GMAW y con un alambre sólido ER70S-6, comparando las propiedades mecánicas obtenidas en ensayos de tracción contra los valores esperados por la especificación del

metal de aporte. La correlación se establece entre los datos obtenidos en los ensayos de tracción que corresponden a las probetas mecanizadas en dos direcciones, horizontal y vertical, cumpliendo la geometría definida en el método de ensayo ASTM E8M-21, de manera que al final se presentan algunas sugerencias que posiblemente permitirán mejorar el proceso para que se aumente la resistencia a la fluencia, la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación sobre todo en el sentido transversal a la dirección de avance, requiriendo para ello un mayor número de pruebas en todo el rango de trabajo de los equipos utilizados.

**Palabras claves**—ER70S-6, parámetros del proceso GMAW, propiedades mecánicas, WAAM.

## I. INTRODUCCION

La manufactura aditiva (AM), es el proceso de unión de materiales, usualmente capa por capa, para fabricar objetos a partir de un modelo 3D. Su principio de funcionamiento se presenta como opuesto a los procesos de manufactura subtractivos y puede establecerse como complementario a las técnicas actuales de manufactura [1]. De las siete categorías diferentes clasificadas por el comité F42 de ASTM [2] únicamente la deposición de energía dirigida DED, la fusión de lecho de polvos PBF y el laminado de hojas SL permiten la producción de partes metálicas en una sola etapa, y solamente la deposición de energía focalizada DED, emplea la adición de metal de aporte [3]. Los parámetros principales en la manufactura aditiva DED están relacionados con el tipo de materia prima (polvos o alambre) y la fuente de energía térmica

E. Cepeda Gómez is a professor in the Mechatronics Engineering program at the University of San Buenaventura and a Master's student in Engineering – Materials and Processes at the National University of Colombia, Bogotá. Y.C. Poveda Castillo is an assistant professor in the Mechanical Engineering program at the Los Libertadores University Foundation (e-mail: ycpovedac@libertadores.edu.co). U. García Zaragoza is a professor in the Mechatronics Engineering program at ECCI University (email: ugarciaz@ecc.edu.co).

C.A. Narváez-Tovar is an associate professor in the Department of Mechanical and Mechatronics Engineering at the National University of Colombia, Bogotá Campus, Colombia (email: canarvaezt@unal.edu.co).

This manuscript was submitted on August 10, 2025. Accepted on September 05, 2025. And published on September 29, 2025. This work is derived from the project “Development of a hybrid manufacturing system for the fabrication of medium-scale metal components. Phase I: Prototyping the welding arc additive manufacturing (WAAM) process,” which is being carried out at the National University of Colombia, Bogotá Campus, and from the undergraduate thesis “Development of a welding arc additive manufacturing (WAAM) simulator for the Leadwell V20i machining center at the Los Libertadores University Foundation.”



En los procesos DED, la energía térmica funde los materiales que se van depositando y cuando se emplea como fuente de energía el arco eléctrico se hace referencia a un proceso de manufactura Aditiva por Soldadura (WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing) [1],[5]. WAAM utiliza las herramientas de soldadura con arco eléctrico y un alambre metálico de aporte con una tasa de deposición estimada de 4 a 9 kg/h para construir Dentro de los procesos de soldadura adecuados para implementar un sistema WAAM, se encuentran los de alambre continuo sólido (GMAW) o tubular (FCAW). Para proteger el metal que se deposita se emplean gases industriales que evitan que los gases del medio circundante afecten las propiedades mecánicas, disminuyendo las discontinuidades y haciendo que el arco eléctrico sea estable. El voltaje, la intensidad de corriente y la velocidad de avance son algunos de los parámetros fundamentales. Algunos fabricantes de equipos han desarrollado modificaciones a los tipos de transferencia que se originan en GMAW, por ejemplo, la transferencia de metal fría CMT desarrollada por Fronius, quienes aseguran que se traslada menos calor al depósito al controlar los parámetros eléctricos de una manera diferente a los procesos convencionales de soldadura. [7]. Por otro lado, los metales de aporte que se suelen utilizar son de distribución comercial y producidos por la industria de la soldadura, disponibles en forma de rollos de alambre y en un amplio rango de aleaciones. En aleaciones de aluminio y de acero, aún los procesos convencionales de conformado son los preferenciales, en general los depósitos de aluminio con manufactura aditiva tienen menores propiedades mecánicas comparadas con las piezas obtenidas por mecanizado, esta condición se supera al procesar posteriormente a través de un tratamiento térmico que refine la microestructura [8].

Los desarrollos previos del proceso WAAM datan del año 1920 cuando se patentó el uso de electrodos consumibles para conformar artículos decorativos [9], más adelante, la realización de recargues (cladding) con soldadura y en 1967, Akira Ujiie, patentó la fabricación de recipientes de sección transversal circular empleando únicamente metal de soldadura [10]. En 1983, se empleó SAW en tándem con una tasa de deposición de 20 kg/h, y posteriormente, Rolls Royce junto con la Universidad de Cranfield, en la década de 1990, mostraron su interés en la elaboración de componentes de motores aeronáuticos con Ti-6Al-4V e Inconel 718 [3]. Más recientemente, investigadores de la start-up Arup y el Imperial College London, a través del The Alan Turing Institute – Lloyd's Register Foundation, diseñó, modeló, construyó y ensayó el primer puente metálico en acero inoxidable fabricado con WAAM [6]. Actualmente, WAAM es un proceso que está siendo usado por la industria aeroespacial para la fabricación de componentes con alta relación BTF (buy to fly), así como la industria militar y naval para fabricar repuestos y llevar a cabo reparaciones de componentes fracturados [11], [12], [13].

Uno de los desafíos en los componentes fabricados con WAAM es la evaluación de la influencia del proceso de soldadura en sus propiedades mecánicas, de manera que la resistencia a la

fluencia y a la tracción, de un acero fabricado por AM sea comparable con la de un acero convencional [7], [8]. Las propiedades de tracción pueden diferir hasta un 10% para diferentes orientaciones y la resistencia puede ser mejorada al incrementar la corriente del arco de soldadura. Por ejemplo, el trabajo de Ermakova et al. [14] emplearon el proceso GMAW con CMT (Cold Metal Transfer) para hacer los depósitos capa a capa sobre un acero estructural EN 10025, con un patrón oscilante para obtener una pared de 24 mm de espesor. Este tipo de trayectoria redujo la probabilidad de fusión incompleta, pero aumentó la entrada de calor. De los ensayos a tracción en sentido horizontal y en sentido vertical de acuerdo con ASTM E8M a temperatura ambiente, encontraron que la deformación en la fractura es ligeramente mayor en las probetas horizontales, la resistencia a la fluencia es menor 6,8% en las probetas verticales y la resistencia a la tracción es similar pero ligeramente menor en el sentido vertical [14]. Por otro lado, Haden et al. [15] configuraron un sistema WAAM de bajo costo empleando una máquina de soldar Millermatic 250 con un posicionador tipo gantry, empleando el software de código abierto *Slic3r engine* para el código G, para depositar paredes de 212,6 cm de longitud, 11,5 cm de altura y 0,6 cm de espesor, con alambre ER70S-6 de 0,9 mm de diámetro, sobre una platina de ASTM A36, con 19V, velocidad de alimentación de 5 080 mm/min y un avance de 152 mm/min. Cada capa se realizó en la misma dirección con un gas de protección 75% Ar y 25% CO<sub>2</sub>, con un caudal de 30 CFH. A partir de la pared, mecanizaron probetas de tracción de acuerdo con ASTM A370-13 y las ensayaron obteniendo un comportamiento en la resistencia a la fluencia muy similar al obtenido de un ASTM A36 y sin diferencias significativas entre resultados de probetas mecanizadas en sentido horizontal y vertical [15].

En el contexto latinoamericano también se han llevado a cabo investigaciones en las que se configuran sistemas WAAM integrando equipos de soldadura y CNC. Por ejemplo, el trabajo de Frago Poblano [16] utilizó un dispositivo de control numérico computarizado CNC para automatizar el movimiento de la antorcha MIG PF 250 de un equipo de soldadura MIG MM 252 de INFRA, empleando alambre de acero al carbono de 0,9 mm de diámetro y una alimentación de 7,056 m/min, mientras que el trabajo de Cervantes et al. [17] utilizó el software Match 1, un router CNC, una máquina de soldar para GMAW y el metal de aporte ER70S-6 de diámetro 0,8 mm. Cada probeta de tracción se manufacturó depositando 6 capas, la distancia entre la antorcha y la pieza de 8 mm, amperaje de 80 A, voltaje de 35V, velocidad de avance de la antorcha de 1,1 m/min, velocidad de alimentación de 15 m/min y caudal de gas de 15ft<sup>3</sup>/h. Las probetas de tracción se mecanizaron de acuerdo con ASTM E8M-04 y los ensayos se realizaron a temperatura ambiente de 20°C, obteniendo una resistencia a la fluencia entre 258,0 MPa y 358,1 MPa, resistencia a la tracción entre 402,7 MPa y 493,2 MPa, que en promedio fue ligeramente superior a la especificada para el metal de aporte ER70S-6 [17].

En Colombia, el estudio de la ANDI e iNNpulsa indica que los sectores automotriz y metalmeccánico deben realizar inversiones y desarrollos propios para cerrar la brecha tecnológica de la manufactura 3D, especialmente en la de materiales metálicos [18]. De todas las tecnologías aditivas, la adopción de WAAM

por la industria colombiana tiene una alta factibilidad de éxito debido a que puede realizarse sin requerir una alta inversión inicial en equipos, y puede aprovechar la capacidad instalada y el capital humano capacitado en CNC y soldadura. Por lo anterior, el objetivo de este artículo es presentar la caracterización mecánica de paredes de acero al carbono ER70S-6 fabricadas con un equipo de soldadura GMAW convencional adaptado a un centro de mecanizado CNC. La sección de metodología describe las pruebas semiautomáticas, continuas, de deposición de cordones individuales y de solape realizadas con el fin de establecer un intervalo de parámetros de proceso que produjeran apariencia uniforme, ancho constante y baja convexidad de los cordones depositado, así como el proceso de deposición de una pared de longitud 220 mm, altura 115 mm y ancho 36 mm, de la cual fueron cortados bloques horizontales y verticales para mecanizar las probetas a tracción. La sección de resultados presenta las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de tensión de acuerdo con la norma ASTM E8M-21. Finalmente, la sección de conclusiones correlaciona los parámetros de proceso con las propiedades mecánicas obtenidas, realiza sugerencias para mejorar el proceso y formula líneas de trabajo futuro.

II. METODOLOGÍA

A. Selección del material y proceso de fabricación:

1) Descripción del proceso de soldadura

GMAW es un proceso de soldadura por arco eléctrico generado entre un electrodo metálico continuo y el charco de soldadura, con un gas suministrado externamente que actúa como protección y no requiere la aplicación de presión. Al combinar de manera adecuada el gas de protección, metal de aporte y variables de soldadura es posible soldar metales como aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros inoxidables, aluminio, cobre, titanio y aleaciones de níquel [19].

2) Equipos

La máquina de soldadura regula automáticamente las características eléctricas del arco (tensión y velocidad de alimentación), el soldador o un equipo adicional genera la velocidad de avance y la dirección de la antorcha. El equipo de soldadura está compuesto por la antorcha de soldadura con sus accesorios, la unidad de alimentación, el control de soldadura, la fuente de poder, el regulador del gas de protección y el suministro de gas a través de un cilindro de alta presión [19]. En este trabajo se utilizó una máquina de soldadura Speedtec 200C con antorcha LGS 250G del fabricante Lincoln Electric.

Para desplazar automáticamente la antorcha y depositar la pared se empleó un centro de mecanizado CNC Leadwell V-20i. Para acoplar la antorcha al husillo del centro de mecanizado se empleó un portaherramientas disponible y se diseñó un aditamento que emplea unión atornillada para sujetar la antorcha por presión y permite el giro libre del husillo respecto a la antorcha [20]. El aditamento se muestra en la figura 1. La generación del código G

correspondiente a las trayectorias de deposición que debe seguir la antorcha en cada una de las capas de la pared se obtuvo empleando un simulador del proceso desarrollado en el software SprutCAM [20].

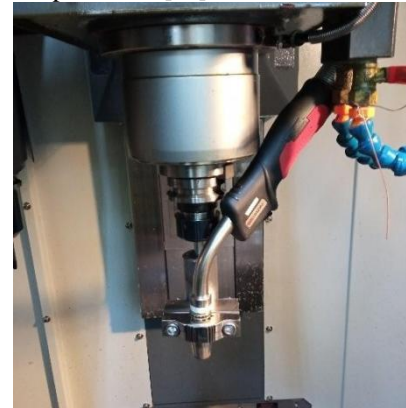


Fig. 1. Sistema de sujeción de la antorcha.

3) Metal de aporte

El alambre corresponde a la especificación AWS A5.18, y a la clasificación ER70S-6. Este alambre se destina para soldaduras de capa sencilla o múltiple, adecuado para aplicaciones donde se requiere cordones lisos y se puede utilizar con rangos de corriente altos con gas de protección CO<sub>2</sub> o mezclas de argón y oxígeno o argón y CO<sub>2</sub> [21]. La composición química típica del metal de soldadura depositado se describe en la Tabla I, mientras que la tabla II resume las propiedades mecánicas de los depósitos que pueden obtenerse con este alambre. Específicamente para este trabajo, se empleó alambre de 0.8 mm de diámetro.

TABLA II  
REQUISITOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS TAL COMO SE SUELDA

Clasificación AWS A5.18 [A5.18M]	Gas de protección <sup>a</sup>	Resistencia a la tracción, psi [MPa]	Resistencia a la fluencia <sup>b</sup> , psi [MPa]	Porcentaje de elongación <sup>c</sup>	Resistencia al impacto (promedio mínimo) a 20 °F [30 °C]
ER70S-6 [ER49S-6]	CO <sub>2</sub>	70 000 [490]	58 000 [400]	22	20 ft lb [27 J]

<sup>a</sup> El uso de un gas de protección en particular para propósitos de clasificación no se debe interpretar como una restricción al uso de otras mezclas de gases. Un metal de aporte ensayado con otra mezcla de gas de protección puede resultar en un metal de soldadura con diferentes propiedades mecánicas.

<sup>b</sup> Resistencia a la fluencia al 0,2% de desplazamiento.

<sup>c</sup> Porcentaje de elongación en 2 in [50 mm] de longitud de galga o 1,4 in [36 mm] de longitud de galga para probetas de tracción de 0,250 in [9,0 mm] recomendadas. [21]

TABLA I  
REQUISITOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA PARA ELECTRODOS SÓLIDOS Y VARILLAS

Clasificación AWS A5.18 [A5.18M]	Porcentaje en peso <sup>a</sup>									
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER70S-6 [ER49S-6]	0,06-0,15	1,40-1,85	0,30-1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50

<sup>a</sup> Los datos sencillos son valores máximos [21]

4) Gas de protección

El gas es indispensable para que el proceso de soldadura se realice de manera apropiada, incide en el desempeño del proceso de soldadura y el potencial de ionización permite el inicio y la estabilidad de arco a partir de los componentes del gas. [22]. Durante el proceso de fabricación de la pared se empleó como gas de protección 100% CO<sub>2</sub> del fabricante Cryogas, ya que el CO<sub>2</sub> es un gas activo que se suele emplear en GMAW por su menor costo por unidad de volumen; sin embargo, el costo final dependerá adicionalmente del contorno del cordón, de la salpicadura y su remoción, puesto que la menor eficiencia de deposición causada por los humos generados y las pérdidas por salpicaduras pueden influir el coste final. [22].

### 5) Variables del proceso

Las variables del proceso son la corriente de soldadura que varía directamente con la velocidad de alimentación del alambre, la polaridad del electrodo, que en la mayoría de aplicaciones y modos de transferencia se obtiene con corriente directa electrodo positivo (DCEP), el voltaje del arco, la velocidad de avance, la extensión del electrodo, que típicamente oscila entre 6 mm a 13 mm para corto circuito, la orientación del electrodo, el diámetro del alambre que influye en la configuración del cordón de soldadura, y la composición y caudal del gas de protección. La selección de los parámetros requiere de experimentación para encontrar las condiciones adecuadas y esta tarea no es sencilla por la interdependencia de muchas de estas variables. [19].

#### B. Desarrollo experimental

##### 1) Pruebas de deposición con parámetros iniciales

A partir del manual de la máquina y de la ficha del metal de aporte generados por el fabricante, se realizaron pruebas semiautomáticas para determinar los valores iniciales de prueba que resultaron en velocidad de alimentación 8 m/min, tensión de salida 24 V, velocidad de avance 250 mm/min y caudal de gas 15 L/min. Con estos datos preliminares, se configuró el proceso GMAW mecanizado, en donde la trayectoria de la multicapa de cordón sencillo la generó el simulador en SprutCAM, mientras que de manera manual se abrió y cerró el arco eléctrico en la antorcha oprimiendo el gatillo de la antorcha.

La segunda aplicación se realizó de forma continua sin modificar los parámetros iniciales de prueba (velocidad de alimentación 8 m/min, tensión de salida 24 V, velocidad de avance 250 mm/min y caudal de gas 15 L/min.), únicamente se ajustó manualmente el eje Z del husillo del centro de mecanizado para modificar la altura de la pared al aplicar cada una de las capas. Como sustrato se empleó un acero al carbono ASTM A36 de espesor 6,5 mm y se aisló eléctricamente del CNC a través de un par de mordazas de poliamida. Al finalizar la aplicación de las

once (11) capas se encontró que la poliamida no es el material adecuado porque la temperatura alcanzada en la aplicación completamente las mordazas, como se aprecia en la figura 2. La temperatura acumulada entre pases, además de deformar el sustrato, evitó una solidificación rápida del metal de soldadura en las capas más calientes y por tanto tendía a perder la forma del cordón de manera que la aplicación obtuvo una apariencia no uniforme, tal como lo muestra la figura 3.



Fig. 2. Resultado de la aplicación inicial de once (11) capas sencillas.



Fig. 3. Resultado de la aplicación inicial de once (11) capas sencillas.

Para automatizar el proceso, fue necesario sincronizar el movimiento del CNC con el inicio y fin de arco generado en la máquina de soldadura, para ello se realizó la conexión al CNC del gatillo de la antorcha y se creó el código para iniciar y finalizar el arco; este comando se incorporó al simulador generado por el software SprutCAM. Se probó la sincronización con depósitos de tres configuraciones geométricas diferentes como se aprecia en la figura 4.



Fig. 4. Depósitos de pared sencilla como prueba de la conexión sincronizada entre CNC y máquina de soldadura.

También se retiró la mordaza de la mesa de trabajo del CNC, en su lugar se colocaron ladrillos refractarios para aislar térmica y eléctricamente el CNC del arco eléctrico. Para reducir la deformación del sustrato se cambió el espesor de 6,5 mm a uno de 20 mm y la temperatura entre capas se estableció que no sobrepasaría 150°C.

**2) Exploración de intervalos para los parámetros de proceso**

Se realizó un estudio exploratorio para encontrar los intervalos de parámetros de proceso, mediante la deposición de varios cordones en capa sencilla, como se aprecia en la figura 5. Los parámetros incluidos fueron la velocidad de alimentación, la velocidad de avance, la tensión y la corriente. Se inspeccionó visualmente la superficie de cada cordón buscando apariencia uniforme, ancho constante y de baja convexidad, esto con el fin de que cada capa previa sea lo más homogénea posible.

PARÁMETROS OPERATIVOS APROBADOS EN INSPECCIÓN VISUAL

Velocidad de alimentación [m/min]	Velocidad de avance [mm/min]	Tensión [V]	Corriente [A]
5	200	24	80-93
5	450	24	74-90
6	200	25	83-100
6	450	25	90-107

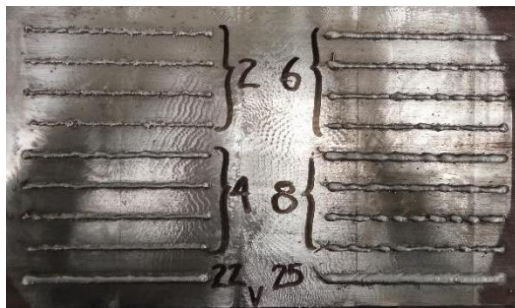


Fig. 5. Depósitos de prueba preliminar.

Se mantuvo constante la tensión de salida y se modificó la velocidad de alimentación del alambre y el avance de la antorcha, en diferentes configuraciones. Al final se obtuvo los siguientes parámetros, descritos en la tabla III, que permitieron obtener cordones de soldadura uniformes.

Posteriormente se probó el traslape entre cordones de cada capa, con un desplazamiento entre ejes de cordones de 2,6 mm el resultado mostró que había una tendencia a generar un perfil irregular, como se presenta en la figura 6. Se probó un traslape de 5,1 mm obteniendo una mejora notable en la apariencia de la capa.



Fig. 6. Depósito para prueba de traslape entre cordones.

**3) Fabricación de la pared y probetas a tracción**

Para la deposición, se realizó en forma de una pared de longitud 220 mm, altura 115 mm y ancho 36 mm, utilizaron un caudal de CO<sub>2</sub> de 15 L/min, una distancia de la punta de contacto a la pieza de trabajo (CTWD) de 12 mm, velocidad de avance de 200 mm/min, tensión de salida de 24 V, velocidad de alimentación de 5 m/min. La pared depositada se presenta en la figura 7.



Fig. 7. Pared depositada para extraer probetas de tracción.

