



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

# REVISTA. Ingeniería

Volumen 27 • Número 2 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

# 2022

# REVISTA Ingeniería

Volumen 27 · Número 2 · Año 2022 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

## REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Carrera 7 No. 40-53  
Edificio Administrativo  
Piso 7 - Facultad de Ingeniería  
Bogotá, Colombia  
Teléfono: + 57 (1) 323 93 00 ext. 2413  
Correo revista:  
revista\_ing@udistrital.edu.co

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving>

## POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico enfocada en la gran área de conocimiento de Ingeniería y Tecnología, de acuerdo a la clasificación de la OCDE, con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería y la Tecnología. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la Ingeniería y la Tecnología a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

## EDITORES

**Oscar Danilo Montoya Giraldo, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**Nelson Leonardo Díaz, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

## COMITÉ EDITORIAL

**Sarah Greenfield, PhD.**  
Faculty of Technology of  
Montfort University,  
Reino Unido

**Alonso Salvador Sanchez, PhD.**  
Universidad de Alcalá,  
España

**Jose Marcio Luna, PhD.**  
Perelman School of Medicine,  
University of Pennsylvania, Estados Unidos

**José Luis Villa, PhD.**  
Universidad Tecnológica de  
Bolívar, Colombia

**César Leonardo Trujillo Rodríguez, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Josep M. Guerrero, PhD.**  
Aalborg University, Dinamarca

**Carlos Andrés Peña, PhD.**  
Institute for Information and Communication Technologies - Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Suiza

**Iván Santelices Malfanti, PhD.**  
Universidad del Bio-Bío,  
Chile

**Carlos Eduardo Moreno, PhD.**  
Universidad Nacional de  
Colombia

**Víctor Hugo Grisales, PhD.**  
Universidad Nacional de  
Colombia

**Juan Carlos Figueroa, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

## COMITÉ CIENTÍFICO

**Germán Jairo Hernández, PhD.**  
Universidad Nacional  
de Colombia

**Paulo Gaona García, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Gustavo Puerto Leguizamón, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Elvis Eduardo Gaona García, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Germán Méndez Giraldo, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Francisco Santamaría Piedrahíta, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Diego Rodríguez Patarroyo, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

## DIRECTIVAS

**Giovanny Tarazona Bermúdez, PhD.**  
Rector

**Ángela Parrado Rosselli, PhD.**  
Directora Centro de Investigación  
y Desarrollo Científico

**Luz Esperanza Bohórquez, PhD.**  
Decana de la Facultad de Ingeniería

## PREPARACIÓN EDITORIAL

**Ingrí Gisela Camacho, BSc.**  
Gestor Editorial

**Pablo Estrada Suarez**  
Corrección de Estilo

**José Daniel Gutierrez Mendoza**  
Corrección de Estilo

**Julian Arcila-Forero, MSc.**  
Diseñador *L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X*

## PERMISO DE REPRODUCCIÓN

### Open access



Los artículos incluidos en esta edición se encuentran bajo la licencia "Atribución - No Comercial - Compartir igual": esta licencia permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de tu obra de modo no comercial, siempre y cuando te den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

Atribución - No Comercial - Compartir igual.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Ni la Revista INGENIERÍA, Editor, Comité Editorial, Comité Científico, Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital F.J.C., otorgan ninguna garantía, expresa o implícita, a asumen responsabilidad alguna por la exactitud, completitud o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso divulgado, o que represente que su uso no infrinja derechos privados. La mención o referencia a algún producto, proceso o servicio comercial en específico, por su marca comercial, marca registrada, fabricante o cualquier otra denominación, no implica ni constituye su endoso, recomendación endosa, recomendación o favorecimiento por parte de la Revista INGENIERÍA. Los juicios y opiniones expresadas por los autores en este medio son de su responsabilidad y no establecen, reflejan o comprometen los de la Revista INGENIERÍA.

## COSTO DE PROCESAMIENTO DE ARTÍCULOS

La Revista INGENIERÍA no realiza ningún cobro por las postulaciones, evaluación y publicación de los artículos sometidos. La Universidad Distrital Francisco José de Caldas asume los gastos relacionados con el proceso de edición, gestión y publicación. Los Pares Evaluadores realizan su contribución de manera voluntaria y sin retribución económica.

## INDIZADA EN



## ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

**Marcelo Werneck Barbosa**  
Universidad Autónoma de Chile, Chile

**Renato Pinto da Cunha**  
Universidad de Brasilia, Brasil

**Luis Fernando Espinosa Moreno**  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

**María Noel Cabrera**  
Universidad de la República, Uruguay

**Conrado García González**  
Universidad Autónoma de Baja California, México

**Oscar A. van der Velde**  
Universitat Politècnica de Catalunya, España

**Víctor Revilla-Cuesta**  
Universidad de Burgos, España

**Manuel Palomo-Duarte**  
Universidad de Cádiz, España

**Marcos Tostado-Véliz**  
Universidad de Jaén, España

**Juan Carlos Figueroa-García**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**Paloma María Teresa Martínez Sánchez**  
Universidad del Bosque, Colombia

**José L. Pastor**  
Universitat d'Alacant, España

**Laura Caruso Fermé**  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

**Leonardo Clavijo**  
Universidad de la República, Uruguay

**Armando Pérez Sánchez**  
Universidad Autónoma de Baja California, México

**Julio César Marín**  
Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnológicas, España

**José Tomás San-José Lombera**  
Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea, España

**Antonio Balderas**  
Universidad de Cádiz, España

**Nidia Tuay**  
Universidad Pedagógica Nacional, Colombia

**Jose Guillermo Guarnizo Marin**  
Universidad Santo Tomás, Colombia

# TABLA DE CONTENIDOS

## Editorial

### Notes on the Dimension of the Solution Space in Typical Electrical Engineering Optimization Problems

*Notes on the Dimension of the Solution Space in Typical Electrical Engineering Optimization Problems*