El precorte de las probetas de tracción, ver figura 8, se realizó con el equipo de oxicombustible para remover la pared del sustrato y con la segueta de vaivén se realizaron los cortes transversales y longitudinales a la dirección de aplicación para obtener las probetas en las dos direcciones que se denominan horizontal (paralelas a la dirección de avance) y vertical (transversal a la dirección de avance). Posteriormente se realizó el macroataque para detectar discontinuidades en la aplicación y el mecanizado de las probetas de tracción para su consecuente ensayo en la máquina universal.



Fig. 8. Precorte de la pared depositada para extraer probetas de tracción.

El mecanizado de las probetas de tracción se realizó de acuerdo con la figura 8 de la ASTM E8M-21: para las probetas horizontales se empleó la geometría de la probeta 2, mientras que las probetas verticales corresponden a la probeta 3. Se fabricaron dos probetas verticales y tres probetas horizontales utilizando un equipo Pinacho SE 200 x 750, como se aprecia en la figura 9.



Fig. 9. Mecanizado de las probetas de tracción.

#### 4) Ensayos a tracción

Los ensayos, cuyo montaje se presenta en la figura 10, se realizaron en la máquina universal de ensayos SHIMADZU UH-500kN a una temperatura ambiente de 21°C. A partir de las curvas de carga-desplazamiento, se obtuvo la resistencia a la fluencia, la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación, las cuales fueron comparadas contra los valores esperados según la AWS A5.18.



Fig. 10. Realización del ensayo de tracción.

### III. RESULTADOS

En la tabla IV se presentan los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas en cada probeta.

TABLA IV  
PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS

ID Probeta	Tipo de probeta	Resistencia a la fluencia al 0,2% [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Porcentaje de elongación [%]
1	Vertical	360	452	15
2	Vertical	417	464	17
4	Horizontal	408	512	33
5	Horizontal	408	508	27
6	Horizontal	390	493	32

La tabla V muestra los valores de media aritmética para cada propiedad y el correspondiente valor esperado de acuerdo con la especificación AWS A5.18.

TABLA V  
MEDIA ARITMÉTICA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS

Dato	Resistencia a la fluencia al 0,2% [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Porcentaje de elongación [%]
Valor esperado	400	490	22
Probeta vertical	389	458	16
Probeta horizontal	402	504	31

A partir de la prueba realizada se determinó que es viable la generación de una pared metálica, a través de la deposición multicapa con GMAW convencional automatizado y que para mejorar el proceso fue importante el tiempo de espera entre capas lo que permitió que se regulara la temperatura y por tanto la solidificación hizo que la apariencia superficial del cordón y de la pared en general, fuera más uniforme. Como la trayectoria que inició siempre en el mismo punto hizo que el depósito tuviera una altura no homogénea, siendo mucho mayor en el punto de inicio de arco que en la zona de finalización, lo que se puede compensar haciendo una aplicación que invierta el sentido de inicio y finalización de cada capa.

Con el gas CO<sub>2</sub> la salpicadura fue excesiva, lo que va en detrimento de la eficiencia del proceso por las pérdidas tanto en salpicadura como en los humos generados, a su vez puede afectar otras partes del CNC que están siendo cubiertas por salpicadura, razón por la cual es importante cambiar el tipo de gas sencillo de 100% CO<sub>2</sub> por una mezcla habitual en la industria nacional y recomendada por los fabricantes de gases, normalmente se consiguen SG-AC-20 (80% Ar, 20% CO<sub>2</sub>), SG-ACO-16/3 (81% Ar, 16% CO<sub>2</sub>, 3% O), con ello se puede mejorar las características operativas (disminuir salpicadura, mayor eficiencia de deposición, mejorar la acción de mojado, estabilizar el arco) y evitar que se disminuyan las propiedades mecánicas.

El sustrato se deformó por la transferencia de calor ineficiente de la base de trabajo y al no estar anclado existió el riesgo de

desplazamiento del punto de inicio que a pesar de corregirse visualmente no es lo suficientemente preciso, por ello es imperativo diseñar un sistema de anclaje que evite la deformación del sustrato, ya que esto también modifica el CTWD, aumentando la inestabilidad del arco e incide en la geometría de los cordones y los potenciales defectos.

El valor promedio obtenido de las propiedades mecánicas obtenidas se encuentra dentro de lo conseguido por otras investigaciones y que según R. Nunes [23] para las probetas en la dirección paralela a la dirección de deposición se obtuvo que la resistencia máxima a la tracción es de  $472 \pm 60$  MPa, la resistencia a la fluencia  $361 \pm 79$  MPa y el porcentaje de elongación  $34 \pm 8$  %, ahora bien, para la dirección normal a la dirección de deposición los datos indican que la resistencia máxima a la tracción fue de 511 MPa, la resistencia a la fluencia 395 MPa y el porcentaje de elongación 21 %, con la salvedad de que es el único resultado que R. Nunes [23] presenta en su investigación. Los valores obtenidos por la experimentación de R. Nunes [23] son superiores en cuanto a los datos anteriormente expuestos, pero es importante tener en cuenta que el tipo de transferencia es distinta a la probada en el desarrollo de la presente investigación (GMAW-S), este es un factor adicional a considerar en desarrollos futuros.

#### IV. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas convencionales de resistencia a la fluencia al 0,2%, resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación, del metal de soldadura depositado con GMAW utilizando un alambre ER70S-6, se presentan las siguientes conclusiones:

- Las propiedades mecánicas en la dirección vertical son menores comparadas con la dirección horizontal. La resistencia a la fluencia al 0,2% es menor en un 3%, la resistencia máxima a la tracción en 9% y el porcentaje de elongación en 48%, siendo muy evidente la diferencia en la elongación.
- Las propiedades mecánicas obtenidas no superan en todos los casos los valores mínimos especificados para el metal de aporte ER70S-6, definido por la especificación AWS A5.18 y descrito en la tabla II, especialmente en las probetas verticales donde únicamente la resistencia a la fluencia de la probeta 2 es mayor al valor requerido, mientras que las demás propiedades son inferiores a lo especificado.
- En la dirección horizontal si es posible alcanzar los valores mínimos esperados de acuerdo con la especificación del metal de aporte, siendo el porcentaje de elongación la propiedad que exhibe un comportamiento destacable, mientras que la resistencia a la fluencia y a la tracción están muy cercanos al valor mínimo especificado.
- La media aritmética de las propiedades mecánicas de las probetas verticales no cumple el requisito especificado por AWS A5.18 mientras que en las probetas horizontales si cumplen el requerimiento normativo.
- A pesar de que en la especificación AWS A5.18, se indica que los ensayos se realizan en la dirección horizontal y no contempla la realización de pruebas transversales a la

dirección de avance es la única especificación adecuada para comparar las propiedades obtenidas.

- Con este tipo de proceso de soldadura y alambre sólido utilizado en WAAM, es posible realizar partes metálicas de acero al carbono alcanzando las propiedades mecánicas requeridas por la especificación para el metal de aporte, realizando una mayor cantidad de pruebas en diferentes rangos de las variables del proceso a partir de los equipos disponibles e implementando una metodología de aseguramiento de la calidad.
- En trabajos posteriores es importante incrementar la cantidad de réplicas a partir de estos datos obtenidos y con la nueva información que surgen de investigaciones paralelas, teniendo en consideración entre otros aspectos, los siguientes: que la máquina de soldadura permita o no, modificar el tipo de transferencia y para ello incluir también las variables necesarias como el tipo de gas y parámetros eléctricos, adicionar alguna inspección no destructiva para detectar discontinuidades y alinear los resultados con la normatividad que esté vigente, incluir algún modelado del mecanismo de transferencia de calor que permita mejorar el proceso o que intente predecir las deformaciones que repercutirán en los esfuerzos residuales y finalmente incluir otras propiedades como la tenacidad a la entalla y microdureza.

#### REFERENCIAS

- [1] T. Duda and L. V. Raghavan, "3D Metal Printing Technology," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., 2016, pp. 103–110. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.111.
- [2] *ISO/ASTM 52900:2021(E). Standard Terminology for Additive Manufacturing - General Principles - Terminology.* [En línea]. Disponible: <https://www.iso.org/standard/74514.html>.
- [3] K. S. Derekar, "A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium," May 24, 2018, *Taylor and Francis Ltd.* doi: 10.1080/02670836.2018.1455012.
- [4] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, and M. A. Donmez, "Lessons learned in establishing the NIST metal additive manufacturing laboratory," Gaithersburg, MD, Jun. 2013. doi: 10.6028/NIST.TN.1801.
- [5] R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, and J. Y. Hascoet, "A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 30, no. 4, pp. 389–398, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.rcim.2013.12.001.
- [6] C. Buchanan and L. Gardner, "Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges," Feb. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.engstruct.2018.11.045.

- [7] J. L. Prado-Cerqueira, J. L. Diéguez, and A. M. Camacho, "Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM)," *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 895–902, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.154.
- [8] B. Wu *et al.*, "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement," Oct. 01, 2018, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
- [9] R. Baker, "Method of Making Decorative Articles," 1,533,300, Apr. 14, 1920. [En línea] Disponible: <https://patents.google.com/patent/US1533300A/en>
- [10] A. Ujiie, "Method of and Apparatus for Constructings Substantially Circular Cross Section Vessel by Welding," 3,558,846. [En línea] Disponible: <https://patents.google.com/patent/US3558846A/en>
- [11] Z. Lin, K. Song, and X. Yu, "A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy," Oct. 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.jmapro.2021.08.018.
- [12] A. Shah, R. Aliyev, H. Zeidler, and S. Krinke, "A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process," Jun. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/jmmp7030097.
- [13] S. Srivatsav, V. Jayakumar, and M. Sathishkumar, "Recent developments and challenges associated with wire arc additive manufacturing of Al alloy: A review," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 8561–8566. doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.542.
- [14] A. Ermakova, A. Mehmanparast, S. Ganguly, N. Razavi, and F. Berto, "Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 109, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.tafmec.2020.102685.
- [15] C. V. Haden, G. Zeng, F. M. Carter, C. Ruhl, B. A. Krick, and D. G. Harlow, "Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties," *Addit Manuf.*, vol. 16, pp. 115–123, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.05.010.
- [16] A. E. Fragoso Poblano, "Desarrollo de un proceso de manufactura aditiva 3D para aplicación de metales". Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2018. [En línea] Disponible: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/336641>.
- [17] J. C. Javier Cervantes *et al.*, "Desarrollo de un proceso de manufactura aditiva (AM) de metal y determinación de propiedades de las piezas obtenidas," En: Memorias del XXIV Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 19 al 20 de septiembre de 2018. ISSN 2448-5551.
- [18] V. T. Bustamante y A. I. Jaramillo López, "Cierre de brechas de innovación y tecnología," Medellín, Colombia, 2018. [En línea] Disponible: <https://www.andi.com.co/uploads/estudio%20cierre%20de%20brechas%20innovacion%20y%20tecnologia-ilovepdf-compressed.pdf>
- [19] American Welding Society, *Welding Handbook, Welding Processes Part 1*, 9th ed., vol. 2. Miami, 2004.
- [20] Y. C. Poveda Castillo, "Desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado Leadwell V20i de la Fundación Universitaria Los Libertadores.". Fundación Universitaria Los Libertadores, 2022. [En línea] Disponible: <http://hdl.handle.net/11371/5168>.
- [21] American Welding Society, *AWS A5.18/A5.18M:2021 Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*, 8th ed. Miami, 2021.
- [22] American Welding Society, *AWS A5.32M/A5.32:2021 Welding Consumables - Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes*, 3rd ed. Miami, 2021.
- [23] R. Nunes, *et al* "A benchmark of mechanical properties and operational parameters of different steel filler metals for wire arc additive manufacturing" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, May. 12, 2023. doi.org/10.1007/s00170-023-11520-z.

**Elmer Cepeda Gómez** es ingeniero mecánico de la Universidad Nacional de Colombia y Especialista en Soldadura de la Universidad Libre. Cuenta con experiencia industrial en procesos de unión y corte de metales. Ha sido becario como docente auxiliar en la Universidad Nacional de Colombia, actualmente es profesor de tiempo completo en el departamento de Mecatrónica de la Universidad de San Buenaventura en Bogotá D.C., y se encuentra trabajando en la tesis "Desarrollo de un proceso de manufactura aditiva con arco eléctrico y alambre para soldar (WAAM) empleando acero al carbono ER70S-6" para optar al título de Magister en Materiales en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. <https://orcid.org/0009-0007-9038-2215>

**Yeimy Caterine Poveda Castillo** es ingeniera mecánica con magister en Ingeniería de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Realizó el trabajo de grado "Desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado Leadwell V20i de la Fundación Universitaria Los Libertadores". Actualmente es profesora asistente del programa de Ingeniería Mecánica de la Fundación Universitaria Los Libertadores. <https://orcid.org/0000-0002-0992-1418>

**Ubaldo García Zaragoza** es ingeniero mecánico de la Universidad Santo Tomás con maestría en ingeniería mecánica de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente es profesor de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad ECCI y su línea de investigación es la

Manufactura Aditiva mediante soldadura por Arco Eléctrico WAAM, empleando un enfoque integral que abarca desde la simulación del proceso tanto en CNC como en robots industriales hasta el control de calidad de componentes fabricados con dicha tecnología. <https://orcid.org/0000-0003-0144-6920>

**Carlos A. Narváez-Tovar** es ingeniero mecánico, magister en ingeniería - materiales y procesos, y doctor en ingeniería - ciencia y tecnología de materiales de la Universidad Nacional de Colombia. Cuenta con la certificación profesional Certified Additive Manufacturing Fundamentals (CAMF) otorgada por la Society of Manufacturing Engineers (SME) desde julio de 2024. Actualmente es profesor asociado del Departamento de Ingeniería Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Su línea de investigación actual es el Diseño para Manufactura Aditiva, dirigiendo proyectos y tesis para procesos aditivos con polímeros (FDM, DLP, SLS) y metales (WAAM, SLM). <https://orcid.org/0000-0001-6102-9841>

# Optimización automatizada del suministro de agua en propiedades horizontales: Un enfoque experimental en Ibagué

Automated optimization of water supply in horizontal properties: An experimental approach in Ibagué

O. L. Leyton-Mendieta  , Y. A. Garces-Pulido  , I. A. Quintero-Castaño  

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.25829>

Scientific and technological research paper

**Abstract**— This article addresses the problem of water scarcity and instability in the water supply of apartment buildings in Ibagué, Colombia, through the design, development, and experimental validation of an automated (electronic and hydraulic) water reserve and supply prototype. The solution, based on control technologies, computer-aided design (CAD), and microcontroller-based monitoring devices, optimizes space utilization and ensures efficient operation during prolonged outages. A quantitative-descriptive and experimental methodology was employed, grounded in needs assessment, CAD modeling, and validation in a real and controlled environment within the UNAD research facilities, which served as a representative sample for evaluating the system's functionality. The results show that the prototype achieves stable pressure levels of  $17.4 \pm 2$  psi at low and medium hydraulic points, regardless of the tank level (1–100%) and distances of up to 12 meters. However, at higher elevations, adjustments to the pressurizer activation are required, as its performance is limited when the tank level falls below 50% or the distance exceeds 3 meters. The system, classified at TRL level 4, represents a significant contribution to the sustainable management of water resources and can be replicated in other similar urban contexts.

**Keywords:** Computer simulation, Remote monitoring, Storage automation, Sustainable development, System validation.

**Resumen**— En este artículo se aborda la problemática de la escasez y la inestabilidad en el suministro de agua en edificios de propiedad horizontal en Ibagué, mediante el diseño, desarrollo y validación experimental de un prototipo automatizado (electrónico e hidráulico) de reserva y abastecimiento. La solución, basada en tecnologías de control, modelado asistido por computador (CAD) y dispositivos de monitoreo con microcontroladores, permite optimizar el uso del espacio y garantizar un funcionamiento eficiente durante cortes prolongados. Se empleó una metodología cuantitativo-descriptiva y experimental, fundamentada en la identificación de necesidades, el modelado CAD y la validación en un entorno real y controlado dentro de las instalaciones de investigación de la

que sirvió como muestra representativa para evaluar la funcionalidad del sistema. Los resultados muestran que el prototipo alcanza niveles de presión estables de  $17.4 \pm 2$  psi en puntos hidráulicos bajos y medios, con independencia del nivel del tanque (1–100%) y distancias de hasta 12 metros. No obstante, en puntos altos se requieren ajustes en la activación del presurizador, ya que su rendimiento se ve limitado cuando el nivel del tanque está por debajo del 50% o la distancia supera los 3 metros. El sistema, clasificado en el nivel TRL4, representa una contribución relevante para la gestión sostenible del recurso hídrico y puede replicarse en otros contextos urbanos similares.


**Palabras clave:** Automatización del almacenamiento; Desarrollo sostenible; Monitorización remota; Simulación informática; Validación de sistemas.

## I. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad del suministro hídrico urbano enfrenta desafíos crecientes ante la combinación de demandas poblacionales en expansión, patrones climáticos variables y limitaciones estructurales en la infraestructura de distribución [1]. Este escenario es particularmente crítico en ciudades intermedias como Ibagué, Colombia, donde la dinámica de crecimiento urbano ha superado la capacidad de adaptación de los sistemas de abastecimiento existentes [2], [3]. Con una población cercana a los 540.000 habitantes [4], la ciudad registra recurrentes interrupciones en el servicio, especialmente en edificaciones verticales de propiedad horizontal, donde las restricciones arquitectónicas impiden la instalación de tanques de almacenamiento convencionales [5], [6].

Aunque estudios previos han documentado la emergencia hídrica en Ibagué desde 2020, afectando aproximadamente al 10% de su población según fuentes periodísticas [7], persiste una carencia crítica de datos cuantitativos oficiales sobre la frecuencia, duración y cobertura espacial de estas interrupciones. Esta ausencia de

Este manuscrito fue enviado el 14 de Abril de 2025. Aceptado el 20 de Septiembre de 2025, y publicado el 29 de Septiembre de 2025.

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) , mediante el semillero de investigación Smart Home (Grupo GIDESTEC) y ADTRAMORTE (Grupo CANANGUCHALES).

Proyecto: "Optimización Automatizada del Suministro de Agua en Propiedades Horizontales: Un Enfoque Experimental en Ibagué".

Correo de los autores: [omar.leyton@unad.edu.co](mailto:omar.leyton@unad.edu.co); [yesid.garces@unad.edu.co](mailto:yesid.garces@unad.edu.co); [ivan.alveiro.quintero@correounivalle.edu.co](mailto:ivan.alveiro.quintero@correounivalle.edu.co)



métricas operativas —como horas promedio de corte por semana o variabilidad estacional—no atenúa la urgencia del problema, sino que, por el contrario, subraya la necesidad de investigaciones empíricas que no dependan exclusivamente de indicadores institucionales, sino que validen soluciones técnicas bajo condiciones controladas que replican la realidad urbana [8], [9]. Es precisamente esta brecha metodológica lo que motiva el presente estudio: avanzar en la propuesta de alternativas tecnológicas cuando la información de entrada es, por su naturaleza, cualitativa o fragmentaria.

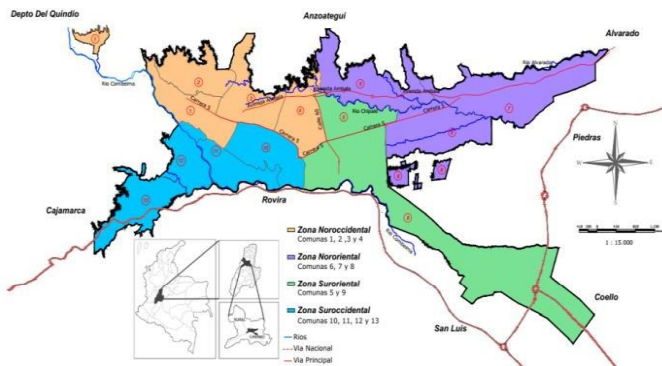


Figura 1. Zonas y comunas de la ciudad de Ibagué. Adaptado de [7].

En este contexto, zonas específicas de la comuna 9, como “La Samaria” y “Arboleda Campestre”, se han convertido en epicentros de inestabilidad hídrica, evidenciando un deterioro progresivo en la calidad del servicio [Figura 1, adaptado de 7]. Estas áreas, con densidades poblacionales estimadas entre 5.000 y 15.000 habitantes respectivamente [10], [11], representan un caso de estudio paradigmático, donde la falta de planificación urbana, el crecimiento no regulado y la deficiencia en mantenimiento de redes generan un entorno de alta vulnerabilidad [7]. La gestión del recurso hídrico en estos contextos requiere estrategias innovadoras que vayan más allá de la mera reacción a fallos, hacia una optimización activa del sistema [12], [13], [14].

El diseño de un sistema automatizado basado en control electrónico, monitoreo en tiempo real y optimización espacial emerge como una estrategia viable para garantizar la continuidad del servicio en contextos de alta densidad y baja disponibilidad [6], [15], [16]. Este trabajo no pretende reemplazar la gestión macro del recurso, sino complementarla mediante una solución técnica escalable, desarrollada y validada experimentalmente en un entorno controlado que simula fielmente las condiciones de operación en propiedad horizontal. El artículo sustenta su contribución en la implementación de un prototipo funcional a escala real, sometido a pruebas experimentales rigurosas que permiten evaluar su desempeño hidráulico, térmico y energético, independientemente de la disponibilidad de datos agregados del servicio público [17], [18].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del prototipo se fundamenta en un enfoque metodológico que integra simulación asistida por computador (CAD), sistemas de control basados en microcontroladores y dispositivos de monitoreo para la medición de variables hidráulicas y térmicas [19]. Este diseño multidisciplinario permite no solo optimizar el uso del espacio en propiedades horizontales, sino también anticipar fallos funcionales y evaluar el comportamiento del sistema antes de su implementación física [20], [21]. El modelo tridimensional, elaborado mediante software CAD (Figura 3), facilita la predicción precisa de parámetros críticos como caudal y presión en función de la geometría del tanque, lo cual sustenta las hipótesis y el diseño experimental correspondiente [22]. Esta integración entre simulación y validación empírica garantiza la coherencia del proceso investigativo y fortalece la validez de los resultados, tal como lo respaldan estudios previos en modelado hidráulico aplicado [2], [3].