Oscar Danilo Montoya

## Ingeniería Ambiental

### Validation of a Digital Photographic Protocol for Macroscopic Analysis of Wood Anatomy and Colorimetry of Tree Species in Costa Rica

*Validación de un protocolo fotográfico digital para análisis macroscópico de la anatomía y colorimetría en madera de especies arbóreas de Costa Rica*

Juan Carlos Valverde, Dagoberto Arias-Aguilar, Geovanni Figueroa, Erick Mata, Nelson Zamora

## Ingeniería Civil y Medioambiental

### Inclusion of Micropiles as Load Recovery Elements in Foundations: Literature Review

*Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento*

Wendy M. Castellanos Guerrero, Edgar Rodríguez Rincón

### Systematic Literature on the Improvement of the Mechanical Properties of Concrete with Fibers of Artificial-Natural Origin

*Revisión sistemática de la literatura sobre la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón con fibras de origen artificial-natural*

Yamalit Itamar Olivera Pérez, Sandro Piero Guevara Saravia, Sócrates Pedro Muñoz Pérez

## Educación en Ingeniería

### Methodology for the Design of a Hybrid Energy System with a Didactic Approach: Case Study Centro Educativo Luis López de Mesa

*Metodología para el diseño de un sistema de energía híbrido con enfoque didáctico: estudio de caso Centro Educativo Luis López de Mesa*

Diego Alejandro Zambrano Joya, David Leonardo Rodríguez Salazar, Diego Julián Rodríguez Patarroyo

## Ingeniería Eléctrica y Electrónica

### Charge Structure Analysis of Two Thunderstorms Recorded by the Lightning Mapping Array Network in the Colombian Magdalena Medio

*Análisis de estructuras de carga de dos tormentas eléctricas registradas por la red Lightning Mapping Array en el Magdalena Medio colombiano*

Brandon Ardila, Edison Soto, Didier Argüello, Heribert Tello, Jesús López, Joan Montanyá

## Ingeniería Industrial

### Reflections on supply logistics: Background and trends

*Reflexiones en torno a la logística de aprovisionamiento: Antecedentes y tendencias*

Javier Parra Peña, Yeny A. Niño Villamizar, Mónica Suárez Serrano

## Ingeniería de Sistemas

### Social Relations and Communities in a Virtual Platform for Computer Programming Courses

*Relaciones sociales y comunidades en una plataforma virtual para cursos de programación de computadores*

Ginna Viviana Leytón Yela, Astrid Johana Valencia Mosquera, Víctor Andrés Bucheli Guerrero

## Ingeniería Mecánica

### Experimental Assessment of the Emissions Characteristics of Low-Displacement Diesel Engines Operating with Biodiesel Blends from Algae Oil

*Análisis experimental de las características de emisión de motores diésel de baja cilindrada operando con mezclas de biodiésel de aceite de alga*

Daniel Maestre-Cambronel, Sofia Orjuela-Abril, Jorge Duarte-Forero

## Sección Especial: Mejores artículos extendidos - WEA 2021

### Data Acquisition with LoraWAN IoT Technology to Monitor Bio-Inspired Wind Turbines in Rural Areas of Cundinamarca

*Adquisición de datos con tecnología IoT LoraWAN para monitoreo de turbinas eólicas bio-inspiradas en zonas rurales de Cundinamarca*

Jersson A. Quintero, Héctor G. Parra-Peñuela, Elvis E. Gaona

### Testing the Causes of a Levee Failure Using Bayesian Networks

*Evaluación de las causas de falla de un dique usando redes bayesianas*

William García-Feria, Julio Colmenares-Montañez, German Hernández-Pérez

## Instructions for Authors

## Notes on the Dimension of the Solution Space in Typical Electrical Engineering Optimization Problems

Nowadays, optimization methodologies based on combinatorial strategies (*i.e.*, metaheuristic methods) and exact methods can be easily found throughout the scientific literature in all areas of engineering, including electrical, mechanical, chemical, computational, and food engineering, among others. The common denominator in these areas of research corresponds to the complexity of the optimization models, as well as to the large dimensions of the solution space where these models are defined [1]. In addition, most of these models combine binary (also integer) decision variables with continuous ones into nonlinear non-convex formulations, which complicates the application of exact solution methods.

Electrical engineering does not escape these problems; on the contrary, many of its optimization problems are defined on the family of mixed-integer nonlinear programming models [2]. Three of the most common optimization problems in electrical engineering are: (i) the reconfiguration of primary distribution feeders [3]; (ii) phase-balancing in three-phase distribution grids [4]; and (iii) the location of shunt devices (*i.e.*, dispersed generation, capacitor banks or static compensators) in distribution networks [5].

The solution to these problems in electrical engineering contributes to improving the quality of the electricity service provided by distribution companies to all end-users, given that their objective functions are typically the minimization of the total grid energy losses [6]. Moreover, these are connected with the concept of energy efficiency due to the fact that energy loss minimization is directly linked to the reduction of power generation, which, in the case of the fossil fuels, implies minimizing greenhouse gas emissions from the electrical sector [7].

Note that the aforementioned electrical engineering problems combine power flow equations (nonlinear and non-convex due to products among voltages with trigonometric functions) with binary and integer variables that make their solution with exact optimization methodologies a much more complex issue [8].