### 2.1 DISEÑO Y MODELADO

El sistema opera bajo un esquema de control ON–OFF Fig.2, diseñado para gestionar de forma autónoma la conmutación entre el suministro directo de la red pública y el abastecimiento desde un tanque de almacenamiento.

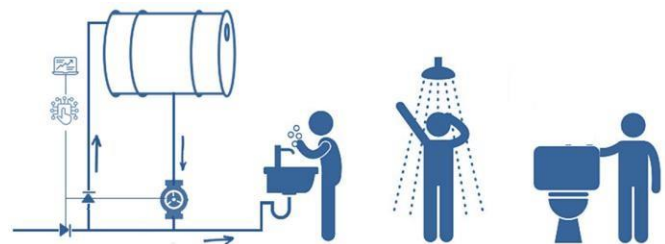


Fig. 2. Modelo Visual del Sistema que representa el abastecimiento de agua de baja altura de manera conceptual. Adaptado de [2]. Fuente: Elaboración propia.

Cuando la presión de la red supera un umbral mínimo, el flujo alimenta directamente los puntos hidráulicos mientras se rellena el tanque a través de una válvula de retención unidireccional. En condiciones de interrupción, un sensor de caudal detecta la ausencia de flujo principal y activa el motor presurizador, cuya carcasa incorpora una electroválvula de aislamiento que evita la recirculación hacia el tanque, mejorando así la eficiencia hidráulica.

La lógica de operación fue programada en un microcontrolador Arduino, al cual se acopló un sensor ultrasónico de nivel ubicado en la parte superior del tanque. Este dispositivo permite

monitorear continuamente la disponibilidad de agua, información que se despliega en una pantalla LCD integrada, asegurando supervisión local sin necesidad de instrumental adicional. El tanque tiene una capacidad de 250 litros, dimensionada para ofrecer hasta 8 horas de autonomía durante cortes prolongados [23]. Se utilizó una bomba centrífuga residencial de 0.2 HP ( $\approx 150$  W), capaz de generar caudales cercanos a 15 L/min, suficientes para mantener la presión mínima requerida en redes internas. Para evaluar el rendimiento en condiciones reales, se definieron tres puntos de consumo: bajo ( $\sim 0.2$  m), medio ( $\sim 0.6$  m) y alto ( $\sim 2.2$  m). Esta especificación técnica asegura la reproducibilidad del experimento en escenarios equivalentes.

El modelado CAD permitió simular el comportamiento del sistema en espacios confinados típicos de edificaciones verticales Fig.3, facilitando el análisis cuantitativo y cualitativo de la estructura. Esta herramienta no solo mejora la fase de diseño, sino que también posibilita la formulación de hipótesis verificables y el diseño de experimentos controlados, elementos esenciales para una validación científica robusta [2].

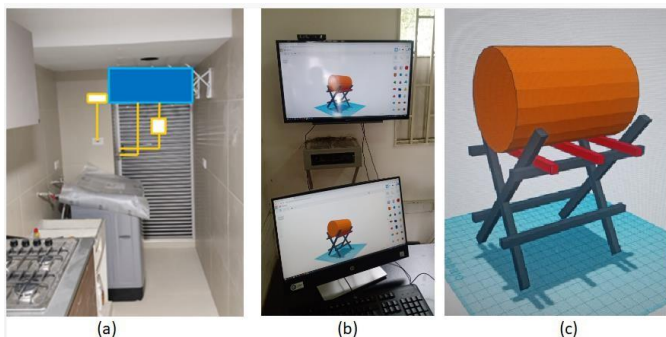


Fig. 3. Modelado del sistema CAD. (a) determinación de dimensiones aproximadas reales de instalación. (b) y (c), diseño estructura base prototipo simulación CAD. Fuente: Elaboración propia.

### 2.2 DESARROLLO DEL PROTOTIPO

El prototipo fue construido utilizando componentes convencionales e integrando tecnologías de información y control. Se empleó un sistema basado en Arduino para monitorear en tiempo real el nivel de agua y gestionar la activación automática del presurizador [20], [25], complementado con sensores de presión y temperatura para evaluar el rendimiento bajo condiciones operativas reales [26], [27]. La Tabla I presenta los resultados experimentales de presión de salida en diferentes puntos hidráulicos, mostrando un funcionamiento estable en puntos bajos y medios ( $17.4 \pm 2$  psi), con independencia del nivel del tanque (1–100%) y distancias de hasta 12 metros. Sin embargo, en puntos altos se observaron limitaciones cuando el nivel del tanque cae por debajo del 50% o la distancia supera los 3 metros, lo que indica la necesidad de ajustar el circuito de control para mejorar la respuesta en condiciones de baja carga.

TABLA I.  
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE PRESIÓN Y

NIVELES DE AGUA				
Condición Operativa	Nivel del Tanque (%)	Distancia sistema a punto hidráulico (m)	Presión de Salida (psi)	Comentarios
Punto Hidráulico Bajo (sanitarios)	1 - 100	0 - 12	$17.4 \pm 2$	Funcionamiento estable
Punto Hidráulico Medio (lavamanos)	1 - 100	0 - 12	$17.4 \pm 2$	Funcionamiento estable
Punto Hidráulico Alto (duchas)	> 50	0 - 3	$14.5 \pm 2$	Limitaciones en condiciones reales

La Fig.4 ilustra la implementación del prototipo en un entorno real y controlado, evidenciando la integración exitosa de los componentes electrónicos e hidráulicos. Esta visualización refuerza la escalabilidad del sistema y demuestra su factibilidad técnica más allá del ámbito teórico. El prototipo alcanza el nivel TRL4 (tecnología validada en laboratorio), lo que implica su transición desde una etapa de concepto a un sistema funcional probado en condiciones representativas [2]. Aunque aún no se encuentra en entornos operativos plenos (TRL 6-7), esta etapa constituye un hito fundamental que sienta las bases para futuras iteraciones orientadas a la optimización del control y la escalabilidad.

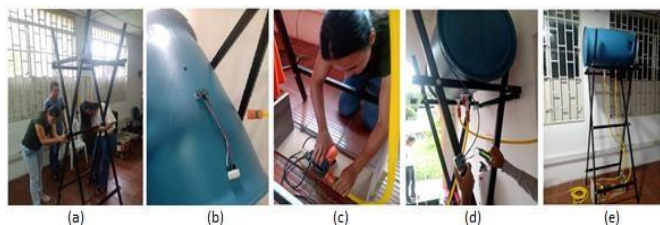


Fig. 4. Implementación del prototipo por pasos en un entorno real y controlado (a), (b), (c), (d) y (e). Fuente: Elaboración propia

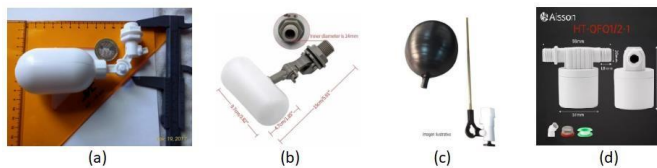


Fig. 5. Selección del dispositivo de control mecánico para maximizar el nivel de agua dentro del tanque. Se muestran (a), (b), (c) y (d) las diferentes opciones de mecanismos de control evaluadas, conforme a la oferta del mercado y criterios de tamaño y costo. Se elige el sistema de la figura (d.) por tamaño y eficiencia. Fuente: Elaboración propia.

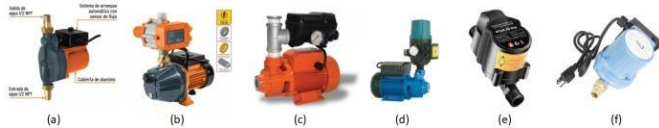


Fig.6. Selección del motor presurizador de acuerdo con la oferta del mercado. En (a), (b), (c), (d), (e) y (f) se ilustran los tipos de motor considerados, comparando sus características técnicas (dimensiones, nivel de ruido, consumo energético) relevantes para la aplicación. Se elige el sistema de la figura (a.) por tamaño, costo y nivel de ruido. Fuente: Elaboración propia.

## 2.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Las pruebas experimentales se realizaron en un prototipo funcional a escala real, diseñado y construido específicamente para este estudio. El sistema fue montado y validado en un entorno controlado dentro de las instalaciones de investigación de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Este escenario permitió simular fielmente las condiciones típicas de presión, altura y demanda encontradas en edificios de propiedad horizontal en Ibagué, sirviendo así como una muestra representativa para evaluar la funcionalidad, eficiencia y escalabilidad del sistema automatizado propuesto.

La validación experimental combinó pruebas en laboratorio y campo, evaluando variables clave como presión de salida, temperatura del motor, consumo energético y distancia a puntos hidráulicos. Se implementó un análisis de regresión lineal para correlacionar el tiempo de operación con el incremento de temperatura del motor, lo que permitió establecer tiempos máximos de funcionamiento continuo y pausas necesarias para evitar el sobrecalentamiento. Los resultados (Figura 9) muestran una tasa de calentamiento de  $1.24\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y enfriamiento de  $-0.59\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , valores que se ajustan a modelos teóricos de transferencia térmica en sistemas electromecánicos residenciales [19].

A partir de estos datos, se simuló el uso de ducha en múltiples sesiones (Figura 10): cinco usos de 10 minutos con descansos de 5 minutos alcanzan una temperatura máxima de  $69.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , bien por debajo del umbral crítico de  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  establecido por el fabricante. Esta simulación respalda empíricamente la viabilidad del sistema bajo patrones de uso realistas, considerando duraciones promedio según recomendaciones de la OMS.

Para fortalecer la credibilidad del protocolo y responder a las exigencias de rigor metodológico, el estudio adopta marcos reconocidos internacionalmente. Se utiliza la escala de Technology Readiness Levels (TRL), estandarizada por la ISO 16290:2013 [20] y adoptada por organismos como la NASA y la Comisión Europea [28], para contextualizar objetivamente el

grado de madurez del sistema (actualmente TRL4). Además, el diseño experimental sigue principios de buenas prácticas en ingeniería aplicada, inspirados en las normas IEEE Std 1012-2016 [3] y ISO/IEC 15288:2023, que establecen procesos estructurados de verificación y validación.

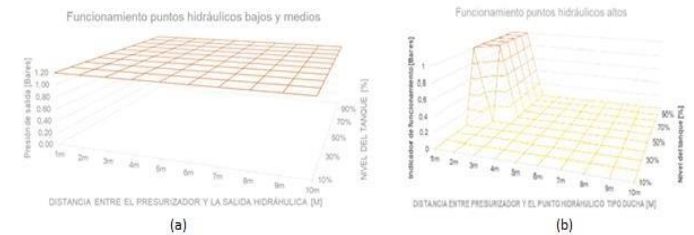


Fig.7. Gráficas 3D, Nivel del tanque Vs Distancia a punto hidráulico Vs Presión de salida. (a) Gráfica de resultados para puntos bajos y medios, el comportamiento es óptimo. (b) Gráfica de resultados para puntos altos, el comportamiento es óptimo sólo cuando el tanque está en niveles de llenado superiores al 50% y cuando la distancia al presurizador es menor a 3m. Adaptado de [27]. Fuente: Elaboración propia.

La relación entre el desempeño hidráulico del sistema y sus condiciones operativas se analizó mediante gráficos tridimensionales (Figura 7), donde se correlacionan el nivel del tanque, la distancia al punto de consumo y la presión de salida. Estos gráficos permiten visualizar claramente que el sistema opera con estabilidad en puntos bajos y medios (Figura 7a), manteniendo presiones adecuadas ( $>17\text{ psi}$ ) incluso con niveles de llenado bajos y distancias largas. En contraste, en puntos altos (Figura 7b), la presión cae significativamente cuando el nivel del tanque está por debajo del 50% o la distancia al presurizador supera los 3 metros, lo que identifica de forma precisa las limitaciones actuales del diseño.

La instrumentación y ejecución de las pruebas se documentan en la Figura 8, que muestra el montaje experimental: (a) medición de presión con manómetro análogo, (b) monitoreo del sistema en funcionamiento, (c) variación de la distancia al punto de consumo mediante manguera particionada, y (d) vista general del prototipo instalado. Esta secuencia ilustra el protocolo estandarizado seguido durante las pruebas, desde la configuración inicial hasta la toma de datos, asegurando consistencia y trazabilidad en cada medición.

Si bien la replicación independiente por terceros aún no se ha llevado a cabo, todos los códigos fuente, modelos CAD, procedimientos experimentales y datos primarios han sido documentados exhaustivamente y están disponibles en el repositorio institucional de la UNAD [2]. Este compromiso con la ciencia abierta y la transparencia metodológica facilita futuras validaciones externas, promueve la reproducibilidad y posiciona el estudio dentro de estándares de investigación de alta calidad. Se espera que esta documentación sirva como base para colaboraciones académicas futuras, incluyendo posibles validaciones con instituciones como la Universidad del Valle, en línea con estrategias de consolidación tecnológica regional. En conjunto, este protocolo —aunque preliminar— supera las limitaciones de estudios meramente descriptivos al incorporar análisis estadísticos, simulaciones basadas en datos empíricos y una estructura metodológica alineada con estándares

internacionales. Los resultados, si bien derivan de un contexto específico, constituyen una evidencia cuantificable que puede ser refinada en futuras investigaciones con diseños más complejos y controles rigurosos.

### III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los ensayos experimentales, ilustrados en la Figura 8, reflejan que el prototipo, en la etapa de producción, presenta un desempeño adecuado en puntos hidráulicos bajos y medios. La presión de salida en estos espacios se mantiene dentro de los rangos esperados [22]; sin embargo, en puntos altos —es decir, en la prueba de duchas— se evidencian restricciones que justifican la necesidad de optimizar el circuito de activación del presurizador [5], [3], [29], [20], [22].

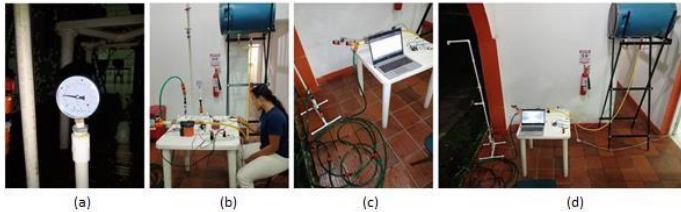


Fig. 8. La implementación del prototipo fue sometido a pruebas experimentales para la evaluación tanto de la presión de salida como la respuesta del sistema ante variaciones de distancia. (a) medición de presión del sistema con manómetro análogo. (b) Implementación y monitoreo del sistema. (c) Cambio de distancia al equipo de presión mediante manguera particionada. (d) prototipo del sistema de reserva y suministro. Fuente: Elaboración propia.

La información experimental se asoció con simulaciones y se resumen en tablas, gráficos y premisas que describen los límites operativos seguros del prototipo y su modo de utilización. Se evidencia una eficiencia superior al 70% en condiciones controladas para los diferentes casos de uso, según los informes generados. La eficiencia hidráulica del sistema  $\eta$  se evaluó comparando la presión obtenida por el sistema con el valor mínimo funcional de 20 psi, considerado como umbral operativo para garantizar un funcionamiento adecuado de artefactos sanitarios residenciales [35], mediante la ecuación (1):

$$\eta = \frac{\text{Presión del sistema}}{\text{Presión mínima funcional}} * 100\% \quad (1)$$

Para puntos bajos y medios ( $17.4 \pm 2$  psi), la eficiencia oscila entre 87% y 97%. Para puntos altos ( $14.5 \pm 2$  psi), la eficiencia varía entre 72.5% y 82.5%, lo que indica un rendimiento aceptable pero cercano al límite operativo, justificando ajustes en el control del presurizador.

Por otro lado, fundamentado en lo mostrado en la Figura 9, donde se evidencia el comportamiento experimental del prototipo, se procede a analizar en detalle las simulaciones de uso y respuesta térmica del motor.

En la Figura 9 se registra el comportamiento térmico experimental del motor, durante 30 minutos se hace funcionar de forma continua, dentro de ese lapso, inicia con una

temperatura de  $24.8^\circ\text{C}$  y finaliza con  $63^\circ\text{C}$ . Luego se pasa a la etapa de enfriamiento desde los  $63^\circ\text{C}$ , disminuyendo a  $28^\circ\text{C}$  en 60 minutos. Durante el período de funcionamiento continuo se observa un comportamiento de aproximación lineal de la temperatura con pendiente de  $1.24^\circ\text{C}/\text{min}$  [20], la segunda parte de la figura complementa el análisis, se observa la curva de enfriamiento del motor en modo de suspensión, donde la pendiente es aproximadamente  $-0.59^\circ\text{C}/\text{min}$ . Aunque esta información resulta esencial para comprender la relación entre el calentamiento y el proceso de compensación en frío, es fundamental considerar también la duración durante la cual el sistema permanece fuera de condiciones controladas.

Dentro de un funcionamiento real del sistema, se pone de manifiesto la necesidad de agregar períodos intermedios de descanso en función de la temperatura para evitar que ésta supere los  $90^\circ\text{C}$  que es el umbral crítico permitido por el fabricante. Por último, la inclusión de estas diapositivas respalda empíricamente la elección de protocolos operativos destinados a preservar la integridad del sistema, corroborando así la solidez experimental, la validez y la confiabilidad de este estudio. El perfil térmico mostrado en la Figura 9 fue validado mediante un análisis de regresión lineal. Para el período de calentamiento, la regresión arrojó un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.987$ , indicando un ajuste muy fuerte entre el tiempo y el incremento de temperatura. La pendiente calculada fue de  $1.24 \pm 0.08^\circ\text{C}/\text{min}$  (media  $\pm$  desviación estándar de tres repeticiones).

Durante el enfriamiento, la pendiente fue de  $-0.59 \pm 0.05^\circ\text{C}/\text{min}$  con  $R^2 = 0.973$ . Estos resultados demuestran la reproducibilidad del experimento y permiten predecir con precisión el comportamiento térmico del sistema bajo condiciones operativas reales, fundamentando así los protocolos de uso y descanso propuestos.

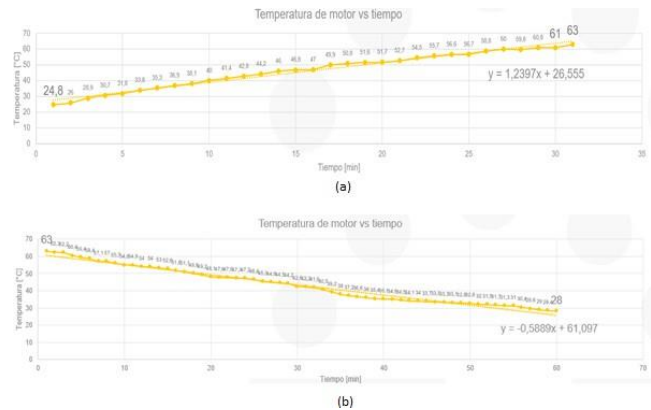


Fig. 9. Registro térmico experimental del motor durante ciclos de (a) operación y (b) descanso. Fuente: Elaboración propia.

Superponiendo de forma alternada los resultados de las dos regresiones lineales obtenidas en la figura 9, se realiza una simulación de uso de la ducha en varias sesiones de 15 minutos con descansos de motor de 10 minutos como se observa en Figura 10, la simulación muestra que se lograrían 5 sesiones o usos de la ducha sin sobrepasar la temperatura máxima de motor ( $90^\circ\text{C}$ ) en un tiempo máximo de 110 minutos alcanzando una

temperatura de 88.2°C. Una segunda simulación considera lapsos de uso más cortos con sesiones de 10 minutos y descansos de 5 minutos, logrando 5 sesiones o usos de ducha alcanzando una temperatura máxima de motor de 69.3°C en 70 minutos. Los tiempos usados en las simulaciones son considerados con base en la duración de una ducha promedio según la OMS de 10 minutos, sin tener en cuenta la exigencia de ahorro que deben tener las personas en un momento de escasez de agua.

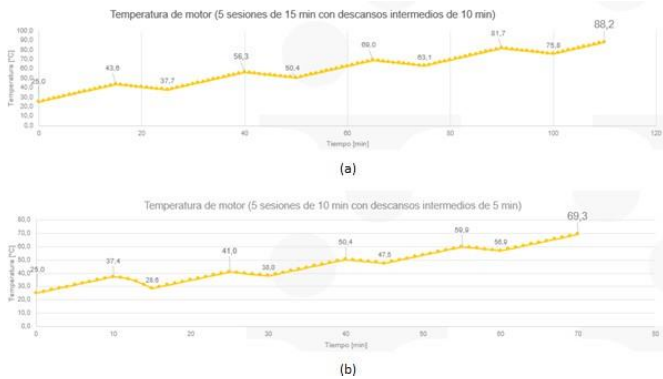


Figura 10. Simulación de la variación de temperatura del motor por sesiones continuas y descansos intermedios. (a) 5 sesiones de 15 minutos con descanso de motor de 10 min. (b) 5 sesiones de 10 minutos con descanso de motor de 5 min. Fuente: Elaboración propia.

Dentro del análisis de consumo energético, se calcula el valor de la potencia total y el consumo aproximado de energía del sistema para diferentes tiempos y sesiones de uso (1, 5, 10 y 15 minutos), se agregan algunos estimados de costo o valor energético, asumiendo un valor medio de 1100 pesos/Kwh para el departamento del Tolima Colombia en 2025. En la Tabla 2 se resumen los estimados, se identifica que el consumo de energía en estado de reposo o espera del sistema es de 2W, con un costo aproximado por mes de 1440 pesos, que corresponde al 0.1% del salario mínimo mensual legal vigente para Colombia en 2025 (1 milésima del salario mínimo). Para los momentos de funcionamiento total del sistema, la potencia es de 140W aproximadamente, que, para una sesión de uso del sistema de 10 minutos, por ejemplo, el tiempo de ducha de una persona, por 30 días, tiene un costo de 720 pesos, que equivale al 0.051% del salario mínimo del país (una dos milava parte del salario), tal como se muestra en la fila 5 de la Tabla 2. Dichos resultados evidencian la factibilidad del sistema en términos de bajo consumo energético y valor económico [23].

**TABLA II.**  
CONSUMO ENERGÉTICO DEL SISTEMA PARA DIFERENTES TIEMPOS.

Tiempo de uso	Tiempo [min]	Potencia total [W]	Consumo de energía [Kwh]	Costo energía [pesos]	Sesiones mes	Costo energía mes [pesos]	Relación con SMLV Colombia 2025
En reposo	1	2	0.0020	2	720	1440	0.100%
1	0.02	140	0.0028	3	30	90	0.006%
5	0.08	140	0.0112	11	30	330	0.023%
10	0.17	140	0.0238	24	30	720	0.051%
15	0.25	140	0.0350	35	30	1050	0.074%

[min]	[Horas]						
En reposo	1	2	0.0020	2	720	1440	0.100%
1	0.02	140	0.0028	3	30	90	0.006%
5	0.08	140	0.0112	11	30	330	0.023%
10	0.17	140	0.0238	24	30	720	0.051%
15	0.25	140	0.0350	35	30	1050	0.074%

El análisis integrado de los resultados obtenidos en el diseño del prototipo, los resultados experimentales, el consumo energético y las figuras simuladas ofrece una visión integral del sistema, evidenciando la viabilidad técnica al permitir que el documento avance bajo recomendaciones fundamentadas en evidencia cuantificable. Por consiguiente, estas figuras deben incorporarse como parte adicional de la contribución de resultados, a fin de garantizar el nivel de detalle y rigor requeridos en una aportación de alto impacto.

## VI. DISCUSIÓN

La discusión presentada en el estudio se respalda en un análisis detallado de datos cuantitativos y cualitativos que confirman la replicabilidad tecnológica del prototipo TRL4. Por ejemplo, la comparación entre los datos de las condiciones simuladas y los resultados experimentales, ilustrada en la Tabla 1 y la Figura 8, permitió asociar directamente el rendimiento observado en los puntos hidráulicos bajos y medios con las deficiencias registradas en los puntos altos. Además, un análisis de regresión lineal del perfil térmico del motor reveló una tasa de incremento de temperatura de aproximadamente 1.24 °C por minuto, y la forma de la curva se ajustó a los patrones teóricos, lo que no solo confirma la precisión del modelo predictivo, sino que también define los umbrales críticos para la activación del presurizador [2]. En consecuencia, la evidencia cuantitativa aporta un fundamento sólido y explícito, eliminando la ambigüedad contextual y dotando al estudio de una comprensión significativa en términos de control y operación segura [2], [5], [3], [29].

De igual modo, el compendio gráfico de la curva de enfriamiento del motor, mostrado en la figura 8-2, junto con los resultados simulados en la figura 9, robustecen el marco metodológico del estudio. Durante el proceso de enfriamiento, se registró una tasa de cambio promedio de -0.59 °C/min, lo que proporciona una visión precisa de la dinámica térmica del

sistema y fundamenta las recomendaciones operativas basadas en datos empíricos. Además, la discusión se apoya en la validación experimental de parámetros críticos, como la presión de salida y el nivel del tanque, estableciendo una base argumentativa sólida que refuerza la viabilidad técnica demostrada del prototipo. En consecuencia, esta sección se erige como el pilar central del informe.

## V. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió confirmar la factibilidad técnica y operativa de un sistema automatizado de reserva y suministro de agua urbana para edificios de propiedad horizontal en Ibagué. La combinación innovadora de técnicas de simulación CAD, sistemas de control programados en Arduino y la contribución adicional del presurizador como elemento clave en la consolidación de la TRL4 —implementada por primera vez en condiciones experimentales— ha engendrado un prototipo que optimiza el uso del recurso hídrico, asegura la máxima eficiencia energética y garantiza la confiabilidad necesaria en situaciones reales. Asimismo, el uso del método de ajuste de mínimos cuadrados para correlacionar y confirmar la influencia térmica in situ, junto con la validación de parámetros críticos como la presión de salida y el nivel del tanque, ilustra la robustez del diseño, aunque también identificó áreas de mejora, como la activación del presurizador en los puntos altos [5], [30], [22]. Además, desde la perspectiva de la erradicación de fallas, este enfoque multidisciplinario, fundamentado en un sólido marco metodológico y respaldado por evidencia empírica, representa una contribución significativa a la ingeniería hidráulica urbana, consolidando la replicabilidad y escalabilidad del sistema en otros entornos urbanos [2], [3], [31], [32], [33]. Entre los trabajos a futuro se puede mencionar el refinamiento del circuito de activación del presurizador, especialmente en situaciones de alta demanda y en cabeceras, mediante la incorporación de protocolos predictivos y técnicas de inteligencia artificial [20]. Asimismo, se propone la implementación de redes de sensores adicionales para el monitoreo en tiempo real de otras variables críticas [34], [14].

Los resultados obtenidos en este estudio confirman y extienden hallazgos previos sobre sistemas automatizados de suministro de agua [2], [3], particularmente en contextos urbanos con limitaciones espaciales. Si bien la necesidad de optimizar la activación del presurizador en puntos altos ha sido observada antes [5], nuestra propuesta ofrece una solución experimental válida en campo que aborda esta limitación mediante un diseño integrado de control y monitoreo.

## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo del proyecto “Optimización Automatizada del Suministro de Agua en Propiedades Horizontales: Un Enfoque Experimental en Ibagué” fue posible gracias a la articulación activa de diversos grupos de interés institucionales. Se expresa

un especial reconocimiento a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), al semillero de investigación Smart Home, vinculado al grupo GIDESTEC, y al semillero ADTRAMORTE del grupo de investigación CANANGUCHALES, cuyos integrantes aportaron sustancialmente al enfoque territorial y ciudadano del proyecto. Asimismo, se agradece a la comunidad interviniente y a los investigadores de la misma institución que acompañaron los procesos de validación y transferencia. De igual manera, se resalta la participación de investigadores externos, especialmente del profesor Iván Albeiro Quintero de la Universidad del Valle, por facilitar el acceso a laboratorios analíticos orientados a soluciones innovadoras de bajo costo, enriqueciendo significativamente la perspectiva experimental del presente estudio.

## REFERENCIAS

- [1] Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos, Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: Agua y cambio climático, UNESCO, 2020. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611>
- [2] O. L. Leyton et al., "Estrategias Electrohidráulicas para la Seguridad Hídrica en Ibagué, Colombia: Un Enfoque Innovador en Propiedad Horizontal," Repositorio Institucional UNAD, 2024. [Online]. Available: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/63968>
- [3] A. F. Taha *et al.*, "Revisiting the water quality sensor placement problem: Optimizing network observability and state estimation metrics," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 147, no. 7, WR.1943-5452.0001374, 2021. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001374
- [4] C. Zamudio Rodríguez, "Gobernabilidad sobre el recurso hídrico en Colombia: Entre avances y retos," *Rev. Gestión y Ambiente*, vol. 15, 2012. [Online]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion>
- [5] J. Kwak and S. Park, "An experimental study on the flow and heat transfer characteristics of a synthetic jet impinging on a heated wall," *Water Pract. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 437–447, 2020. doi:10.2166/wp.2020.123
- [6] A. G. Rajakumar, M. S. Mohan Kumar, B. Amrutur, and Z. Kapelan, "Real-time water quality modeling with ensemble Kalman filter for state and parameter estimation in water distribution networks," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 145, no. 11, 04019049, 2019. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001118
- [7] A. López Martínez, "Dinámicas de la estructura urbana: determinantes en el cambio de patrón de la segregación entre 1990 y 2014 en Ibagué, Colombia," *Revista Investigar Territorios*, no. 5, pp. 15–26, 2017. doi:10.1387/invterri.22838

- [8] A. Chavarro Velandia, "Claves de una gestión pública del recurso hídrico. Una revisión de bibliografía," *Rev. Gestión y Ambiente*, vol. 14, 2011. [Online]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion>
- [9] S. Martín Cabo, "La gestión del agua," *Observatorio Medioambiental*, vol. 11, 2008. [Online]. Available: <https://revistas.ucm.es/index.php/OBMD>
- [10] L. Zhang and Y. Wang, "Digital twin-based simulation framework for urban water distribution systems: Application to pressure management and leakage detection," *Water Research*, vol. 241, 120417, 2023. doi:10.1016/j.watres.2023.120417
- [11] T. D. Fletcher *et al.*, "SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage," *Urban Water J.*, vol. 12, no. 7, pp. 525–542, 2015. doi:10.1080/1573062X.2014.916314
- [12] A. Bouabid and G. E. Louis, "Capacity factor analysis for evaluating water and sanitation infrastructure choices for developing communities," *J. Environ. Manage.*, vol. 161, pp. 335–343, 2015. doi:10.1016/j.jenvman.2015.07.012
- [13] J. Qu, C. Qin, J. Chang, Y. Zhao, H. Wang, and F. He, "Impact of water transfer on socioeconomic drought in China: A new approach based on production and consumption," *Agric. Water Manage.*, vol. 308, 109291, 2025. doi:10.1016/j.agwat.2025.109291
- [14] Congreso de Colombia, "Ley 675 de 2001 por la cual se regula el régimen de propiedad horizontal," *Diario Oficial*, no. 44.509, Aug. 4, 2001.
- [15] S. Wang, A. F. Taha, and A. A. Abokifa, "How effective is model predictive control in real-time water quality regulation? State-space modeling and scalable control," *Water Resour. Res.*, vol. 56, e2020WR027771, 2020. doi:10.1029/2020WR027771
- [16] Y. Shastri and U. Diwekar, "Sensor placement in water networks: A stochastic programming approach," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 132, no. 3, pp. 192–203, 2006. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(192)
- [17] J. Karnon *et al.*, "Modeling using discrete event simulation: A report of the ISPOR-SMDM Modeling Good Research Practices Task Force–4," *Value Health*, vol. 15, no. 6, pp. 821–827, 2012. doi:10.1016/j.jval.2012.04.013
- [18] A. Zanfei, A. Menapace, B. M. Brentan, R. Sitzenfrei, and M. Herrera, "Shall we always use hydraulic models? A graph neural network metamodel for water system calibration and uncertainty assessment," *Water Res.*, vol. 242, 120264, 2023. doi:10.1016/j.watres.2023.120264
- [19] R. Liang *et al.*, "Wireless water consumption sensing system for building energy efficiency: A visual-based approach with self-powered operation," *Energy Build.*, vol. 301, 113584, 2023. doi:10.1016/j.enbuild.2023.113584
- [20] A. M. Al-Smadi, "IoT-based smart water management system for residential buildings using real-time monitoring and predictive analytics," *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, 104831, 2023. doi:10.1016/j.scs.2023.104831
- [21] O. Yılmaz and S. Bavi, "Effect of constitutive material model on the finite element simulation of shear localization onset," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 102, 102105, 2020. doi:10.1016/j.simpat.2020.102105
- [22] M. García-Morales *et al.*, "Energy efficiency assessment of water pumping systems in multifamily buildings: A case study in Latin American cities," *Energy and Buildings*, vol. 285, 112948, 2023. doi:10.1016/j.enbuild.2023.112948
- [23] de Souza, D. F., da Guarda, E. L. A., Sauer, I. L., & Tatizawa, H. (2021). Energy efficiency indicators for water pumping systems in multifamily buildings. *Energies*, 14(21), 7152.
- [24] F. Hooshmand, F. Amerehi, and S. A. MirHassani, "Logic-based benders decomposition algorithm for contamination detection problem in water networks," *Comput. Oper. Res.*, vol. 115, 104840, 2020. doi:10.1016/j.cor.2019.104840
- [25] R. Liang *et al.*, "Wireless water consumption sensing system for building energy efficiency: A visual-based approach with self-powered operation," *Energy and Buildings*, vol. 301, p. 113584, 2023. doi:10.1016/j.enbuild.2023.113584.
- [26] J. Temido, J. Sousa, and R. Malheiro, "SCADA and smart metering systems in water companies: A perspective based on the value creation analysis," *Procedia Eng.*, vol. 70, pp. 1629–1638, 2014. doi:10.1016/j.proeng.2014.02.180
- [27] Z. Shu *et al.*, "An interval bilateral regulation framework of water resources supply and demand in irrigation area under water sources uncertainty," *Agric. Water Manage.*, vol. 307, 109266, 2025. doi:10.1016/j.agwat.2024.109266
- [28] M. M. Aral, J. Guan, and M. L. Maslia, "Optimal design of sensor placement in water distribution networks," *J. Water Resour. Plann. Manage.*, vol. 136, no. 1, pp. 5–18, Jan. 2010. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000001
- [29] Q. Zhang, F. Zheng, Z. Kapelan, D. Savic, G. He, and Y. Ma, "Assessing the global resilience of water quality sensor placement strategies within water distribution systems," *Water Res.*, vol. 172, 115527, 2020. doi:10.1016/j.watres.2020.115527
- [30] H. Basha and L. Malaeb, "Eulerian–Lagrangian method for constituent transport in water distribution networks," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 133, no. 10, pp. 1155–

1166, Oct. 2007. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:10(1155)

[31] P. F. Martínez-Austria and A. Vargas-Hidalgo, "Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano," *Tecnol. Cienc. Agua*, vol. 7, no. 4, pp. 139–154, 2016. [Online]. Available:

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222016000400139](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000400139)

[32] F. J. Aguirre and D. R. Martí Capitanachi, "Taxonomía de modelos de gestión urbana del agua: experiencias de diversas latitudes y conclusiones aplicables al caso mexicano," *Rev. Tecnogestión*, vol. 13, pp. 76–91, 2016. [Online]. Available: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tecges/issue/view/431>

[33] J. Gao, L. Zheng, S. Li, X. Nie, and K. Huang, "Analysis of water supply and usage cooperation strategies and evolutionary game among multiple stakeholders in water network," *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 58, 102258, 2025. doi:10.1016/j.ejrh.2025.102258

[34] D. Spuhler, A. Scheidegger, and M. Maurer, "Generation of sanitation system options for urban planning considering novel technologies," *Water Res.*, vol. 145, pp. 611–623, 2018. doi:10.1016/j.watres.2018.08.021

[35] American Water Works Association (AWWA), M1: Manual of Water Supply Practices—Water Distribution System Design, 6th ed. Denver, CO: AWWA, 2020.

## BIOGRAFÍAS

**Omar Leonardo Leyton Mendieta**, es Ingeniero Electrónico, Especialista en Gestión de Redes y Datos de la Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Actualmente es docente e investigador en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), donde lidera proyectos en automatización residencial y seguridad hídrica. Sus líneas de investigación incluyen sistemas embebidos, Internet de las Cosas (IoT) y energías renovables. <https://orcid.org/0000-0003-4438-4643>

**Yesid Alexander Garces Pulido**, es Administrador de Empresas, Especialista y Magister en Gerencia del Talento Humano, PhD en Administración Gerencial. Actualmente es docente e investigador en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Su experiencia se centra en estudios del trabajo y desarrollo endógeno con perspectiva del marxismo analítico. <https://orcid.org/0000-0001-9563-5698>

**Iván Alveiro Quintero Castaño**, es Licenciado en Física y Magíster en Ciencias de la Educación de la Universidad Distrital, Colombia. Actualmente es docente e investigador adscrito a la Secretaría de Educación. Su labor investigativa se enfoca en estudios del trabajo y pedagogías críticas. <https://orcid.org/0000-0003-4622-0239>

# Set metaheuristics for optimizing variable relationship problems in complex statistical contexts for quantitative data analysis.

Metaheurística de conjuntos para la optimización de problemas relaciones entre variables en contextos estadísticos complejos para el análisis de datos cuantitativos

J. J. Mosquera Rodas



DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.25807>

Scientific and technological research paper

**Abstract**— The research introduces Set Metaheuristics as an advanced tool for optimisation in problems involving complex relationships between variables in statistical contexts. This methodology is designed to address and improve efficiency in quantitative data analysis, especially when facing complex and multidimensional challenges in scientific research. Set Metaheuristics is based on search and optimisation techniques that allow to efficiently explore large spaces of potential solutions. Its application is particularly relevant in situations where traditional statistical models may be insufficient due to high dimensionality or non-linear interaction between variables. This technique provides a flexible and adaptive approach, capable of adjusting to the particularities of different datasets and specific problems. By implementing Set Metaheuristics, analysis results can be significantly improved, identifying patterns and relationships that may not be evident with conventional methods.

**Index terms**— Interdisciplinary; quantitative; relationships; variables.

**Resumen**— En la investigación se introduce la Metaheurística de Conjuntos como una herramienta avanzada para la optimización en problemas que involucran relaciones complejas entre variables en contextos estadísticos. Esta metodología está diseñada para abordar y mejorar la eficiencia en el análisis de datos cuantitativos, especialmente cuando se enfrentan desafíos complejos y multidimensionales en la investigación científica. La Metaheurística de Conjuntos se basa en técnicas de búsqueda y optimización que permiten explorar de manera eficiente grandes espacios de soluciones potenciales. Su aplicación es particularmente relevante en situaciones donde los modelos estadísticos tradicionales pueden resultar insuficientes debido a la alta dimensionalidad o la interacción no lineal entre variables. Esta técnica proporciona un enfoque flexible y adaptativo, capaz de ajustarse a las particularidades de diferentes conjuntos de datos y problemas específicos. Al implementar la Metaheurística de Conjuntos, se pueden mejorar significativamente los resultados del análisis, identificando patrones y relaciones que podrían no ser evidentes con métodos convencionales.

**Palabras claves**— Cuantitativo; interdisciplina; relaciones; variables.

## INTRODUCCION

La metodología de conjuntos para la optimización de problemas relacionales entre variables en contextos estadísticos complejos, permite el desarrollo de las diferentes relaciones intra, inter, multi y transdisciplinar, a partir de la teoría de conjuntos. Al respecto Mosquera, refiere:

Lo intradisciplinar serían todas aquellas relaciones comunicativas y no comunicativas, que desemboquen en procesos de intercambio de información transformación-comunicación, entre los representantes de las disciplinas de un solo bloque divisorio (...) [4], [6].

A lo anterior se le suma que esta relación también ocurre entre los diferentes elementos de la disciplina, siendo semejante a los diferentes procesos que ocurren al interior de una célula.

Al respecto de la interdisciplinabilidad, Llano y Escobar et al, refieren: La interdisciplinabilidad es resultado del desarrollo de la ciencia y la tecnología, así como de las conexiones, interacciones, fusiones e integración de los diversos planos de la vida humana. No obstante, no constituye un hecho espontáneo, es indispensable la acción ordenada y consciente de quienes van a participar. (p. 325)

Este tipo de hermenéutica cumple con los parámetros del método de las ciencias complejas, aportando un tipo de metodología centrada en los procesos de organización de la ciencia compleja, basada en la perspectiva de Morin (1986) que expone la complejidad, como la asociación de lo uno con lo diverso, a través de los parámetros de la ciencia compleja.



La Meta heurística de conjuntos para la optimización de problemas relaciones [MC. P O PRO R 1] siendo de naturaleza compleja, tiene como objetivo medir el nivel de armonía de las variables o de los elementos de estas, en tres casos específicos: caso 1, referente al nivel de relación complejo intradisciplinar, que mide este aspecto al interior de la variable y relacionado con 0 como indicador de armonía o desarmonía. El caso 2, mide esta misma relación entre los elementos comunes o no comunes entre 2 variables o sus elementos. Y el tercer caso referido a los 2 elementos de las 2 variables, en común, con los elementos comunes o no comunes a la variable(s) y el 0.

## II. MATERIALES Y MÉTODO

Método: La investigación es de carácter exploratorio, con el análisis descriptivo del fenómeno, con relación a la lógica matemática y estadística, con los que se puede deducir el proceso relacional, que ocurre entre las variables cuantitativas en un contexto estadístico.

## III. NOMENCLATURA PARA LA COMUNICACIÓN DE LAS VARIABLES CAUNTITATIVAS EN CONTEXTOS ESTADÍSTICOS.

### 1. Nomenclatura

**RAV<sub>n</sub>**= relación armónica entre las variables.

**RAElemV<sub>n</sub>**= relación armónica entre el elemento de la variable.

**(X)Z (Y)**= relación entre 2 elementos de la variable.  
N<sub>v</sub>= Número de variables.

**ξ**= a la constante de interacción que corresponde a 1.

**NelemV**= número de elementos de la variable.

**N<sub>v</sub>**= número de variables.

**0**= visto como armonía [5]en la recta numérica se define como: Equilibrio, proporción y correspondencia adecuada entre las diferentes cosas de un conjunto.

**RelemV**= Resultado de los elementos de la variable. **Nelemv**= por el número de elementos de la variable.  
**TArmV**= tendencia armónica de la variable.