Open access

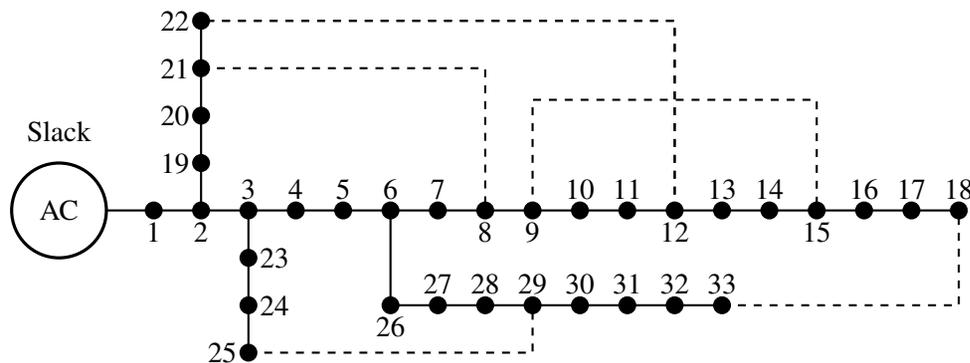


Cite as: Montoya O. D., "Notes on the dimension of the solution space in typical electrical engineering optimization problems". *Ing.*, vol. 27, no. 2, 2022. e19310. <https://doi.org/10.14483/23448393.19310>  
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Owing to the combination of the discrete and continuous variables in an MINLP model, in the scientific literature, the solution of these models is typically carried out with master-slave methodologies based on metaheuristics [9]. The master stage is entrusted with solving the discrete problem, and the slave stage solves the continuous component of the model. However, prior to applying these solution methodologies, it is necessary to determine the size of the solution space of the optimization problem's discrete component since this dimension will define whether there is a need to use combinatorial optimizers in the solution.

### Reconfiguration of primary distribution feeders

The problem regarding the reconfiguration of primary distribution feeders consists of selecting a set of distribution lines that must be operated to minimize the total grid power losses for a typical demand condition. To illustrate this problem, Fig 1 presents the electrical configuration of the IEEE 33-bus system for reconfiguration studies [10].



**Figure 1.** Configuration of the IEEE 33-bus grid

The main challenge in the distribution feeder reconfiguration for a grid with  $n$  nodes is to find the radial configuration of the system, *i.e.*, a set composed of  $n - 1$  distribution lines that minimizes the total losses in all the branches of the network. Note that, in this problem, that the number of available paths  $l$  to be selected is higher than the number of nodes, which implies that all the possible solutions for this problem are defined by the combination  $C(l, n - 1)$ , *i.e.*:

$$d = C(l, n - 1) = \frac{l!}{(l - n + 1)!(n - 1)!} \quad (1)$$

Also note that, if Eq. (1) is applied to the test feeder in Fig. 1, then the dimension of the solution space for this problem is 435897.

### Phase-balancing in three-phase distribution grids

The phase-balancing problem in three-phase distribution networks corresponds to determining the type of connection of the load at each node of the network from six possible options, namely from sequence ABC (type 1) to sequence CBA (type 6) [4]. To determine the size of the solution space for the problem regarding phase-balancing in distribution grids, let us consider the test feeder

presented in Fig. 1, which has  $n = 33$  nodes. Thereupon, phase balancing is applied to all nodes except the substation bus. For this reason, the size of the solution space, *i.e.*,  $d$ , is defined as follows:

$$d = 6^{n-1} \quad (2)$$

which, for the IEEE 33-bus system, will be equal to 7958661109946400884391936, *i.e.*, the dimension of the solution space has about  $7.9586611099464 \times 10^{24}$  possible solutions.

### Location of shunt devices

The problem regarding the location of shunt devices in distribution grids implies exploring the possibility of integrating distributed energy resources in the networks to reduce energy losses, annual operative costs, or improving voltage profile performance, among other objectives [5]. If there are  $k$  shunt devices available for installation and the system is composed of  $n - 1$  nodes (except the substation bus), then the solution of the problem is to identify the best  $k$  nodes from the total  $n$ . This allows minimizing the objective function under study. In this context, the dimension of the solution space can be defined as follows [9]:

$$d = C(n - 1, k) = \frac{(n - 1)!}{(n - 1 - k)!k!} \quad (3)$$

Note that, if Eq. (3) is applied to the test feeder in Fig. 1 with  $k = 3$ , then the dimension of the solution space is 4960. However, if  $k$  is selected as 5, the dimension of the solution space increases to 201376.

### General commentaries

The analysis of the dimension of the solution space in the three studied problems is an important step prior to the selection of an optimization technique in order to deal with their solutions. Note that, in all cases, the dimension of the solution space depends on the size of the distribution network, as well as on the number of elements that will be included in their analysis, which define the dimensions of the solution space from thousands to billions of options including enormous solution spaces, as is the case of the phase-balancing problem.

On the other hand, for the field of electrical engineering, the solution of the studied problems is of the utmost importance since they are related to potential improvements in the energy service provided by distribution companies. This includes, for instance, the minimization of the total grid energy losses (*i.e.*, improving the efficiency of the electrical energy service). These issues are connected with the reduction of the greenhouse gas emissions from fossil sources used to generate electricity, which is nowadays society's main objective for the XXI century.

Oscar Danilo Montoya 

Compatibility and Electromagnetic Interference group, Department of Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Electrical Engineer, Master's in Electrical Engineering, and PhD in Engineering.

[odmontoyag@udistrital.edu.co](mailto:odmontoyag@udistrital.edu.co)