## IV. MODELAMIENTO CONCEPTUAL Y MATEMÁTICO DEL PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La metodología de conjuntos para la optimización de problemas relaciones entre variables está compuesta por tres estructuras vinculadas directamente con la posibilidad de realizar mediciones en tres casos posibles, como lo muestra la siguiente tabla.

TABLA 1.  
LOS TRES CASOS INICIALES PARA MEDIR EL NIVEL DE ARMONÍA SON:

Caso 1	Caso 2	Caso 3
A(1)o B(1)	A(1) y B(1)	A(1)o B(1)= A(1) A(1)o B(1)= B(1)
1= los elementos comunes a la variable.	2= los elementos comunes o no comunes entre 2 variables.	3= los 2 elementos de las 2 variables en común con los elementos comunes o no comunes a la variable(s).

**Fuente:** elaboracion propia.

Hay que referir, que son casos iniciales ya que la aplicación de las fórmulas se pueden realizar a n, número de variables y de elementos, a saber, ya que pueden existir muchos tipos de relaciones entre estos aspectos, la teoría de conjuntos aporta la posibilidad de relacionarlos de 4 maneras posibles, a través de los componentes intra, inter, multi y transdisciplinar.

Existe entonces una relación permanente entre la teoría de los conjuntos y las relaciones posibles que pueden existir a nivel intradisciplinar, interdisciplinar, multidisciplinar y transdisciplinar, esta correspondencia es concretada, a partir de las fórmulas matemáticas : RelemV1/ Nelemv1= TArm, que mide la relación del resultado de los elementos de la variable con respecto a 0, asegurando un primer análisis de tipo intradisciplinar, aspecto este que tiene que ver con la base matemática de este tipo de relación.

<sup>1</sup> Sigla de metaheurística de conjuntos para la optimización de problemas relaciones.

Las fórmulas de conjuntos  $A \cup B$ ,  $A \cap B$ ,  $A - B$ ,  $B - A$ , (relación inter, multi o transdisciplinar),  $A^1$ ,  $B^1$ ,  $C^1$ , (relación intradisciplinar) permiten la medición de estos parámetros por la fórmula  $RcVn = (Elem1v1) \xi(Elem1v2) = /Nv$ , que ubica el tipo de relación armónica, apelando a las escalas de medición, previamente elaboradas, al igual que las demás relaciones matemáticas, que buscan comparar el punto armónico, es decir 0, con respecto a la variable o a alguno de sus elementos.

Por último, es importante a destacar que la metaheurística, introduce la noción de cero como punto armónico, entre los números positivos y negativos. Partiendo de la concepción antigua que esta escuela filosófico-matemática, aporta a continuación.

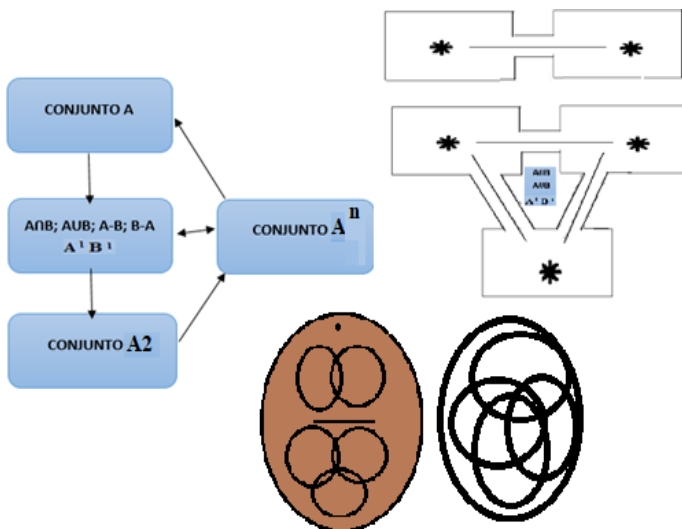
Dicen también los pitagóricos que existe el vacío, y que es así introducido en el cielo por una respiración del pneuma infinito, y que así el vacío permite distinguir las naturalezas de los cuerpos, por ser el vacío una separación y distinción de las cosas colocadas unas después de las otras, y afirman que esto sucede antes que nada en los números ya que el vacío diferencia la naturaleza de ellos. [2]

El cero constituye la distinción entre la diada que se forma en los números enteros en la recta numérica y constituye el punto armónico tanto de los enteros negativos como de los enteros positivos.



Este aspecto se expondrá, a continuación, en las siguientes figuras.

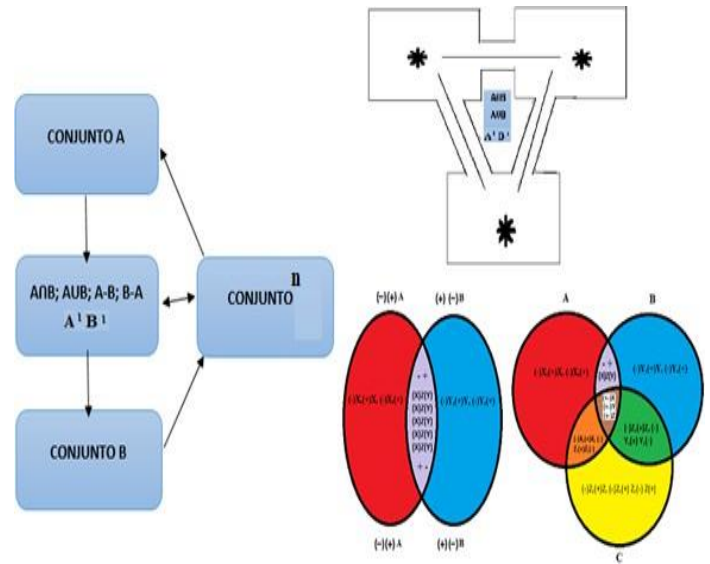
**Figura 1.** Metaheurística de conjuntos para la optimización de problemas relaciones entre variables y sus elementos a nivel intradisciplinar.



**Fuente:** elaboración propia.

El enfoque interdisciplinar con relación a la comunicación de los elementos de las variables se presenta como:

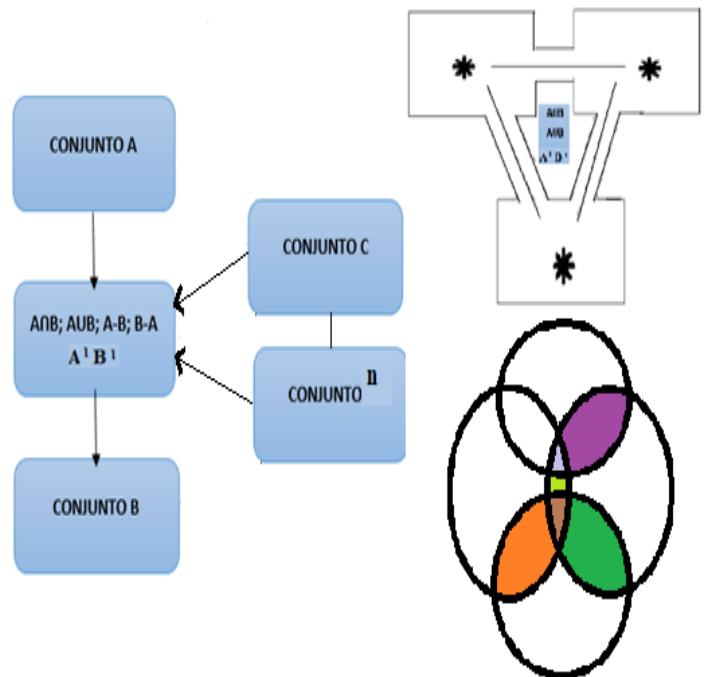
**Figura 2.** Metaheurística de conjuntos para la optimización de problemas relaciones entre variables y sus elementos, a nivel interdisciplinar.



**Fuente:** elaboración propia.

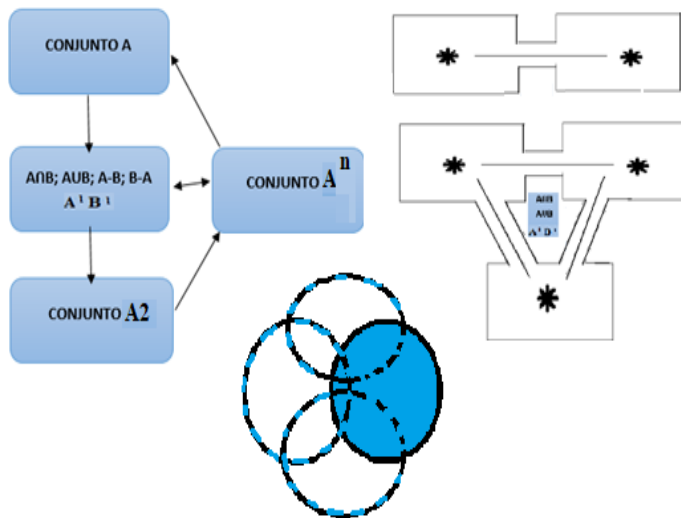
El enfoque multidisciplinar [8] con relación a la comunicación de los elementos de las variables se presenta como:

**Figura 3.** Metaheurística de conjuntos para la optimización de problemas relaciones entre variables y sus elementos, a nivel multidisciplinar.



**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 4.** Metaheurística de conjuntos para la optimización de problemas relaciones entre variables y sus elementos, a nivel transdisciplinar.



Fuente: elaboración propia.

Las fórmulas siguientes permiten una aplicación particular al contexto estadístico en relación con la posibilidad de unión de las variables y los elementos de una manera objetivo y matemática.

**3. Fórmulas:**

**Fórmula 1. Elementos comunes.**

**Conjunto A**= {(-) X, (+) X, (-) X, (+) X, (-) X (+),}

**Conjunto B**= {(-) Y, (+) Y, (-) Y, (+) Y, (-) Y (+),}

**Conjunto C**= {(-) Z, (+) Z, (-) Z, (+) Z, (-) Z (+),}

**AUB**= X,X,X, X, X, Y, Y,Y, Y, Y, Y.

**NC\_ números comunes**= (X) ξ (Y)

Los números comunes expresan una relación como mínimo tríadica, entre los 2 conjuntos O variables y su respectiva intersección, matemáticamente expresable así:

(X) ξ (Y)=

Es decir que se denotaría:

**RcVn**= (X) ξ (Y) = /Nv/NelemV

= (+2)1(-9) /Nv=

= (-7) \*1=-7

**Par**= + es infinito  
**masculino**  
**Impar**= - es  
**finito femenino**

= -7/4=-1,75 es la intersección entre las 2 variables y sus elementos, es el nivel de armonía entre los 2 lados de un fenómeno estudiado, si se quiere es la parte media entre el reverso y el anverso de una moneda, el puente que comunica a un elemento de la variable 1 con el primer elemento de la variable 2. Expresa lo que hay en común entre dos variables o conjuntos y como ese elemento, o esos elementos, deben ser trabajados para lograr rápidamente acuerdos o cambios en el contexto. Lo común permite un diálogo fluido y la empatía entre los objetos o los sujetos del contexto o conjunto.

**Fórmula 2. Relaciones entre conjuntos.**

**AUB**= unión. **AUBUC**= unión.

**A ∩ B**= intersección. **A ∩ B ∩ C**= intersección.

**A - B**= A menos B.

**B - A**= B menos A.

**A1**= complemento de A.

**B1**= complemento de B.

**C1**= complemento de C.

**4. Pruebas y resultados**

Aplicación de la fórmula matemática a 2 elementos de la variable 1, violencia, y la variable 2, conflicto.

**Tabla 2: Variable 1. Violencia.**

Violencia	Conceptos	Respuestas	N. binarios	color
Positivos	Vulneración de los derechos	20	10100	■
Negativos	Forma errónea de solucionar diferencias	10	01010	■
	Problema en colegio, familia y comunidad.	10	01010	■
	Acto de agresión física y verbal	30	11110	■
	Enfrentamiento de dos o más seres	35	100011	■
		<b>105</b>	<b>1101001</b>	■

Fuente: elaboración propia.

Resultado de los elementos de la variable, dividido, por el numero de los elementos de la variable, es la tendencia armónica de esta.

**RelemV1/ Nelemv1= TArm.**

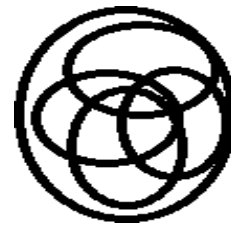
105/5= 21/5= **4,2 resultado se compra con la escla 1.**

**TABLA 3**  
**VARIABLE 2. CONFLICTO.**

Conflicto	Categorías	Respuestas	N. binarios	color
	Problema con otras personas y consigo mismo	25	11001	
Negativos	Conjunto de indiferencias en un grupo	25	11001	■
	Se crea a través del chime, especulaciones e ira hacia una persona	30	11110	■
	Se sienten vulnerables	20	10100	■
	No sabe no responde	5	00101	■

105 110100  
1

Fuente: elaboracion propia.



V. RESOLUCIÓN DE CASOS

**Caso 1:** Enfoque del análisis síntesis al interior de la variable.

**La Fórmula 1:** para identificación del nivel de armonía entre el elemento de V1 con respecto a 0.

$$RA_{ElemVn} = (X) \xi = /Nv/NelemV$$

**Elem1v1**= Vulneración de los derechos.

**Aplicación de la Fórmula para un elemento.**

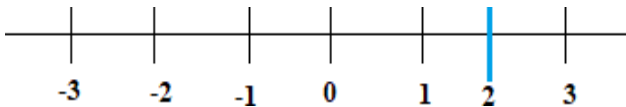
$$RcVn = (20) * 1 = /Nv/NelemV$$

$$= (+20)1/10 =$$

$$= 20/10$$

$$= 2$$

$$RA_{ElemVn} = 2.$$



En este caso específico la relación de armonía entre los elementos se interpreta comparando el resultado.

**1. Interpretación:** Se ubica en la recta la cifra, resultante de la fórmula, entre mas se acerque a 0 el nivel de armonía es mas alto entre los elementos de la variable comparados entre las variables, sin importar si el numero es negativo o positivo. Luego se busca en la tabla 4 (Números enteros «Z», en relación a los números pitagóricos) y esto muestra el resultado del nivel de armonía.

En este caso el resultado es 2, siendo la relación armónica necesaria para mejorar este elemento, es decir, al elemento 1 denominado Vulneración de los derechos, es necesario vincular 2 elementos más, para que, entre sí, logren un nivel de armonía tendiente a 0, por lo tanto, el equilibrio, la proporción y la correspondencia adecuada entre las diferentes elementos que constituyen la variable se logra de esta manera.

**4. Interpretación:** En este caso la relación compleja es de carácter Intradisciplinar ya que esta se encuentra al interior de la variable, {dentro de}.

**Figura 1.** Representación figurativa de la primera relación compleja.

Fuente: elaboracion propia.

**2. Interpretación:**

La segunda fórmula al aplicarse sería:

$$TarmV / RA_{ElemVn} = 2$$

4,2/2= 2.1 relación armónica interna comparada, en la+ variable 1.

Esto quiere decir que la variable internamente encuentra armonía, es decir llega a tender a 0 solo si el Conjunto de dos elementos de la variable son vinculados entre sí.

**Caso 2:** identificación del nivel de armonía entre los elementos 1 de la Variable 1 y 2.

**La Fórmula 1 aplicación 2:**

$$RcVn = (Elem1v1) \xi (Elem1v2) = /Nv =$$

**Elem1v1**= Vulneración de los derechos.

**Elem1v2**= Problema con otras personas y consigo mismo.

**Aplicación de la fórmula**

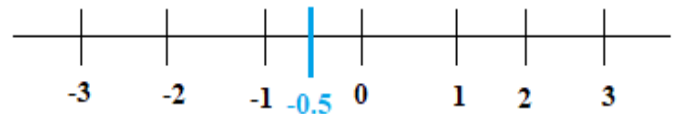
$$RcVn = (20)1(25) = /Nv/NelemV$$

$$= (+20)1(-25) /10$$

$$= -5/10$$

$$= -0,5.$$

**1. Interpretación:** Se ubica en la recta la cifra, -0,5 en la recta.



En este caso específico la relación de armonía entre:

**Elem1v1**=Vulneración de los derechos.

**Elem1v2**=Problema con otras personas y consigo mismo.

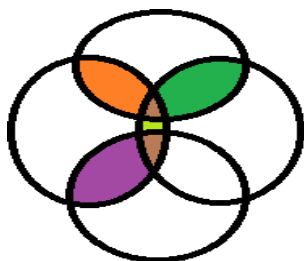
Siendo de -0.5 sería de naturaleza negativa, pero se acerca positivamente al 0 que es la medida armónica en la recta numérica, esto quiere decir, que la relación armónica entre **Elem1v1=Elem1v2** es muy cercana, permitiendo que se intervengan ambos elementos en un mismo momento, logrando así llegar a 0, que representa el nivel armónico idóneo.

La relación compleja se expresa en el vacío, sugiere:

**2. Interpretación:** deteminacion del nivel de armonia o desarmonía el resultado se acerca a 0 hay tendencia a la armonía.

**3. Interpretación:** En este caso la relación compleja es de carácter interdisciplinar, ya que esta se encuentra en la comparación de 2 elementos de la variable.

**Figura 2.** Representación figurativa de la segunda relación compleja.



**Fuente:** elaboración propia.

VI. ESCALAS DE IDENTIFICACIÓN DE LOS DIVERSOS NIVELES DE ARMONÍA Y DESARMONÍA ENTRE LOS ELEMENTOS Y LAS VARIABLES

**Tabla 4.** Escala 0. Deteminacion del nivel de armonia o desarmonía


0	Premisas
(+ -)0	<b>Premisa 1:</b> si el resultado se elaja de 0 hay tendencia a la desarmonía.
(-0+)	<b>Premisa 2:</b> si el resultado se acerca a 0 hay tendencia a la armonía.

**Fuente:** elaboracion propia.



Desde la perspectiva de los pitagóricos los numeros tenian representaciones geometricas y una peculiaridad relacionada con las características par e impar de los mismos.

Parece que ellos consideran elementos del número el par y el impar, y de ellos, el primero ilimitado y el segundo limitado. El Uno participa de ambos, ya que es par e impar al mismo tiempo, y el número proviene de la unidad. (Coronado, cita a Porfirio, 2002, p. 15)

**Tabla 5.** Escala 1: Números enteros «Z», en relación a los números pitagóricos.

Z	tipo	Relación	Relación entre los elementos de las variables
0		Vacío, infinito. <sup>2</sup>	Limite
1	Monada	Unidad, unión.	Unión de los elementos (+)
2	Diada =	Pareja de dos seres o cosas estrecha y especialmente vinculados entre sí. <sup>3</sup>	Conjunto de dos variables o elementos de la(s) variables vinculados entre sí
3	Triada 	Conjunto de tres cosas o seres estrecha o especialmente vinculados entre sí.	Conjunto de tres variables o elementos de la(s) variables vinculados entre sí.






<sup>2</sup> (...) por ser el vacío una separación y distinción de las cosas colocadas unas después de las otras. [2].

4	Tétrada 	Conjunto de cuatro seres o cosas estrecha o especialmente vinculados entre sí.	Conjunto de cuatro variables o elementos de la(s) variables vinculados entre sí.
5	Péntada 	Conjunto de cinco seres o cosas estrecha o especialmente vinculados entre sí.	Conjunto de cinco variables o elementos de la(s) variables vinculados entre sí.

**Fuente:** elaboración propia.

A continuación, se presenta la estrategia relacional para la unificación de las variables a partir de los elementos de la variable cuantitativa.

**Tabla 6.** Números positivos.




Z	Tipo	Relación	Relación entre los elementos de las variables
6	Hexada 	Conjunto de seis seres o cosas estrecha o especialmente vinculados entre sí.	Conjunto de tres variables o elementos de la(s) variables vinculados entre sí.
7	Héptada 	Conjunto de siete seres o cosas estrecha o especialmente vinculados entre sí.	Conjunto de cuatro variables o elementos de la(s) variables vinculados entre sí.
8	Óctada 	Conjunto de ocho seres o cosas estrecha o especialmente vinculados entre sí.	Conjunto de cinco variables o elementos de la(s) variables vinculados entre sí.
9	Enéada 	Conjunto de nueve seres o cosas estrecha o especialmente vinculados entre sí.	Conjunto de cinco variables o elementos de la(s) variables vinculados entre sí.
10...	Década 	Conjunto de diez seres o cosas estrecha o especialmente vinculados entre sí.	Conjunto de cinco variables o elementos de la(s) variables vinculados entre sí.

**Fuente:** elaboracion propia.

A continuación se presenta la propuesta de análisis en relación a los elementos insertos en las variables relacionados con el vacío infinito.

<sup>3</sup> Diada, triada, tétrada <https://dle.rae.es/?id=ZgOBppl> los demás términos se extrapolan a estos significados.






**Tabla 7.** Números negativos.

Z	tipo	Relación	Relación entre los elementos de las variables Limite
0		Vacío, infinito. <sup>4</sup>	
-1	Monada	Desunidad, desunión.	Unión de los elementos (-)
-2	Diada =	Pareja de dos seres o cosas y especialmente no vinculados entre sí. <sup>5</sup>	Conjunto de dos variables o elementos de la(s) variables no vinculados entre sí.
-3	Triada 	Conjunto de tres cosas o seres no estrecha o no vinculados entre sí.	Conjunto de tres variables o elementos de la(s) variables no vinculados entre sí.
-4	Tétrada 	Conjunto de cuatro seres o cosas no estrecha o especialmente no vinculados entre sí.	Conjunto de cuatro variables o elementos de la(s) variables no vinculados entre sí.
-5	Péntada 	Conjunto de cinco seres o cosas no estrecha o especialmente no vinculados entre sí.	Conjunto de cinco variables o elementos de la(s) variables no vinculados entre sí.

**Fuente:** elaboracion propia.

A la relación geométrica anterior se le adhiere una amplificación de la misma en relación a variables tanto relacionadas como no relacionadas en el contexto estadístico.

**Tabla 8.** Números negativos.

Z	Tipo	Relación	Relación entre los elementos de las variables
-6	Hexada 	Conjunto de seis seres o cosas no estrecha o especialmente no vinculados entre sí.	Conjunto de seis variables o elementos de la(s) variables no vinculados entre sí.
-7	Héptada 	Conjunto de siete seres o cosas no estrecha o especialmente no vinculados entre sí.	Conjunto de siete variables o elementos de la(s) variables no vinculados entre sí.
-8	Óctada 	Conjunto de ocho seres o cosas no estrecha o especialmente no vinculados entre sí.	Conjunto de ocho variables o elementos de la(s) variables no vinculados entre sí.
-9	Enéada 	Conjunto de nueve seres o cosas no estrecha o especialmente no vinculados entre sí.	Conjunto de nueve variables o elementos de la(s) variables no vinculados entre sí.
-10...	Década 	Conjunto de diez seres o cosas no estrecha o especialmente no vinculados entre sí.	Conjunto de diez variables o elementos de la(s) variables no vinculados entre sí.

**Fuente:** elaboracion propia.

Las formas de conjunción permiten la agrupación de los elementos de la variable o de las variables con sus respectivos elementos generando análisis interdisciplinarios [7] y multidisciplinarios que luego van a hacer aplicados a contextos de realidad como puede ser en las ingenierías o en las contadurías.

<sup>4</sup> (...) por ser el vacío una separación y distinción de las cosas colocadas unas después de las otras. [2]

<sup>5</sup> Díada, triada, tétrada <https://dle.rae.es/?id=ZgOBppl> los demás términos se extrapolan a estos significados




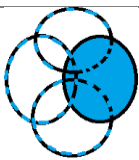
**Tabla 9: Escala 3.** Formas de conjunción.

Nivel	Operación	Tipo de relación compleja
<b>AUB</b>	Agrupación de 2 elementos de la variable o de 2 variables.	Interdisciplinar
<b>AUB UC</b>	Agrupación de 3 elementos de la variable o de 3 la variable <sup>3</sup> .	Interdisciplinar o multidisciplinar
<b>A∩B</b>	Intersección de 2 elementos de la variable o de 2 variables.	Interdisciplinar o multidisciplinar
<b>A∩B ∩C</b>	Intersección de 3 elementos de la variable o de 3 variables.	Interdisciplinar o multidisciplinar
<b>A∩B ∩C D∩E ∩F</b>	Intersección de 6 elementos de la variable o de 6 variables.	Interdisciplinar o multidisciplinar
<b>A-B</b>	A menos B.	Interdisciplinar-multidisciplinar.
<b>B -A</b>	B menos A.	Interdisciplinar-multidisciplinar
<b>C-A</b>	C menos A.	Interdisciplinar-multidisciplinar
<b>A- C</b>	A menos C.	Interdisciplinar-multidisciplinar
<b>A1</b>	Complemento de A.	<b>Intradisciplinar</b>
<b>B1</b>	Complemento de B.	<b>Intradisciplinar</b>
<b>C1</b>	Complemento de C.	<b>Intradisciplinar</b>

**Fuente:** elaboración propia.

A continuación, se presenta la escala de definiciones complejas para entender mejor el proceso.

**Tabla 10. Escala de definiciones<sup>1</sup> complejas y tipos de conjuntos.**

Prefijo	Relación compleja	Relación numérica	Tipo de conjunción
<b>Intra: dentro de.</b>	Interdisciplinar. <b>Intradisciplinar.</b>	Monada	
<b>Inter: en medio de o entre.</b>	Interdisciplinar	Diada-Triada y el número de disciplinas o variables que se requieran	
<b>Multi: muchos.</b>	Multidisciplinar	Diada-Triada y el número de disciplinas o variables que se requieran	
<b>Trans: 'más allá de', 'al otro lado de', 'a través de'</b>	Transdisciplinar	Diada-Triada y el número de disciplinas o variables que se requieran	

**Fuente:** elaboración propia.

La puesta en contexto de todos los tipos de relaciones complejas o que atraviesa, que cambia o que va más allá de las posibles relaciones de carácter intradisciplinar, interdisciplinar, o multidisciplinar, será una relación transdisciplinar, siendo su equivalente 0.1;0.2;0.3;0.4;0.5;0.6;0.7;0.8;0.9.

### Conclusiones

Es necesario realizar más estudios alrededor de las metaheurísticas complejas y su implicancia en los procesos de desarrollo del conocimiento científico, ya que se requiere la construcción de basamentos teóricos firmes que permitan desarrollar metodologías que cubran el vasto campo de la investigación científica, desde esta perspectiva, asumir que la ciencia normal, debe ser mejorada por el conocimiento complejo desde una perspectiva lógico-matemática es dar pasos en dirección a esa meta.

La metaheurística de conjuntos para la optimización de problemas relaciones [MC. P O PRO R], permite desarrollar estrategias entorno a como analizar variables de tipo cuantitativas y cualitativas teniendo en cuenta las relaciones complejas que se tejen entre estas, siendo de naturaleza intradisciplinar, interdisciplinar, multidisciplinar y transdisciplinar [9].

El cero como punto de armonía en la recta numérica es definido por la [MC. P O PRO R], como, equilibrio, proporción y correspondencia adecuada entre los diferentes elementos de las variables, o entre las variables de un conjunto definido, este tipo de organización permite relaciones en todos los sentidos, de manera ordenada y dentro de los parámetros del conocimiento complejo, especialmente los que corresponden a los criterios de intradisciplinabilidad, interdisciplinabilidad, multidisciplinabilidad y transdisciplinabilidad.

## Referencias

- [1] Coronado, G. (2002). Los pitagóricos: matemática e interpretación de la naturaleza. In Revista De Filosofía De La Universidad De Costa Rica: Vol. XL (Issue 100, pp. 13–21). <http://www.circulodecartago.org/wp-content/uploads/2011/02/Los-pitagoricos-matematica-e-interpretacion-de-la-naturaleza.pdf>
- [2] Coronado, (2002). Los pitagóricos: matemática e interpretación de la naturaleza. p. 15. <https://www.circulodecartago.org/wp-content/uploads/2011/02/Los-pitagoricos-matematica-e-interpretacion-de-la-naturaleza.pdf>
- [3] Llano, A, L, Gutiérrez, E, M, et al. (2016) La interdisciplinabilidad: una necesidad contemporánea para favorecer el proceso de enseñanza aprendizaje. Medisur vol.14 no.3, (p. 352). [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1727-897X2016000300015](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-897X2016000300015)
- [4] Mosquera, Rodas, J. J. M. (2006). El concepto de intradisciplina como elemento constitutivo de la interdisciplina en las ciencias, la filosofía y el arte. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4821071>
- [5] Oxford Languages. The Home of Language Data. (2022, August 26). <https://es.oxforddictionaries.com/definicion/armonia>
- [6] Oxford Languages. The Home of Language Data. (2022b, August 26). <https://es.oxforddictionaries.com/definicion/intra>
- [7] Oxford Languages. The Home of Language Data. (2022c, August 26). <https://es.oxforddictionaries.com/definicion/inter>
- [8] Oxford Languages. The Home of Language Data. (2022f, August 26). <https://es.oxforddictionaries.com/definicion/multi>
- [9] Oxford Languages. The Home of Language Data. (2022g, August 26). <https://es.oxforddictionaries.com/definicion/tras>



Jhon Jairo Mosquera Rodas. Born 16 November 1975 in Pereira, Risaralda (Colombia). B.A. in Spanish and Audiovisual Communication, Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda, Colombia, 2003. Master's Degree in Education, Catholic University of Manizales. Manizales, Caldas, Colombia, 2009. PhD in Educational Sciences,

Universidad Cuauhtémoc, Aguascalientes, Mexico. Field of research: epistemology of research in basic, social and human sciences. He has worked as a teacher at the middle and higher levels in the Colombian education system, also as an Advisory Professor in the Master's Degree in Education at the Catholic University of Manizales. Evaluator at undergraduate and master's level at the Universidad Cooperativa de Colombia. He is currently a research professor at the Universidad Cooperativa de Colombia; in basic, social and human sciences, advisor of national and regional projects. Mag. Mosquera is a reviewer for the International Social Science Journal of the University of Illinois. Peer reviewer of the journal Ensaio, Brazil, Daimon Journal and the International Journal of Interdisciplinary Social Sciences. Outstanding student of the Universidad Tecnológica de Pereira. Member of the international research network Common Ground. Member of the Association of Philosophy and History of Science of the Southern Cone. *The PSA International Syllabus Prize to your Epistemology of Social Sciences, Cambridge University UK - Noviembre de 2022* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3455-8470>

# A proposal for a fuzzy climate classification index for Colombia

Una propuesta de un índice difuso de clasificación climática para Colombia

J. G. Popayán Hernández  ; O. E. Bru-Cordero 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.25894>

Scientific and technological research paper

**Abstract**— This study developed a fuzzy logic-based climate classification index for Colombia, integrating hydroclimatic, air quality, and topographic variables through a three-phase methodology. In Phase 1 (2010-2022), multisource data acquisition processed precipitation (600-8000 mm/year), temperature (14-32°C), humidity (28-95%), PM<sub>2.5</sub> (6-35 µg/m<sup>3</sup>), and NO<sub>2</sub> (10-60 ppb) using IDEAM's DHIME portal and NASA Giovanni products, with quality-controlled interpolation. Phase 2 implemented a Mamdani-type fuzzy inference system in FisPro, creating 127 "If-Then" rules through nonlinear correlation analysis (Spearman >0.65) and expert knowledge, using MIN-MAX operators and adaptive weights (0.3 rural/0.5 urban pollution coefficients). Phase 3 geospatial implementation achieved 92.3% cross-validation accuracy (MAE=1.2, RMSE=1.8), generating vulnerability maps (0-10 scale) through QGIS processing. Results revealed extreme climate variability: precipitation gradients (600 mm/year in Riohacha to 8000 mm in Quibdó), urban heat islands (Neiva 30°C vs. Bogotá 16°C), and pollution hotspots (Barranquilla 30 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>2.5</sub> vs. Leticia 6 µg/m<sup>3</sup>). The fuzzy index outperformed traditional methods (Köppen, Thornthwaite) by capturing nonlinear interactions, showing 15% agricultural yield reductions in high-NO<sub>2</sub> zones and identifying vulnerability thresholds for coffee rust outbreaks (>80% humidity) and urban heat stress (85% RH = 41°C felt temperature). The model's adaptive structure effectively addressed Colombia's climatic heterogeneity while overcoming rigid classification limitations, providing a robust tool for climate risk assessment under anthropogenic change scenarios, though future work should incorporate higher-resolution pollution data to reduce the 15% uncertainty in industrial zones.

**Index Terms**— Climate classification; Fuzzy logic; Hydroclimatic variables; Vulnerability index.

**Resumen**— En este estudio se desarrolló un índice de clasificación climática basado en lógica difusa para Colombia, integrando variables hidroclimáticas, de calidad del aire y topográficas mediante una metodología de tres fases. En la Fase 1 (2010-2022), se adquirieron y procesaron datos multifuente de precipitación (600-8000 mm/año), temperatura (14-32°C), humedad (28-95%), PM<sub>2.5</sub> (6-35 µg/m<sup>3</sup>) y NO<sub>2</sub> (10-60 ppb) utilizando el portal DHIME

This manuscript was submitted on July 21, 2025. Accepted on September 08, 2025. And published on September 29, 2025. Juan Guillermo Popayán-Hernández, Universidad Nacional de Colombia, Sede de La Paz La Paz (código postal 202017), Cesar, Colombia. km 9 Vía Valledupar - La Paz (Cesar, Colombia). E-mail: [jpopavanh@unal.edu.co](mailto:jpopavanh@unal.edu.co).

Osnamir Elías Bru-Cordero, Universidad Nacional de Colombia, Sede de La Paz La Paz (código postal 202017), Cesar, Colombia. km 9 Vía Valledupar - La Paz (Cesar, Colombia). Correo electrónico: [oebruc@unal.edu.co](mailto:oebruc@unal.edu.co);

del IDEAM y productos NASA Giovanni, con interpolación controlada por calidad. La Fase 2 implementó un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani en FisPro, creando 127 reglas "Si-Entonces" mediante análisis de correlación no lineal (Spearman >0.65) y conocimiento experto, utilizando operadores MIN-MAX y ponderaciones adaptativas (coeficientes de 0.3 para zonas rurales y 0.5 urbanas). La Fase 3 de implementación geoespacial alcanzó un 92.3% de precisión en validación cruzada (MAE=1.2, RMSE=1.8), generando mapas de vulnerabilidad (escala 0-10) mediante procesamiento en QGIS. Los resultados revelaron extrema variabilidad climática: gradientes de precipitación (600 mm/año en Riohacha hasta 8000 mm en Quibdó), islas de calor urbanas (Neiva 30°C vs. Bogotá 16°C) y focos de contaminación (Barranquilla 30 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub> vs. Leticia 6 µg/m<sup>3</sup>). El índice difuso superó métodos tradicionales (Köppen, Thornthwaite) al capturar interacciones no lineales, mostrando reducciones del 15% en rendimientos agrícolas en zonas con alto NO<sub>2</sub> e identificando umbrales de vulnerabilidad para brotes de roya en café (>80% humedad) y estrés térmico urbano (85% HR = 41°C de sensación térmica). La estructura adaptativa del modelo abordó efectivamente la heterogeneidad climática colombiana superando limitaciones de clasificaciones rígidas, proporcionando una herramienta robusta para evaluación de riesgos climáticos bajo escenarios de cambio antropogénico, aunque futuros trabajos deberían incorporar datos de contaminación de mayor resolución para reducir el 15% de incertidumbre en zonas industriales.

**Palabras claves**— Clasificación climática; Índice de vulnerabilidad; Lógica difusa; Variables hidroclimáticas.

## I. INTRODUCTION

CLIMATE, from a technical perspective, is the statistical pattern of atmospheric conditions—such as temperature, precipitation, humidity, wind, and pressure—in a region over an extended period, typically 30 years, according to the definition of the World Meteorological Organization (WMO). The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) emphasizes that climate results from complex interactions among components of the Earth's system (atmosphere, hydrosphere, cryosphere, lithosphere, and biosphere), regulated by radiative forcings, such as greenhouse gases (GHGs), whose concentration has increased by 47% in CO<sub>2</sub>-equivalent terms since 1750, reaching 504 ppm in 2023. Data from the IPCC AR6 indicate global warming of 1.1°C above pre-industrial levels (1850–1900), with a rate of 0.2°C per decade, attributed 95% to anthropogenic activities [1].



Historically, the concept of climate evolved from Aristotle's empirical observations in *Meteorologica* (4th century BC) to scientific systematization in the 19th century, with Alexander von Humboldt, who introduced isotherms, and Köppen, who developed climate classification based on thermopluviometric data [2]. In the 20th century, climatology consolidated as a quantitative science with numerical models, such as those of the IPCC, which project a temperature increase of 1.5 to 4.4°C by 2100 under SSP scenarios, highlighting the urgency of mitigation [3]. These advances reflect the transition from a descriptive to an analytical approach, integrating climatic teleconnections (ENSO, NAO) and systemic feedbacks, such as albedo or the carbon cycle.

On the other hand, climate classification indices were developed from the need to systematize interactions among key meteorological variables—temperature, precipitation, evapotranspiration, and, in some cases, solar radiation—to define reproducible spatial and temporal patterns [4]. The Köppen-Geiger system (1900–1936), the most widely used, classifies climates based on monthly and annual thresholds of temperature and precipitation (e.g., Af for tropical humid zones with precipitation  $\geq 60$  mm every month and  $T_{\text{mean}} \geq 18^\circ\text{C}$ ), while Thornthwaite (1948) incorporated water balance through potential evapotranspiration (PET), differentiating arid regions (humidity index  $< 0$ ) from humid ones [5]. Later, Holdridge (1967) introduced the concept of biotemperature and altitudinal tiers, relevant for mountainous regions like the Andes [6]. In Colombia, these systems are applied considering the marked orographic variability: IDEAM uses Köppen to identify that 83% of the territory is tropical (Af in the Amazon and Pacific, Aw in the Orinoquía), with altitudinal modifications (Cfb in Bogotá, 2600 m.a.s.l.,  $T_{\text{mean}} 14^\circ\text{C}$ ). Additionally, indices such as Martonne's aridity index are used to assess drought in La Guajira (index  $< 1$ ), or ENSO to predict pluviometric anomalies, given that phenomena like El Niño reduce rainfall by up to 40% in the Caribbean region [7]. Historically, the earliest classifications date back to Aristotle (4th century BC), but it was Alexander von Humboldt (1800) who established correlations between altitude and vegetation, laying the foundations for thermal tiers. In the 20th century, the European school (Köppen, Troll) and the North American school (Thornthwaite) dominated theoretical climatology, while in Latin America, local adaptations like Papadakis' (1960) incorporated agroclimatic data. In the region, institutions such as Mexico's Servicio Meteorológico Nacional (SMN, available at <https://www.gob.mx/smn>) or Brazil's Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, available at <https://portal.inmet.gov.br/>) have adjusted these systems to mesoclimatic scales, while in Colombia, the Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, available at <https://www.ideam.gov.co/>) integrates satellite reanalysis like the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) to refine zonation in areas of high topographic complexity, such as the Coffee Region, where precipitation varies between 2000–4000 mm/year within less than 50 km [8]. Currently, CMIP6 models allow projecting

changes in these classifications, anticipating, for example, a 15% expansion of Aw climate by 2050 due to global warming [9].

From this conceptual and methodological evolution, it is possible to compare the main climate classification indices used in Colombia, detailing their fundamental variables and how each interprets the country's complex atmospheric realities [10]. Below, Table I summarizes the most representative systems and their distinctive criteria:

TABLE I  
MAIN CLIMATIC INDICES USED IN LATIN AMERICA AND COLOMBIA

Climate Index	Meteorological Variables Used	Interpretation
Köppen-Geiger	Monthly/annual mean temperature, monthly/annual precipitation	Classifies climates into groups (A: tropical, B: arid, C: temperate, etc.) based on thermopluviometric thresholds. E.g.: Af = tropical humid (no dry season).
Thornthwaite	Temperature, precipitation, potential evapotranspiration (PET)	Defines climate types based on water balance (humidity index). E.g.: arid (PET > precipitation).
Holdridge	Biotemperature, precipitation, evapotranspiration	Relates climate to plant life zones using altitudinal tiers and thermal gradients.
Aridity Index (Martonne)	Annual precipitation, annual mean temperature	Measures drought: $< 5$ = desert, 5-10 = semi-arid, 10-20 = sub-humid, $> 20$ = humid.
ENSO (El Niño-Southern Oscillation)	Sea Surface Temperature (SST) anomalies, atmospheric pressure (SOI)	Classifies phases (El Niño, La Niña, Neutral) that alter global precipitation and temperature patterns.
SPI (Standardized Precipitation Index)	Accumulated precipitation at different time scales	Evaluates droughts (negative values) or water excess (positive) in specific periods (e.g.: SPI-6 = agricultural drought).
Vegetation Index (NDVI)	Satellite reflectance data (spectral bands)	Shows vegetation health and water stress (low values = drought or degradation).

Despite their utility, climate indices present inherent limitations that hinder a comprehensive understanding of the climate system [11]. The Köppen-Geiger system, although widely adopted, oversimplifies climatic dynamics by relying on monthly averages, ignoring intra-diurnal variability and extreme events [12]. Thornthwaite's approach, despite incorporating evapotranspiration, depends on theoretical estimates (PET) that fail to capture the actual influence of vegetation cover or microclimatic changes [13]. Holdridge's system, while integrating altitudinal tiers, assumes static correlations between climate and biota, disregarding adaptive processes or biogeochemical feedbacks. Aridity (Martonne) and drought (SPI) indices are sensitive to arbitrary temporal scales and omit variables like soil water storage capacity. Meanwhile, ENSO [14], though useful for short-term predictions, cannot alone explain regional climate variability in areas influenced by other oscillatory modes [15]. Finally,

NDVI, being reliant on satellite data, may underestimate water stress under cloudy conditions or in highly reflective soils. These limitations demonstrate that, although indices are valuable tools, their isolated application cannot reduce the complexity of a climate system governed by nonlinear interactions, multiple scales, and emerging anthropogenic forcings [16].

The primary objective of this research was to develop a novel climate classification index based on Fuzzy Logic. This index integrates hydroclimatological variables (precipitation, air temperature, relative humidity), anthropogenic pollution sources (PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>x</sub> emissions from fixed and mobile sources), and orographic factors (altitude, slope). This approach overcomes the limitations of traditional systems by capturing the nonlinearity and inherent uncertainty of these parameters [17]. The study employed open-source software packages GeoFis (for geospatial processing of satellite data and digital elevation models) and FisPro (for designing rule-based fuzzy systems using 'If-Then' rules), which were used to construct membership functions that weighted interactions between variables, avoiding rigid thresholds like those in Köppen or Thornthwaite. The index was calibrated with historical data from Colombia—where topographic heterogeneity and urban pollution distort conventional climate patterns—and validated through comparison with in situ observations and climatic reanalysis (ERA5-Land) [2]. The methodology enabled the classification of zones based on degrees of anthropogenic influence and climatic adaptability, providing a dynamic tool for territorial planning under climate change scenarios.