## References

- [1] J. B. Odili, “Combinatorial optimization in science and engineering,” *Curr. Sci.*, vol. 113, no. 12, p. 2268, Dec. 2017. [↑ 1](#)
- [2] M. Lavorato, J. F. Franco, M. J. Rider, and R. Romero, “Imposing radiality constraints in distribution system optimization Problems,” *IEEE Transact. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 172–180, Feb. 2012. [↑ 1](#)
- [3] J. A. Taylor and F. S. Hover, “Convex models of distribution system reconfiguration,” *IEEE Transact. Power Sys.*, vol. 27, no. 3, pp. 1407–1413, Aug. 2012. [↑ 1](#)
- [4] K. Ma, L. Fang, and W. Kong, “Review of distribution network phase unbalance: scale, causes, consequences, solutions, and future research directions,” *CSEE J. Power Energy Sys.*, vol. 6, no. 3, pp. 479–488, 2020. [↑ 1, 2](#)
- [5] S. Kaur, G. Kumbhar, and J. Sharma, “A MINLP technique for optimal placement of multiple DG units in distribution systems,” *Int. J. Elec. Power Energy Sys.*, vol. 63, pp. 609–617, Dec. 2014. [↑ 1, 3](#)
- [6] G. Srinivasan, “Optimization of distributed generation units in reactive power compensated reconfigured distribution network,” *Automatika*, vol. 62, no. 2, pp. 249–263, Apr. 2021. [↑ 1](#)
- [7] P. A. Owusu and S. Asumadu-Sarkodie, “A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation,” *Cogent Eng.*, vol. 3, no. 1, p. 1167990, Apr. 2016. [↑ 1](#)
- [8] D. K. Molzahn, “Identifying and characterizing non-convexities in feasible spaces of optimal power flow problems,” *IEEE Transact. Circ. Sys. II: Express Briefs*, vol. 65, no. 5, pp. 672–676, May 2018. [↑ 1](#)
- [9] O. D. Montoya, “A convex OPF approximation for selecting the best candidate nodes for optimal location of power sources on DC resistive networks,” *Eng. Sci. Tech. Int. J.*, vol. 23, no. 3, pp. 527–533, Jun. 2020. [↑ 2, 3](#)
- [10] V. Vai, S. Suk, R. Lorm, C. Chhlonh, S. Eng, and L. Bun, “Optimal reconfiguration in distribution systems with distributed generations based on modified sequential switch opening and exchange,” *App. Sci.*, vol. 11, no. 5, p. 2146, Feb. 2021. [↑ 2](#)

# Validation of a Digital Photographic Protocol for Macroscopic Analysis of Wood Anatomy and Colorimetry of Tree Species in Costa Rica

*Validación de un protocolo fotográfico digital para análisis macroscópico de la anatomía y colorimetría en madera de especies arbóreas de Costa Rica*

**Juan Carlos Valverde**<sup>ID</sup>\*<sup>1</sup>, **Dagoberto Arias-Aguilar**<sup>ID</sup><sup>2</sup>, **Geovanni Figueroa**<sup>ID</sup>\*<sup>3</sup>, **Erick Mata**<sup>ID</sup><sup>4</sup>, **Nelson Zamora**<sup>ID</sup><sup>4</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción (Concepción, Chile), <sup>2</sup>Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica (Cartago, Costa Rica), <sup>3</sup>Escuela de Matemáticas, Tecnológico de Costa Rica (Cartago, Costa Rica), <sup>4</sup>Escuela de Ingeniería en Computación, Tecnológico de Costa Rica (Cartago, Costa Rica)  
\*Correspondence E-mail: juvalverde@udec.cl

Recibido: 13/06/2021. Modificado: 18/10/2021. Aceptado: 25/11/2021.

## Abstract

**Context:** The process of digitizing wood samples for identification and study has become increasingly relevant over the past decade, which is why it is necessary to consider photographic aspects that generate representation of the images with respect to the physical sample.

**Method:** Ten timber species were used with no less than ten sampled trees. From each individual, five wooden cubes with a 10 mm edge were extracted and photographed with a stereoscope at 20x magnification under four luminosity protocols. During the process, variations in color (under the coordinates L\*, a\*, and b\*), color differential (E\*), and chroma (C\*) were evaluated in addition to the density and diameter of the vessels.

**Results:** The results showed that a 50 % brightness showed the greatest similarity to the colorimetry of the wood, obtaining E\* values of less than 6 in all species, as well as C\* values within the optimal range of 5 to 7. Regarding the anatomy of the individuals, the same behavior was observed in the ten species; it was found that the luminosity treatments at 25 and 50 % showed no significant differences, while the luminosities of 75 and 100 % tended to underestimate the values.

**Conclusions:** The treatment with 25 % luminosity is ineffective due to the darkening of the surface, while exposures of 75 and 100 % tended to clarify the surface and underestimate anatomical characteristics.

**Keywords:** natural forest, wood anatomy, CIELAB

**Language:** Spanish

Open access



Cite as: Valverde, J. C., Arias, D., Figueroa, G., Mata, E., Zamora, N. "Validación de un protocolo fotográfico digital para análisis macroscópico de la anatomía y colorimetría en madera de diez especies arbóreas de Costa Rica". *Ing*, vol. 27, no. 2, 2022. e16503. <https://doi.org/10.14483/23448393.16503>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

### Resumen

**Contexto:** El proceso de digitalización de muestras de madera para su identificación y estudio ha tomado relevancia en la última década, por lo que es necesario considerar los aspectos fotográficos que generen representatividad de las imágenes con respecto a la muestra física.

**Método:** Se utilizaron diez especies maderables con no menos de diez árboles muestreados. De cada individuo se extrajeron cinco cubos de madera de 10 mm de arista y se fotografiaron mediante un estereoscopio con un aumento de 20x bajo cuatro protocolos de luminosidad. En el proceso se evaluaron variaciones del color (bajo las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ ), el diferencial de color ( $\Delta E^*$ ) y el chroma ( $\Delta C^*$ ), además de la densidad y diámetro de vasos.

**Resultados:** Los resultados mostraron que la luminosidad del 50 % fue la que mostró la mayor similitud con la colorimetría de la madera, obteniendo valores de  $\Delta E^*$  inferiores a 6 en todas las especies y valores de  $\Delta C^*$  dentro del rango óptimo de 5 a 7. Con respecto a la anatomía de los individuos, se dio el mismo comportamiento con las diez especies; se encontró que los tratamientos de luminosidad al 25 y 50 % no mostraron diferencias significativas, mientras que las luminosidades al 75 y 100 % tendieron a subestimar los valores.

**Conclusiones:** El tratamiento de luminosidad al 25 % es poco efectivo por el oscurecimiento de la superficie, mientras que las exposiciones al 75 y 100 % tendieron a aclarar la superficie y subestimar las características anatómicas.

**Palabras clave:** bosque natural, anatomía de la madera, CIELAB

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

El trópico es una de las regiones con mayor biodiversidad del mundo [1], aspectos climáticos y edafológicos han incidido en una amplia diversidad de especies de flora y fauna [2], permitiendo que más del 40 % de la biodiversidad conocida a nivel mundial se ubique en esta región geográfica [1]. Solo en Costa Rica se reportan más de 500.000 especies (6 % de la diversidad mundial) [3], con una presencia de más de 2.200 especies arbóreas, de las cuales únicamente se ha aprovechado un 10 % para fines comerciales en el país [4].

Ante tal biodiversidad se hace necesario el desarrollo de expediciones de colecta botánica que permitan la identificación, la caracterización y la geolocalización de las especies [5]. Tradicionalmente las colectas se han enfocado en la colección de muestras de ramas y hojas, debido a su facilidad de recolección, manipulación y almacenamiento [6]. Pero también existe otro tipo de colecta de material, de mayor dificultad en el caso de árboles, y que consiste en la colecta de muestras de madera para el estudio posterior. Generalmente, las piezas de madera que se obtienen del tronco o una rama gruesa [7], la muestra es secada y se mantiene en colecciones especializadas denominadas xilotecas [5].

Las xilotecas cuentan con una basta información de la diversidad maderable de un país o una región, permiten además entender procesos de crecimiento de las especies [8], concentraciones de acumulación de carbono y variabilidad anatómica de una especie [9]. Su implementación ayuda no solo a la identificación o caracterización de las especies, sino también al entendimiento de los procesos metabólicos y anatómicos que generan la madera, los procesos de acumulación de carbono y la similitud de las especies en cuanto a su composición anatómica por familias [10]. Sin embargo, las xilotecas han tenido un retardo tecnológico en las últimas décadas debido a la poca implemen-

tación en el desarrollo de plataformas de acceso virtual [11]. Tradicionalmente, la xiloteca se ha considerado un sitio de consulta presencial, en el que se debe localizar y analizar la muestra física y con un espacio de utilización de tecnología muy reducido; aspectos que han incidido en que el impacto científico de las xilotecas sea reducido a especialistas o a consultas específicas e imposibilitando el desarrollo de consultas en conjunto de colecciones de diferentes regiones o países en tiempo real [8].

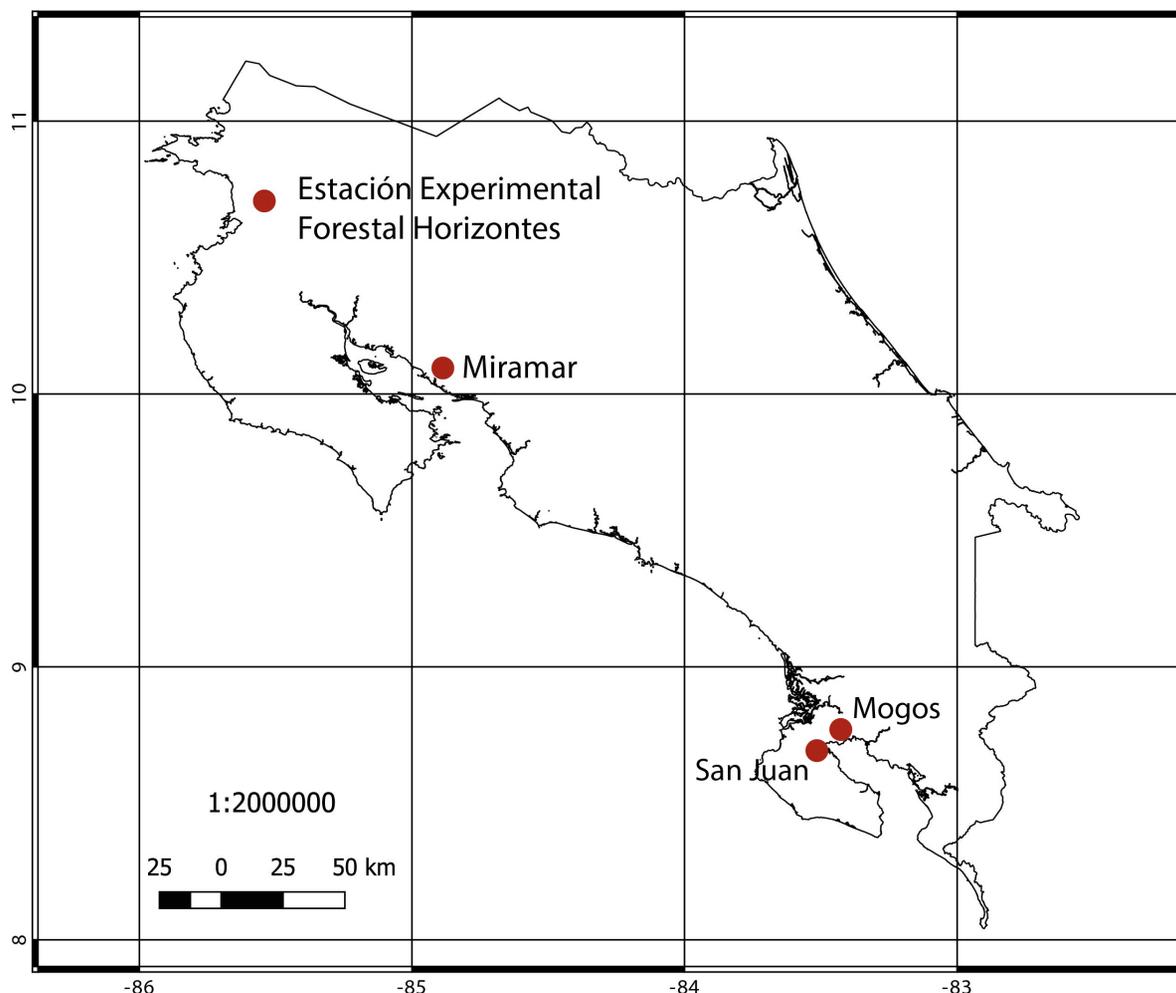
En la última década se ha iniciado un proceso de digitalización de material biológico con el fin de aumentar la accesibilidad de las colecciones, ampliar su utilización y permitir el desarrollo de investigaciones internacionales o poblacionales que consideren varias regiones [12]. Para el proceso de digitalización de muestras de xiloteca a nivel macroscópico se deben considerar tres elementos fundamentales, según mencionan [13]: i. la versión digital de la muestra debe preservar las características de dimensionalidad, estabilidad y colorimetría de la muestra física, ii. la manipulación de las propiedades de la muestra debe ser mínima, para evitar un sesgo en la imagen que pueda inducir en un sesgo en el entendimiento e identificación por parte del usuario y iii. se debe respetar y mantener toda la información complementaria presente en la muestra, para lo cual se debe considerar la ficha de metadatos de las muestras y anotaciones existentes en el material. Conforme mayor sea la similitud entre las propiedades visuales presentes en la muestra física y digital, mayor será la representatividad y la aplicabilidad de la especie con fines científicos.