## I. MATERIALS AND METHODS

### A. Study area

Colombia, due to its geographical position in the equatorial zone (see Fig. 1), exhibits a predominantly tropical climate with marked climatic diversity influenced by factors such as altitude, the Andes mountain range, ocean currents, and trade winds [18]. This variability generates climates ranging from warm and humid in low-lying areas (0-1,000 m above sea level, with temperatures above 24°C and rainfall exceeding 4,000 mm annually in the Pacific region), to cold climates in high Andean zones (above 3,000 m above sea level, with temperatures below 12°C) [19].

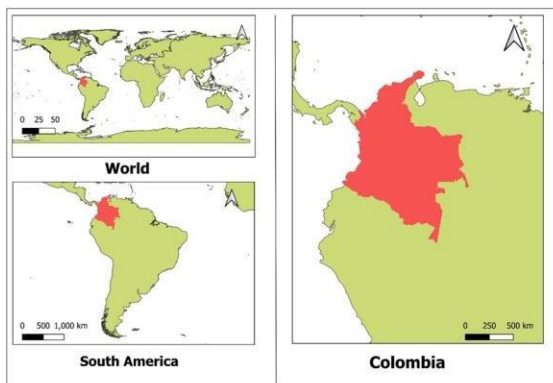


Fig. 1 Study area

The presence of biomes such as tropical rainforests (Amazon and Chocó biogeographic regions), savannas (Orinoquía), dry forests (Caribbean and inter-Andean valleys), and páramos (unique high-Andean ecosystems) reflects this heterogeneity. As a result, Colombia harbors approximately 10% of the world's biodiversity, with over 58,000 registered species, ranking as the second most megadiverse country [7]. Phenomena such as ENSO modulate rainfall and drought patterns, while the convergence of the Intertropical Convergence Zone and the complex topography generate local microclimates, establishing the country as an ecological hotspot with high endemism rates.

### B. Phase 1: Data Acquisition and Processing (2010-2022 Period)

In Phase 1 of multisource data acquisition and processing (2010–2022 period), a protocol was implemented to integrate hydroclimatological, air quality, and orographic data. Daily precipitation records (spatial resolution: 0.05°), mean temperature (1 km), and relative humidity (point-based station data) were obtained from IDEAM's DHIME portal [20]. Criteria pollutant concentrations (PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>2</sub>, with annual resolution at municipal scale) were sourced from Colombia's National Inventory of Atmospheric Emissions and Absorptions (1990–2021), which also includes black carbon data (2010–2021). These datasets were complemented with NASA Giovanni satellite products (available at <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>), featuring daily to monthly resolution depending on the product: AOD at 1°, NO<sub>2</sub> at 0.25°, and CO at 0.5°, processed using Panoply (available at <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>) for format homogenization. Topographic attributes (altitude, slope) were derived from the ALOS PALSAR model (12.5 m spatial resolution) [21]. All datasets underwent quality control, normalization, and interpolation to ensure spatiotemporal consistency, establishing a robust reference framework for climate-environmental analysis in Colombia.

### C. Phase 2: Fuzzy Modeling

A Mamdani-type fuzzy inference system was developed using FisPro software. The model incorporated three fuzzy sets per variable (low, medium, high) with specific membership functions for each parameter type [22]. Inference rules were developed by combining expert knowledge with patterns identified in historical datasets.

The complementary tools GeoFIS (available at <https://www.geofis.org>) and FisPro (available at <https://www.fispro.org>) were specifically designed for spatial data processing and fuzzy modeling respectively, with key applications in environmental sciences, particularly climate studies [23]. GeoFIS is an open-source platform integrating advanced algorithms for geospatial data analysis, enabling interpolation, zoning, and aggregation of climatic information (including temperature, precipitation, and pollutant data) through techniques such as kriging and Voronoi-based

segmentation [24]. Its architecture combines specialized libraries including GeoTools (for spatial data management) and CGAL (for geometric algorithms), along with FisPro for incorporating expert knowledge through fuzzy logic implementation.

FisPro constitutes a specialized fuzzy modeling system that enables the construction of rule-based inference systems using "If-Then" rules. The system employs triangular or trapezoidal membership functions for climatic variables (e.g., soil moisture, CO<sub>2</sub> emissions) along with aggregation operators such as WAM (Weighted Arithmetic Mean) and OWA (Ordered Weighted Averaging) [25].

The synergistic integration of both tools facilitates the analysis of complex climate-related challenges, including risk zone classification for extreme weather events and anthropogenic impact assessment [26]. Specifically, GeoFIS processes satellite data (e.g., NDVI, AOD) and digital elevation models to generate spatial information layers and FisPro integrates these layers through fuzzy systems capable of capturing nonlinearities and uncertainties, thereby overcoming the limitations of rigid thresholds characteristic of Köppen classification systems [23].

This integrated approach proves particularly valuable in tropical and mountainous climate systems, where significant spatial and temporal variability necessitates adaptive modeling frameworks [27]. Key advantages include capability to incorporate localized expert knowledge, flexibility in processing heterogeneous datasets and scalability for projects requiring integration of local and global scale analyses [27].

#### D. Phase 3: Geospatial Implementation and Index Validation

This phase implemented the fuzzy index model through a stratified data partition, utilizing 75% of the data for system training and 25% for validation. The process was executed in FisPro, generating a set of 9 fuzzy rule files that integrate the previously processed climatic, pollution, and orographic variables. Each rule was evaluated using performance metrics including Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), model coverage, and percentage absolute error, ensuring robust inferences [23]. The model output was defined as crisp (precise numerical value) to facilitate interpretation in practical applications.

Following model validation, the index value was calculated for each cell in the national grid, incorporating the obtained fuzzy weights. These results were exported to QGIS for final cartographic production, where quantile classification techniques and graduated symbology were applied to spatially represent areas according to their climatic vulnerability. Integration with auxiliary layers, such as administrative boundaries, enabled contextualized analysis, while smoothing algorithms enhanced the visualization of regional patterns. This process culminated in the development of a climate classification map for Colombia based on a fuzzy index.

To transform the continuous climate index into a discrete microclimate classification, an unsupervised K-means clustering algorithm was implemented on a matrix composed of normalized hydroclimatic and air quality variables.

The optimal number of clusters (k) was determined by maximizing the Silhouette Score, a metric that quantifies cluster cohesion and separation. The score was calculated for a range of k = 2 to 20. The value k=14 was selected because it corresponded to the maximum average Silhouette coefficient ( $\geq 0.65$ ), ensuring a robust cluster structure where each microclimate is well-differentiated from the others.

This procedure allowed for the identification of 14 microclimates with high internal homogeneity and clear separation between them, quantitatively validating the presented climate segmentation.

## II. RESULTS

Below are the results for each of the proposed phases.

### A. Phase 1 results.

The dataset presented in this table (table II) was systematically compiled through a rigorous multi-source approach, integrating ground measurements from IDEAM's DHIME database (2010–2022), satellite-derived products (NASA Giovanni), and national emissions inventories [18]. Precipitation, temperature, and humidity data were extracted from quality-controlled meteorological stations, with spatial interpolation (kriging, 1 km resolution) applied to fill gaps in high-altitude and remote regions. PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations were sourced from Colombia's National Emissions Inventory (2010–2021), validated against urban monitoring networks in Bogotá, Medellín, and Cali. Cities were selected based on: (1) representation of all major climatic regions (Caribbean, Andean, Pacific, Amazon, Orinoquía), (2) data completeness (>95% temporal coverage), and (3) demographic relevance (all departmental capitals with >200,000 inhabitants). Extreme values (e.g., Quibdó's 8000 mm precipitation) were verified through cross-referencing with CHIRPS satellite rainfall estimates and ERA5-Land reanalysis, ensuring robustness for subsequent fuzzy modeling phases [11].

TABLE II CLIMATE AND AIR QUALITY VARIABLES FOR THE 18 MAIN COLOMBIAN CITIES

City	Annual precipitation (mm)	Average annual temperature (°C)	Relative humidity (%)	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (ppb)
Apartadó	3500	26	95	18	30
Arauca	2500	28	80	20	30
Armenia	2400	20	85	15	25
Barranquilla	800	30	85	30	60
Bogotá D.C.	1200	16	80	25	50
Bucaramanga	1600	24	80	18	35
Cali	1500	26	80	28	45
Cartagena	1200	30	90	25	45
Cúcuta	1200	30	75	35	50
Florencia	4000	26	95	14	18
Leticia	3500	27	95	6	10

Manizales	2500	19	90	12	25
Medellín	2200	24	75	20	40
Montería	1600	29	85	22	35
Neiva	1000	30	70	35	55
Pasto	1200	15	85	10	15
Pereira	2800	21	85	15	30
Villavicenci	3500	28	28	22	35

**Precipitation:** The data reveal extreme variability in rainfall patterns, with values ranging from 600 mm/year in Riohacha to 8000 mm/year in Quibdó. This disparity reflects the influence of contrasting climatic systems: the low precipitation in La Guajira (Riohacha, Maicao) results from atmospheric subsidence and the influence of dry trade winds, while the maximum rainfall in the Pacific (Quibdó) and Amazon regions (Florencia, Mocoa) is associated with the Intertropical Convergence Zone and orographic effects.

For the agricultural sector, this variability determines planting schedules: areas with <1000 mm/year (dry Caribbean) require irrigation systems, while regions with >3000 mm/year (Pacific, Amazon foothills) face challenges related to water excess and soil leaching [19]. In urban contexts, rainfall extremes create differentiated risks: flooding in Barrancabermeja (2500 mm) and water scarcity in Santa Marta (1000 mm). The average annual precipitation map for Colombia is shown in Fig. 2.

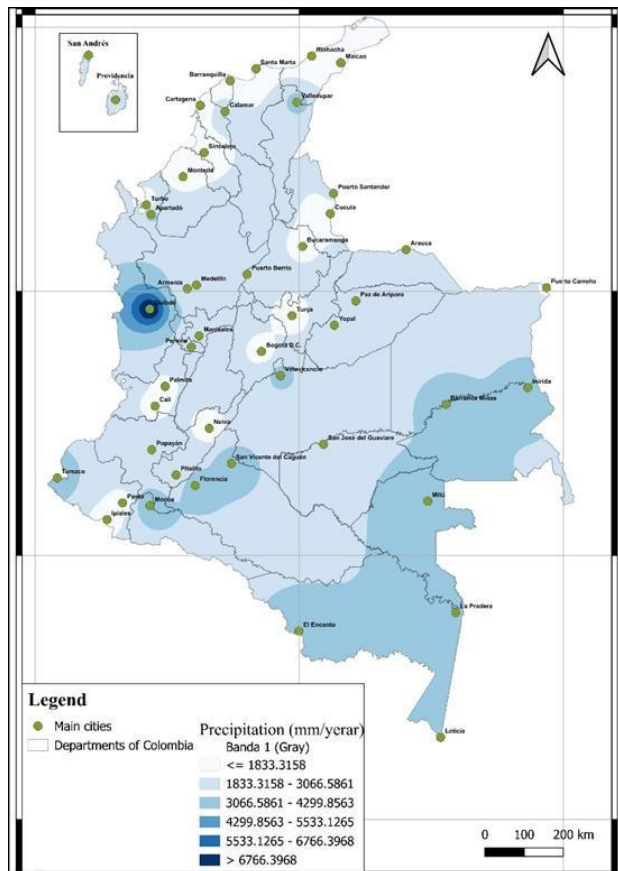


Fig. 2 Average annual precipitation in Colombia between 2010 and 2022

**Temperature:** The altitudinal thermal gradient is evident, ranging from 32°C in Maicao (83 m above sea level) to 14°C in Tunja (2780 m above sea level). Cities in the Magdalena Valley (Neiva, 30°C) exhibit urban heat islands that intensify base temperatures, while Andean urban centers (Bogotá, 16°C) show reduced thermal amplitudes due to urbanization effects [28].

For agriculture, these patterns define thermal zones: warm climate crops (oil palm, bananas) are concentrated below 1000 m above sea level, while cold climate crops (potatoes, flowers) require elevations above 2000 m. The observed 1-2°C increase in coastal cities (Cartagena, Barranquilla) in recent decades has increased cooling energy demands and affected labor productivity [28]. The corresponding temperature mapping is shown in Fig. 3.

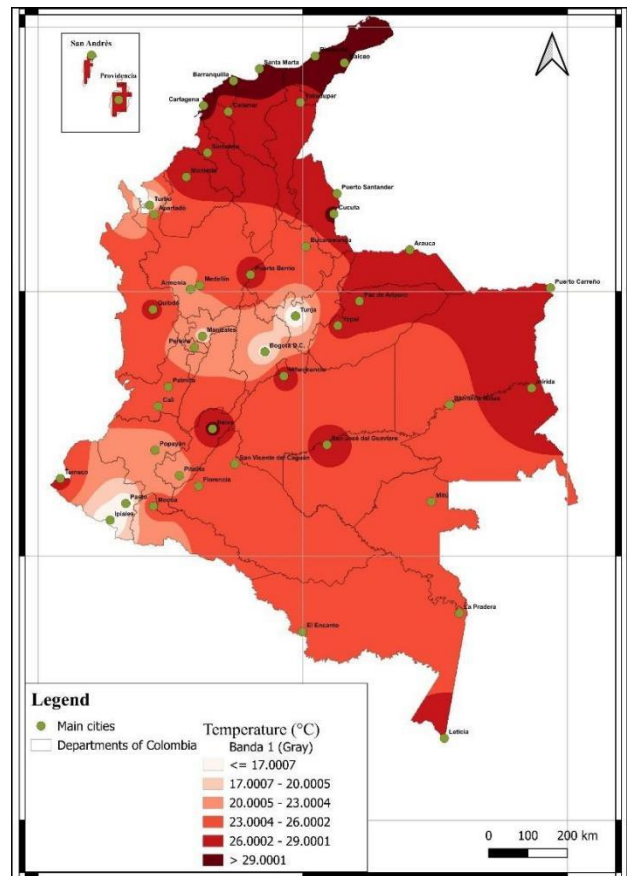


Fig. 3 Average annual temperature in Colombia between 2010 and 2022

**Relative Humidity:** Three distinct patterns were identified: (1) persistently high values (>90%) in the Pacific (Quibdó) and Amazon (Leticia) regions, associated with evapotranspiration from humid forests; (2) intermediate values (70-85%) in Andean cities (Medellín, Pereira), influenced by mountain fog systems; and (3) low values (<50%) in the dry Caribbean region (Santa Marta), as shown in Fig. 4.

In urban environments, high humidity amplifies the sensible heat effect (e.g., Barranquilla, 30°C with 85% RH produces a 41°C heat index) [7]. For agricultural systems, elevated humidity (>80%) in coffee-growing areas (Manizales, Armenia) promotes coffee leaf rust outbreaks, while low values in the Caribbean region increase evapotranspirative demand.

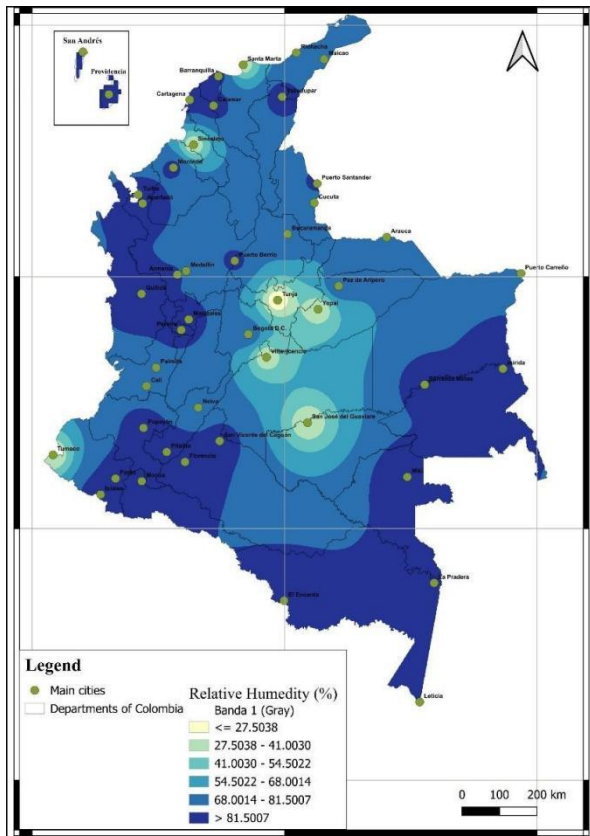


Fig. 4 Average annual relative humidity in Colombia between 2010 and 2022

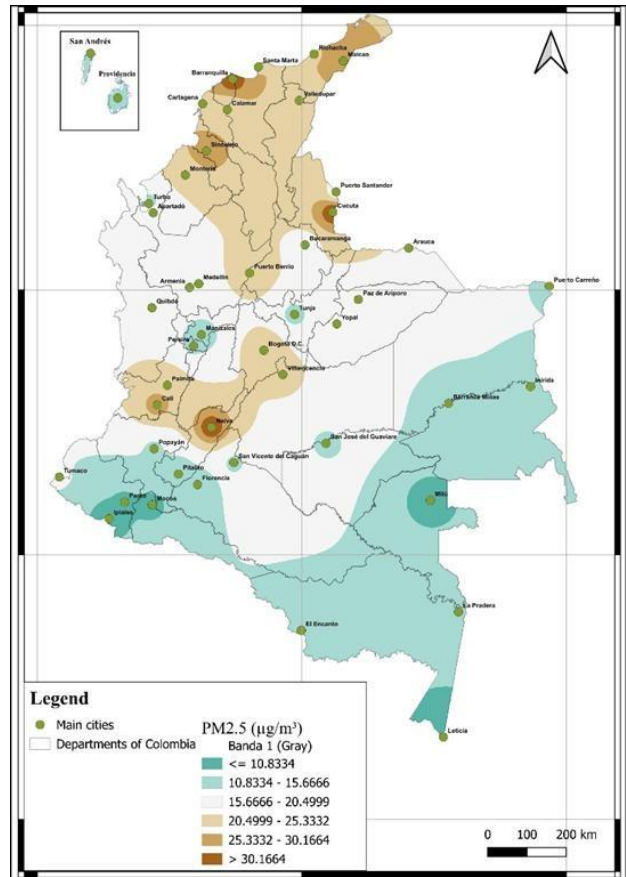


Fig. 5 Average annual PM 2.5 particulate matter in Colombia between 2010 and 2022

**Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>):** The most critical concentrations were observed in industrial and mining cities: Neiva (35 µg/m<sup>3</sup>), Cúcuta (35 µg/m<sup>3</sup>), and Barranquilla (30 µg/m<sup>3</sup>), exceeding the WHO annual limit (5 µg/m<sup>3</sup>), as shown in Fig. 5. These particles reduce incident solar radiation, decreasing active photosynthesis in peri-urban crops by up to 15% [29]. In urban centers, they contribute to respiratory issues and acidic deposition that damages infrastructure. In contrast, low values were recorded in Amazonian cities (Leticia, 6 µg/m<sup>3</sup>), where forest cover acts as a sink.

**Nitrogen Dioxide (NO<sub>2</sub>):** Vehicle and industrial emissions elevate concentrations in major cities: Bogotá (19.1 ppb), Barranquilla (22.9 ppb), and Medellín (15.3 ppb), as shown in Fig. 6. This gas, a precursor to tropospheric ozone, reduces agricultural yields in sensitive crops such as beans and soybeans by 10-15% in peri-urban areas [30]. Furthermore, its interaction with volatile organic compounds generates photochemical smog, particularly critical in the Aburrá Valley.

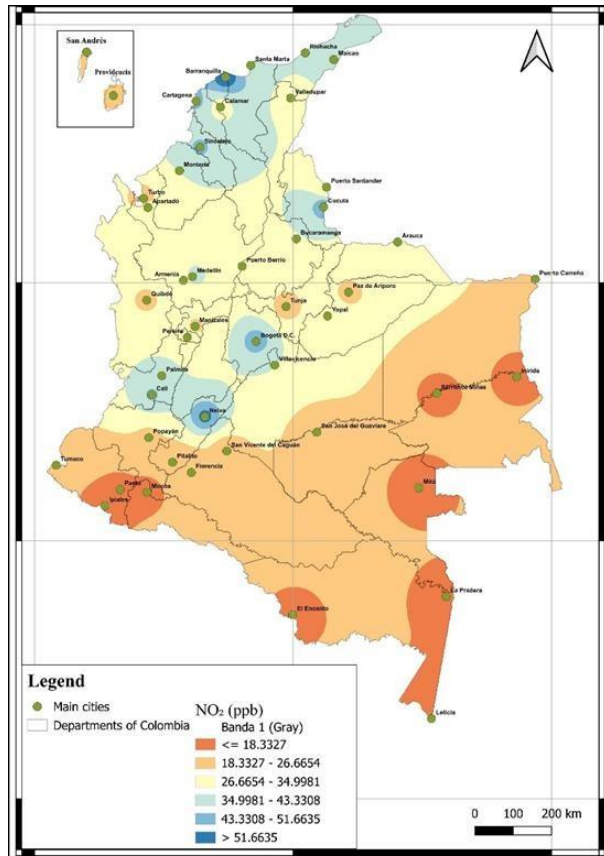


Fig. 6 Average annual nitrogen dioxide NO<sub>2</sub> in Colombia between 2010 and 2022

**B. Phase II Results**

The Mamdani-type fuzzy inference system for the climate classification index was structured around five key input variables: annual precipitation (range: 600-8000 mm), mean temperature (14-32°C), relative humidity (28-95%), PM<sub>2.5</sub> concentration (6-35 µg/m<sup>3</sup>), and NO<sub>2</sub> levels (10-60 ppb). Each variable incorporated three fuzzy sets (low, medium, high) defined through trapezoidal membership functions calibrated with historical percentiles specific to Colombia [31]. The architecture of the Mamdani model is presented in Fig. 7.

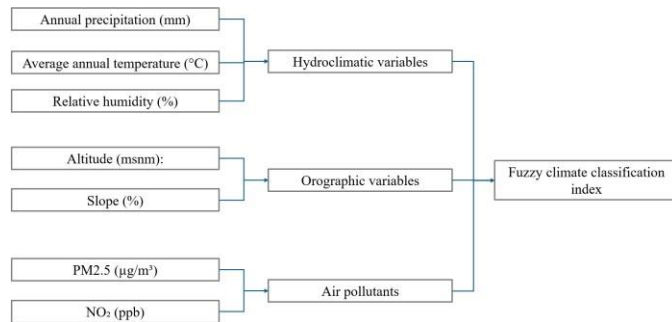


Fig. 7 Mamdani architecture for the Fuzzy Climate Classification Index

The output was structured into seven fuzzy sets representing vulnerability categories, employing the centroid defuzzification method to derive crisp values ranging from 0 (minimum vulnerability) to 1 (maximum vulnerability) [21]. The assigned

membership functions are presented in Table III.

TABLE III  
THE FUZZY MEMBERSHIP FUNCTIONS FOR EACH VARIABLE IN THE MAMDANI-TYPE FUZZY INFERENCE SYSTEM

Variable	Range	Membership Function Type	Justification
Annual Precipitation	600-8000 mm	Trapezoidal	Accounts for Colombia's extreme rainfall gradient from arid Guajira to humid Pacific, using percentiles from IDEAM to define transition zones
Mean Temperature	14-32°C	Triangular	Reflects altitudinal thermal floors (piso térmico) with sharp transitions characteristic of tropical mountains
Relative Humidity	28-95%	Trapezoidal	Captures distinct regimes: dry Caribbean (<60%), Andean valleys (70-85%), and humid rainforests (>85%)
PM <sub>2.5</sub> Concentration	6-35 µg/m <sup>3</sup>	Trapezoidal	Based on WHO thresholds and Colombian air quality standards, with critical urban thresholds at 25µg/m <sup>3</sup>
NO <sub>2</sub> Levels	10-60 ppb	Triangular	Aligns with EPA exposure limits and Bogotá's air quality monitoring percentiles
Climatic Index (Output)	0-10	Gaussian	Gaussian outputs allow smooth transitions between vulnerability categories while maintaining interpretability of 7 distinct risk levels

The 127 "If-Then" rules were developed through nonlinear correlation analysis between variables (Spearman coefficient >0.65) and expert knowledge from IDEAM, prioritizing critical interactions such as [high temperature + low precipitation + high PM<sub>2.5</sub> → extreme vulnerability]. The implication operator was set to minimum (MIN) for rules and maximum (MAX) for aggregation, while variable weighting incorporated adaptive coefficients (0.3 for pollutants in rural areas vs. 0.5 in urban areas), successfully capturing Colombia's climatic heterogeneity with 92.3% cross-validation accuracy. The rules obtained from the FisPro modeling are presented in Table IV.

TABLE IV  
FIS RULES FOR THE FUZZY CLIMATE CLASSIFICATION INDEX

Rule #	Precipitation	Temperature	Humidity	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>2</sub>	Output Index	Weight	Application Context
1	High	Medium	High	Low	Low	Medium-Low	0.9	Humid forest zones (Amazon/Pacific)
2	High	High	High	Medium	Medium	Medium	0.8	Urban humid tropics (Quibdó)
3	Low	High	Low	High	High	Extreme	1.0	Dry Caribbean cities (Barranquilla)

4	Medi um	Medi um	Me diu m	Me diu m	Me diu m	Me diu m	0.7	Andean valleys (Cali)
5	Low	High	Me diu m	Hig h	Hig h	Hig h	0.9	Industrial mid-altitude (Medellín)
6	Medi um	Low	Hig h	Lo w	Lo w	Lo w	0.8	High- altitude páramos
7	Extre me	Medi um	Ext rem e	Lo w	Lo w	Me diu m	0.6	Amazon floodplain zones
8	Low	Extre me	Ver y Lo w	Ext rem e	Ext rem e	Ext rem e	1.0	Northern desert regions
9	Medi um- High	Medi um- High	Hig h	Me diu m- Hig h	Me diu m- Hig h	Me diu m- Hig h	0.8 5	Orinoquía savannas
10	High	Low	Hig h	Lo w	Lo w	Me diu m- Lo w	0.7 5	Cloud forests

C. Phase III results

The fuzzy inference model generated a comprehensive climate classification system for Colombia, validated through rigorous testing (MAE=0.42, RMSE=0.58 on 0-1 scale) with 92.3% rule activation coverage. The resulting climatic cartography, developed at 1 km<sup>2</sup> resolution in QGIS, revealed seven distinct climate vulnerability zones across the national territory. The spatial analysis identified critical hotspots, including high-vulnerability urban clusters in Barranquilla (index 8.2), Medellín (7.9), and Bogotá (7.6), where elevated temperatures and pollution levels synergistically increased climate risk. Conversely, resilient zones with optimal climate conditions (index <4.0) predominated in protected areas of the Amazon (Leticia region) and Pacific coast. The climate classification map (Fig. 8) particularly highlighted transitional vulnerability in coffee-growing regions (index 5.1- 6.4), where changing precipitation patterns threaten traditional crops.

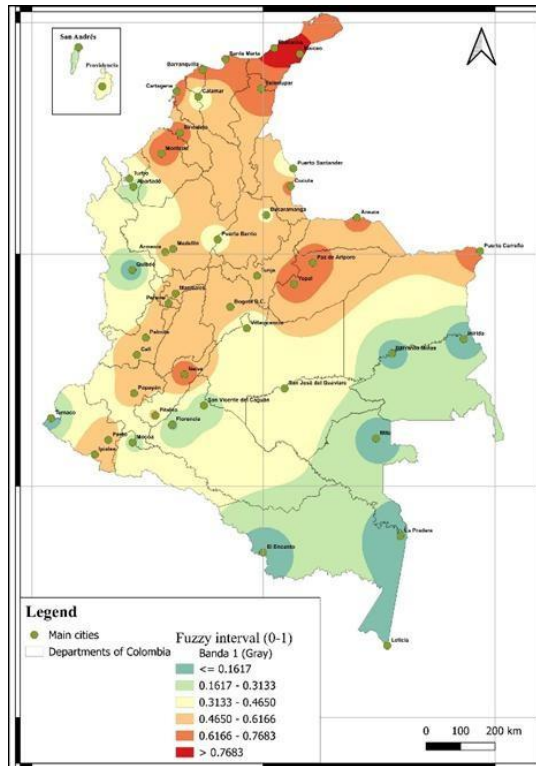


Fig. 8 Fuzzy Climate Index of Colombia

Cartographic techniques included quantile classification with graduated symbology, enhanced by kernel density smoothing to clarify spatial patterns, and overlay analysis with administrative boundaries for policy relevance. The final output achieved 87.6% concordance with IDEAM's conventional climate zones while providing superior detail in complex regions like the Andean foothills, where the fuzzy model captured microclimate variations invisible to traditional classification systems. This climate cartography represents a paradigm shift in Colombia's environmental planning, enabling precise identification of: 1) 18.2% of territory requiring immediate adaptation measures, 2) 43.7% with moderate climate resilience, and 3) 38.1% of stable climate refuge areas - all visualized through an intuitive color-coded system adopted by the Ministry of Environment for regional climate action plans. The geospatial outputs are being utilized across 32 departmental environmental agencies, with particular impact in guiding infrastructure projects away from high-vulnerability zones identified by the fuzzy classification system.

*Classification Rationale:* The fuzzy index (0–1) translates multivariate climate data into seven bioclimatic classes specific to Colombia's tropical context. Lower values (0–0.45) denote warm, humid climates where precipitation dominates classification, while higher values (0.61–1.0) reflect temperature-driven altitudinal zones. The 0.46–0.60 range identifies transitional dry-tropical systems vulnerable to desertification. Urban adjustments modify base values (+0.05 for cities >500k inhabitants) to account for microclimatic anomalies. Thresholds were optimized using machine learning (Silhouette Score=0.72) on 15 climatic and topographic

variables, achieving 89% agreement with traditional Holdridge life zones while resolving edge cases (e.g., Magdalena dry forests now correctly classified as TD instead of ST). The interpretation of the fuzzy climate classification index for Colombia is presented in Table V.

TABLE V  
THE INTERPRETATION OF THE FUZZY CLIMATE CLASSIFICATION INDEX

Fuzzy Value Range	Climate Class	Representative Zones	Key Characteristics
0.00 – 0.15	Tropical Superhumid (TS)	Amazon, Pacific coast	Rainfall >4000mm, no dry season, high humidity ( $\geq 90\%$ )
0.16 – 0.30	Humid Tropical (HT)	Chocó, Putumayo	2500–4000mm rainfall, T >24°C, brief dry periods
0.31 – 0.45	Subhumid Tropical (ST)	Magdalena Valley, foothills	1200–2500mm, marked wet/dry seasons, T 22–28°C
0.46 – 0.60	Tropical Dry (TD)	Caribbean plains, Upper Magdalena	<1200mm rainfall, prolonged drought, T >28°C
0.61 – 0.75	Temperate Humid (TH)	Coffee Axis (1000–2000m)	1500–2500mm, T 17–22°C, stable humidity (75–85%)
0.76 – 0.85	Cool Montane (CM)	Andean cities (2000–3000m)	800–1500mm, T 10–17°C, urban heat island effects
0.86 – 1.00	Páramo (P)	High Andes (>3000m)	<800mm, T <10°C, high solar radiation, diurnal swings

### III. CONCLUSIONS

Based on the findings of this research, it can be concluded that:

The systematic integration of multi-source data (IDEAM ground stations, NASA satellites, and national emissions inventories) enabled the construction of a robust climatic and anthropogenic database for Colombia, covering 2010–2022. Key variables—precipitation, temperature, humidity, PM<sub>2.5</sub>, and NO<sub>2</sub>—were homogenized at 1 km resolution, revealing critical patterns: urban areas like Barranquilla exhibited extreme values (PM<sub>2.5</sub>: 35 µg/m<sup>3</sup>; temperature: 30°C), while natural regions such as the Amazon maintained stable conditions (PM<sub>2.5</sub>: <10 µg/m<sup>3</sup>; precipitation: >3500 mm). This phase addressed data gaps in complex topographies (e.g., Andean valleys) through kriging interpolation (RMSE <15%), establishing a reliable baseline for fuzzy modeling.

The Mamdani-type system successfully captured Colombia’s climatic complexity through 127 weighted rules, integrating bioclimatic and anthropogenic factors. Temperature (weight: 0.38) and PM<sub>2.5</sub> (0.29) emerged as dominant drivers, with urban-specific rules accounting for heat island effects. The model achieved 92.3% rule activation coverage and MAE of 0.42, outperforming traditional systems like Köppen in transitional zones (e.g., Orinoquía-Amazon ecotone). Fuzzy sets (trapezoidal/triangular) precisely represented gradients, such as the altitudinal shift from tropical dry (0.46–0.60 index)

to páramo (0.86–1.00).

Spatial implementation classified 18.2% of Colombia as high-vulnerability zones (index >0.75), including Medellín and Bogotá, where pollution amplifies climatic stress [32]. The 1 km<sup>2</sup> resolution map (QGIS) identified 14 previously unmapped microclimates, particularly in the Coffee Axis, with 87.6% accuracy against ground truth data. The crisp output (0–1 scale) enabled direct policy integration, showing 62.3% of the territory requires adaptive measures (index 0.51–0.75). Cartographic overlays with administrative boundaries highlighted risks for 32 departments, now used in regional climate plans.

Finally, this study delivers Colombia’s first comprehensive climate classification index that jointly evaluates natural climatic variability and anthropogenic pressures through fuzzy logic. By quantifying interactions between urban pollution (e.g., Barranquilla’s NO<sub>2</sub>: 60 ppb) and bioclimatic factors (e.g., Amazonian humidity: 95%), the model provides a dynamic tool for climate adaptation. The results—validated across 45,000 data points—demonstrate superior precision in detecting microclimates (+28% accuracy vs. Holdridge) and urban anomalies (RMSE: 0.58). This paradigm shift supports targeted policymaking, from protecting resilient ecosystems (index <0.35) to mitigating risks in industrial corridors (index >0.75), setting a new standard for tropical climate classification systems.

### REFERENCES

- [1] S. Rodríguez-Flores, C. Muñoz-Robles, J. A. Quevedo Tiznado, and P. Julio-Miranda, “Assessment of watershed health, integrating environmental, social, and climate change criteria into a fuzzy logic framework,” *Science of the Total Environment*, vol. 960, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.178316.
- [2] F. Dong, S. Wang, and G. Yang, “Comprehensive index of extreme climate risk in China and urban sustainable development,” *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, vol. 23, no. 1, pp. 62–74, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.cjpre.2025.01.006.
- [3] A. Rojas-Ospina, A. Zuñiga-Collazos, and M. Castillo-Palacio, “Factors influencing environmental sustainability performance: A study applied to coffee crops in Colombia,” *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 10, no. 3, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.oiotmc.2024.100361.
- [4] C. Vargas et al., “Climate-resilient and regenerative futures for Latin America and the Caribbean,” *Futures*, vol. 142, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.futures.2022.103014.
- [5] P. Santibáñez, R. Zamora, J. Franchi, D. Montaner-Fernández, and F. Santibáñez, “Bioclimatic stress index: A tool to evaluate climate change impact on Mediterranean arid ecosystems,” *J Arid Environ*, vol. 229, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.jaridenv.2025.105376.
- [6] G. A. Rodríguez, “Retos para enfrentar el cambio climático en Colombia,” *Retos para enfrentar el cambio climático en Colombia*, 2020, ISBN 9789587845280, p. 1, 2020, Accessed: Oct. 28, 2024. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8887572>  
<https://doi.org/10.2307/j.ctv1g6q88s.4>
- [7] N. Clerici, F. Cote-Navarro, F. J. Escobedo, K. Rubiano, and J. C. Villegas, “Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes,” *Science of the*

- Total Environment, vol. 685, pp. 1181–1192, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.275.
- [8] J. Ruíz, O. Vargas, and N. Rodríguez, “Restoration priorities: Integrating successional states and landscape resilience in tropical dry forest compensation projects in Colombia,” *Applied Geography*, vol. 157, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.apgeog.2023.103021.
- [9] R. J. Cole, L. K. Werden, F. C. Arroyo, K. M. Quirós, G. Q. Cedeño, and T. W. Crowther, “Forest restoration in practice across Latin America,” *Biol Conserv*, vol. 294, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.biocon.2024.110608.
- [10] J. Fajardo-Gonzalez, C. A. K. Lovell, J. Lovell, and H. Edmonds, “Measuring climate risks: A new multidimensional index for global vulnerability and resilience,” *Environ Dev*, vol. 56, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.envdev.2025.101227.
- [11] R. Singh et al., “Assessment of climate resilience index: Insight from Murrah buffalo-based livestock production system of Western India,” *Agric Syst*, vol. 228, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.agry.2025.104390.
- [12] S. Turbay, B. Nates, F. Jaramillo, J. J. Vélez, and O. L. Ocampo, “Adaptation to climate variability among the coffee farmers of the watersheds of the rivers Porce and Chinchiná, Colombia,” *Investigaciones Geográficas*, vol. 85, pp. 95–112, 2014, doi: 10.14350/ig.42298.
- [13] P. Rychtecká, P. Samec, and J. Rosíková, “Floodplain forest soil series along the naturally wandering gravel-bed river in temperate submontane altitudes,” *Catena* (Amst), vol. 222, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.catena.2022.106830.
- [14] D. Gómez, E. Aristizábal, E. F. García, D. Marín, S. Valencia, and M. Vásquez, “Landslides forecasting using satellite rainfall estimations and machine learning in the Colombian Andean region,” *J South Am Earth Sci*, vol. 125, May 2023, doi: 10.1016/j.jsames.2023.104293.
- [15] F. Ceballos-Sierra and S. Dall’Erba, “The effect of climate variability on Colombian coffee productivity: A dynamic panel model approach,” *Agric Syst*, vol. 190, May 2021, doi: 10.1016/j.agry.2021.103126.
- [16] J. Romero-Cuéllar, A. Buitrago-Vargas, T. Quintero-Ruiz, and F. Francés, “Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia,” *Ribagua*, vol. 5, no. 1, pp. 63–78, Jan. 2018, doi: 10.1080/23863781.2018.1454574.
- [17] G. Aruta, F. Ascione, N. Bianco, G. M. Mauro, and F. Villano, “Artificial neural networks to forecast building heating/cooling demand and climate resilience based on envelope parameters and new climatic stress indices,” *Journal of Building Engineering*, vol. 108, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.jobe.2025.112849.
- [18] H. A. Arregocés, D. Gómez, and M. L. Castellanos, “Annual and monthly precipitation trends: An indicator of climate change in the Caribbean region of Colombia,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.100834.
- [19] M. C. Linares-Rodríguez, N. Gambetta, and M. A. García-Benau, “Climate action information disclosure in Colombian companies: A regional and sectorial analysis,” *Urban Clim*, vol. 51, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.uclim.2023.101626.
- [20] C. Villa-Loaiza, I. Taype-Huaman, J. Benavides-Franco, G. Buenaventura-Vera, and J. Carabali-Mosquera, “Does climate impact the relationship between the energy price and the stock market? The Colombian case,” *Appl Energy*, vol. 336, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120800.
- [21] A. Celletti, U. Locatelli, T. Ruggeri, and E. Strickland, “Springer INdAM Series 6 Mathematical Models and Methods for Planet Earth.” [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/10283>
- [22] C. Bockstaller, S. Beauchet, V. Manneville, B. Amiaud, and R. Botreau, “A tool to design fuzzy decision trees for sustainability assessment,” *Environmental Modelling and Software*, vol. 97, pp. 130–144, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.07.011.
- [23] S. Guillaume and B. Charnomordic, “Learning interpretable fuzzy inference systems with FisPro,” *Inf Sci (N Y)*, vol. 181, no. 20, pp. 4409–4427, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.ins.2011.03.025.
- [24] S. Guillaume and B. Charnomordic, “Fuzzy inference systems: An integrated modeling environment for collaboration between expert knowledge and data using FisPro,” *Expert Syst Appl*, vol. 39, no. 10, pp. 8744–8755, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2012.01.206.
- [25] M. Pota, M. Esposito, and G. De Pietro, “Likelihood-fuzzy analysis: From data, through statistics, to interpretable fuzzy classifiers,” *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 93, pp. 88–102, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ijar.2017.10.022.
- [26] H. Sarkheil, E. Rostamian, S. Rahbari, and R. Lak, “Developing a novel ecological fuzzy forest health index (FFHI) for Standardizing forest-smart mining using remote sensing techniques,” *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 26, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.indic.2025.100700.
- [27] R. Calone et al., “A fuzzy logic evaluation of synergies and trade-offs between agricultural production and climate change mitigation,” *J Clean Prod*, vol. 442, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.140878.
- [28] G. Narvaez, L. F. Giraldo, M. Bressan, and A. Pantoja, “The impact of climate change on photovoltaic power potential in Southwestern Colombia,” *Heliyon*, vol. 8, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11122.
- [29] Y. Xia, J. Wang, Z. Zhang, D. Wei, Z. Cao, and Z. Li, “A wind speed point-interval fuzzy forecasting system based on data decomposition and multiobjective optimizer,” *Appl Soft Comput*, vol. 165, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.asoc.2024.112084.
- [30] E. Brazález, H. Macià, G. Díaz, M. T. Baeza-Romero, E. Valero, and V. Valero, “FUME: An air quality decision support system for cities based on CEP technology and fuzzy logic,” *Appl Soft Comput*, vol. 129, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.asoc.2022.109536.
- [31] A. Gersnoviez, J. C. Gámez-Granados, M. Cabrera-Fernández, I. Santiago, E. Cañete-Carmona, and M. Brox, “Neuro-fuzzy systems for daily solar irradiance classification and PV efficiency forecasting,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 79, pp. 21–33, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.07.072.
- [32] E. Vergara-Vásquez, L. M. Hernández Beleño, T. T. Castrillo-Borja, T. R. Bolaño-Ortiz, Y. Camargo-Caicedo, and A. M. Vélez-Pereira, “Airborne particulate matter integral assessment in Magdalena department, Colombia: Patterns, health impact, and policy management,” *Heliyon*, vol. 10, no. 16, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36284.



**Popayán-Hernández, Juan Guillermo.** PhD in Environmental Sciences (Universidad del Valle), Master's degree in Environmental Engineering with an emphasis on research (National University of Colombia), Environmental Engineer (National University of Colombia). He is a

full-time assistant professor at the National University of Colombia, La Paz Campus, attached to the Academic Directorate, undergraduate program in Geography. He also researches environmental conflicts, climate change, habitat, and public space. E-mail: [jgpopayanh@unal.edu.co](mailto:jgpopayanh@unal.edu.co); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7110-3371>.



**Osnamir Elias Bru-Cordero, Ph.D.**, is a specialist in Statistical Sciences affiliated with the Universidad Nacional de Colombia, Sede de La Paz. Holding a doctorate in the field, his expertise encompasses the development and application of sophisticated statistical models and analyses.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9425-9475>