A nivel mundial la creación de xilotecas se ha desarrollado en su mayoría en especies de climas templados, destacando colecciones en Europa (Alemania, Francia e Inglaterra) y en Estados Unidos con The Forest Laboratory in Madison, que cuenta con la colección más grande del mundo [14]. En América Latina resaltan colecciones en Brasil, Argentina, Colombia y México, que cuentan con muestras de especies templadas y tropicales en menor cantidad [15], [16]. Si el análisis se enfoca en colecciones con especies del trópico [16], se destaca el sureste asiático donde crearon una colección de tres especies nativas de la región con fotografías a tamaño natural y 10 X. Por su parte [8], en el oeste asiático desarrollaron una colección de muestras de dos especies arbóreas con imágenes de microscopio (40 X) y estereoscopio a 10 X. Mientras en México se han creado “demos” de colecciones de xiloteca hasta de cien especies en escala natural [17], en Colombia se dispone de amplias colecciones de especies tropicales que en su mayoría cuentan con pocos estudios y caracterización anatómica, física y mecánica de la madera [18]; en cambio, en Italia desarrollaron un equipo de homologación fotográfica a escala natural para veinte especies arbóreas de la región [19]. Sin embargo, no se cuenta con estudios que estandaricen las condiciones fotográficas óptimas para análisis anatómicos y colorimétricos de imágenes macroscópicas de especies maderables. Por lo que el presente estudio consistió en determinar las condiciones de luminosidad óptimas en fotografías macroscópicas para la identificación de variables anatómicas y colorimétricas en diez especies arbóreas tropicales de Costa Rica.

## 2. Métodos

### 2.1. Sitio de estudio y especies

El estudio se desarrolló en la costa pacífica de Costa Rica (figura 1), región que cuenta con una amplia variedad de bosques tropicales que en la actualidad se han enfocado en un uso forestal sos-



**Figura 1.** Sitios de colección de las diez especies arbóreas de estudio en Costa Rica

tenible para la obtención de madera con múltiples propósitos [21]. Los cuatro sitios seleccionados mostraron una diversidad de especies representativa de la región; a continuación se presenta una caracterización de cada bosque seleccionado: Estación Forestal Experimental Horizontes ubicada en Guanacaste ( $10^{\circ}42'10''\text{N}$ ,  $85^{\circ}33'12''\text{O}$ ) a una altitud de 120 m, bosques en la región de Miramar, Puntarenas ( $10^{\circ}01'29''\text{N}$ ,  $84^{\circ}14'04''\text{O}$ ) a una altitud de 270 m, en ambas regiones los bosques se caracterizaron por ser de tipo seco con régimen hídrico anual inferior a los 2.000 mm, temperaturas que oscilaron de 27 a  $34^{\circ}\text{C}$  y una estación seca definida de diciembre a mayo. También se colectaron muestras en la Península de Osa, Puntarenas, específicamente el bosque de los Mogos ( $8^{\circ}45'00''\text{N}$ ,  $83^{\circ}22'59''\text{O}$ ) a una altitud de 40 m y San Juan ( $8^{\circ}39'02''\text{N}$ ,  $83^{\circ}27'53''\text{O}$ ) a una altitud de 35 m; estos sitios se caracterizaron por tener una época seca muy reducida (de enero a abril), con una precipitación anual de 4.000 a 4.300 mm y temperatura anual con variación de 27 a  $33^{\circ}\text{C}$  y con una humedad relativa anual de 70 a 90 %.

Se trabajó con diez especies forestales maderables, seleccionadas por su amplio uso en la industria en Costa Rica, además de que se encuentran consideradas en los programas de conservación y

manejo sostenible de bosque natural, por lo que contar con información anatómica de alta calidad de las especies permite su correcta identificación [21]. Por especie se seleccionaron como mínimo diez individuos a partir de estudios previos desarrollados por Valverde *et al.* [22], que determinaron que la cantidad mínima de individuos necesarios para este tipo de estudios es de nueve árboles. En la tabla I se muestra la cantidad exacta colectada por especie en cada sitio, la variación entre especies se debió a facilidad de ubicación y colección de los árboles de cada especie, se utilizaron los criterios de Valverde *et al.* [21], con árboles que presentaron un diámetro superior a 30 cm con una distancia entre árboles superior a 15 m (esto con fin de aumentar la variedad de la especie en el sitio).

**Tabla I.** Especies y cantidad de muestras analizadas en el estudio para validación del protocolo fotográfico de muestras

Familia botánica	Especie	Sitio				Cubos fotografiados
		EEFH	Miramar	Mogos	Total	
Anacardiaceae	<i>Spondias mombin</i> L.	6	6	-	12	60
Bignoniaceae	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.	6	4	-	10	50
Caryocaraceae	<i>Caryocar costarricense</i> Donn. Sm.	-	-	12	12	60
Clusiaceae	<i>Symphonia globulifera</i> L.f.	8	4	-	12	60
Fabaceae	<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) S.F.Black	2	8	2	12	60
Malvaceae	<i>Pachira quinata</i> (Jacq.) W.S. Alverson	-	1	15	16	80
Meliaceae	<i>Cedrela odorata</i> L.	3	3	9	15	75
Phyllanthaceae	<i>Hieronyma alchorneoides</i> L.	-	1	9	10	50
Rutaceae	<i>Zanthoxylum ekmanii</i> (Urb.) Alain	-	3	7	10	50
Vochysiaceae	<i>Vochysia gentryi</i> Marc.-Berti	-	-	12	12	60
<b>Total</b>					121	605

## 2.2. Proceso de colecta del material

Por cada árbol evaluado se extrajo una única muestra (121 muestras en total para el estudio), cada muestra se caracterizó por tener un tamaño de 75 mm de longitud y 25 mm de diámetro, fue obtenida mediante un muestreo no destructivo que consistió en el uso de una broca de tipo cortadora de tapones en espiral, implementada en un taladro de batería de 20 v. En cada árbol a una altura de 1,3 m sobre nivel del suelo se limpió un área de 4 cm<sup>2</sup>, la cual se liberó de la corteza y se colocó la broca para perforar el fuste, la perforación se realizó con una velocidad de 1.750 RPM; posterior a que se realizara la perforación con la broca, la pieza de madera se extrajo con una pinza y se introdujo en una bolsa con una disolución acuosa de alcohol al 15 %, esto con el fin de impedir pérdida de contenido de humedad del material para el posterior procesamiento, además de evitar la formación de hongos que afectaran el color y la calidad de las muestras.

## 2.3. Procesamiento del material

Cada muestra cilíndrica se segmentó en cinco subcilindros de 13 mm de longitud, en cada cara transversal se realizó un pulido para dejarla lo más lisa posible; posteriormente, cada subcilindro

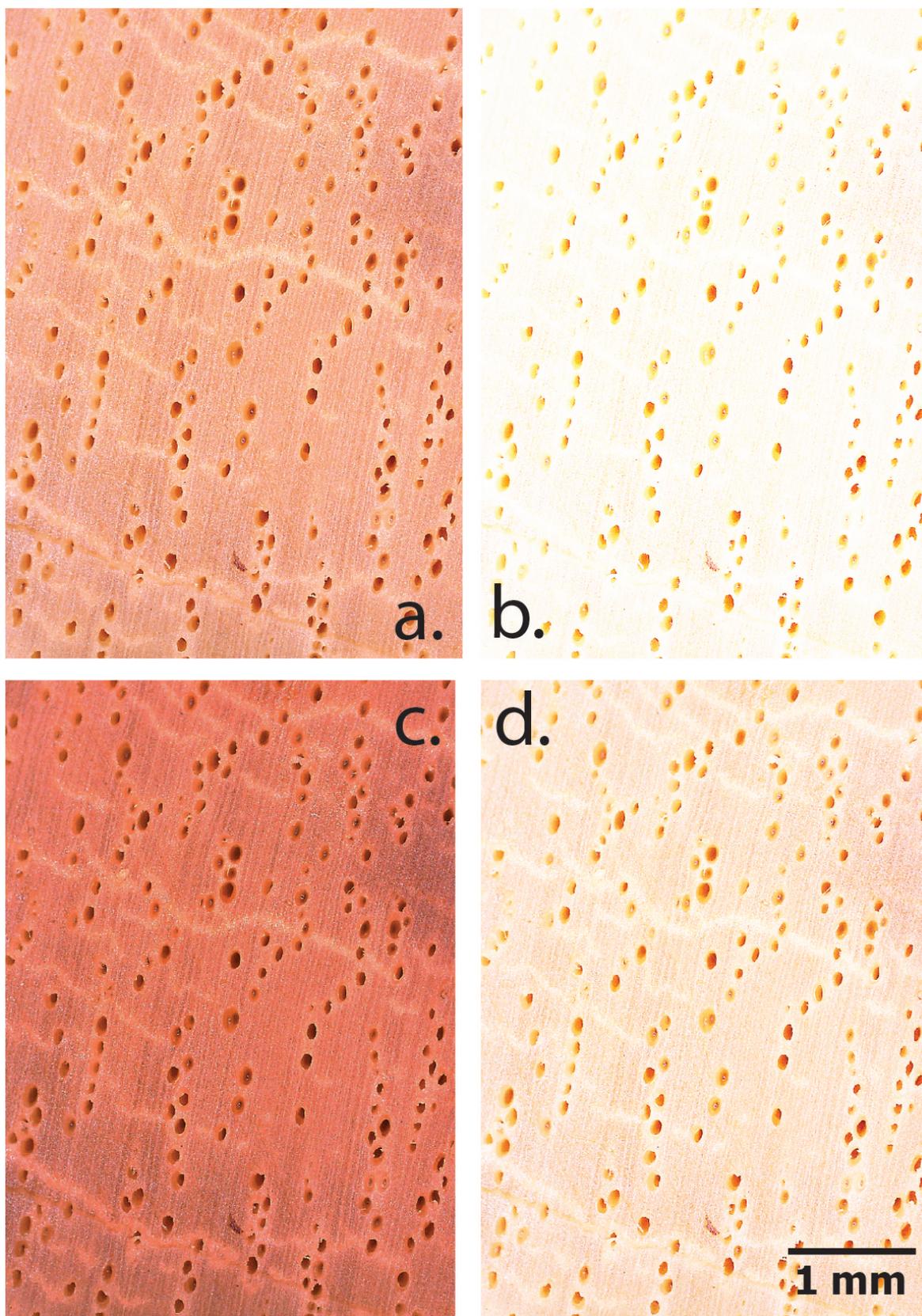
se convirtió de manera manual mediante cortes en cubos de 10 mm de cara con superficies lo más lisas posibles y libres de defectos. Seguidamente, se secaron a una temperatura de 65 °C por 72 horas acorde a trabajos previos de Valverde *et al.* [22] que mostraron que muestras de tamaños reducido deben tener un secado paulatino para evitar contracciones significativas y defectos por madera juvenil, esto con el fin de no tener contracciones drásticas de la madera al ser expuesta en poco tiempo a altas temperaturas. Posterior al secado, los cubos se rectificaron en vías de disponer una cara transversal lo más limpia posible, libre de torceduras, defectos de secado o marcas del proceso de corte, en total se obtuvieron 605 cubos de madera, el detalle de la cantidad de cubos por especie se presenta en la Tabla I.

## 2.4. Procedimiento de fotografiado

Se implementó el uso de un estereoscopio electrónico marca Celestron© con una resolución de 5 MP y un aumento de 20 X (aumento que presenta la mayoría de lupas comerciales y que permiten los celulares de gama, además de que es ampliamente usado en entrenamiento de algoritmos de identificación automática [23]); las imágenes se tomaron en la cara transversal de la madera, esto debido a que estudios previos desarrollados por Figueroa [24] determinaron que es la cara óptima para la identificación de especies tropicales mediante fotografías macroscópicas (con aumentos inferiores a 100 X), es la cara transversal. El uso de cara radial y longitudinal tiende a presentar mayores problemas en análisis macroscópico [20], por tanto el estudio no consideró ambos cortes. Se manejó con una luminosidad estándar LED para hacer que el área de fotografía fuera uniforme, la temperatura de la luz empleada fue de 4500 K. En el estudio se probaron cuatro intensidades de luminosidad en las piezas de madera que fueron: i. 25 %, en este tratamiento se utilizó la fuente de luz del estereoscopio con una intensidad de 75 lux combinada con la luz ambiente que fue de 150 lux (figura 2a) generando una luminosidad total de 225 lux; ii. 50 %, se implementó la luz LED del microscopio con una intensidad de 150 lux (luminosidad total con la ambiental de 300 lux) (figura 2b); iii. 75 %, se implementó la luz LED del microscopio a una intensidad de 225 lux (luminosidad total de 375 lux) (Figura 2c) y iv. 100 % se implementó la luminosidad en máxima capacidad de 300 lux (luminosidad total de 450 lux) (figura 2d). El control de la luminosidad se realizó con dos luxómetros marca UNI-T modelo UT382, uno de estos se utilizó únicamente para verificar que la luminosidad ambiental se mantuviera homogénea durante el estudio, mientras el segundo se utilizó para verificar que la luminosidad de cada tratamiento se mantuviera constante en el proceso de fotografiado.

## 2.5. Análisis anatómicos considerados

Cada fotografía se procesó con el programa “Image J” y se estimó la densidad y el diámetro promedio de los vasos, además de la relación vasos-fibras, para lo cual se implementó la metodología de Valverde y Arias [25] para especies arbóreas latifoliadas del trópico, la configuración del programa se realizó de manera automática con la relación de 1 mm equivalente a 240 px, una angulación de procesamiento de 90° y una constante dimensional de áreas de submuestreo de 300 x 300 px con un total de cinco subáreas de análisis ubicadas de forma aleatoria con la restricción que no se repitieran puntos de muestreo. Complementariamente se utilizó el método tradicional de observación con estereoscopio que implementó el mismo aumento y puntos de medición empleadas en la metodología fotográfica.



**Figura 2.** Muestra de la fotografía de corte transversal de *Symphonia globulifera*, empleando cuatro luminosidades

## 2.6. Medición del color

El color se evaluó posterior al secado del material, esto debido que el estándar de uso de muestras en xiloteca cuenta con material seco (contenido de humedad inferior al 30 %), por tanto la valoración del color no se realizó en condición de presecado [21], [22], se analizó tanto en la muestra física como la imagen fotografiada. Con las muestras físicas, la medición del color se realizó con un espectrofotómetro NIX Pro de cromatografía CIE estandarizado. El color se determinó entre el rango de los 400 a 700 nm con un puerto de medición de 10 mm de diámetro. Para la observación de la reflexión del componente especular (SCI modo) se incluyó en un ángulo de 10°, que es normal para la superficie de la madera (D65 / 10); y con un D65 (correspondiente a la luz del día en 6500 K). En cada muestra se midió el color en la cara transversal de la muestra y en total se recolectaron tres mediciones. En el caso de las fotografías, el color se determinó con el programa Adobe Photoshop CC2020, se implementó la herramienta a cuentagotas y por cada fotografía se analizaron 25 mediciones en áreas que no correspondieran a vasos.

El color se evaluó en formato CIELAB, el cual generó tres parámetros para explicar el color que consistieron en: L\* (luminosidad), a\* (tendencia de color de rojo a verde) y b\* (tendencia de color de amarillo a azul).

## 2.7. Diferencial del color

El diferencial de color ( $\Delta E^*$ ) se definió como la variación neta del color entre dos escenarios, según lo establecido por la norma ASTM D 2244 [26], cuya fórmula es detallada en la ecuación 1. El  $\Delta E^*$  se implementó para encontrar diferencias en el color entre las fotografías y las muestras físicas y con ello identificar el grado de representatividad del color utilizando las categorías de Cui *et al.* [27], que establecen cinco niveles de cambio de color percibido por el ojo humano: si  $0 < \Delta E^* > 0,5$ , el cambio de color no es percibido por el ojo humano; si  $1,5 < \Delta E^* > 3$ , el cambio de color apenas se percibe; si  $3 < \Delta E^* > 6$ , se percibe el cambio; si  $6 < \Delta E^* > 12$ , el cambio de color es bastante notable para el ojo humano, y finalmente si  $\Delta E^* > 12$ , hay un cambio total de color.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

Donde:  $\Delta E^*$  es el diferencial del color;  $\Delta L^*$  corresponde a la diferencia entre la luminosidad estimada a partir de la fotografía y la luminosidad medida en la muestra física;  $\Delta a^*$  corresponde a la diferencia entre el valor a\* promedio estimado a partir de la fotografía y la medida en la muestra física;  $\Delta b^*$  es b\* corresponde a la diferencia entre el valor b\* promedio estimado a partir de la fotografía y la medida en la muestra física.

## 2.8. Diferencial chroma

Se evaluó el diferencial chroma ( $\Delta C^*$ ), que se definió como la variación neta de la saturación del color (a\* y b\*) entre dos escenarios, según lo establecido por la norma ASTM D 2244 [26], cuya fórmula es detallada en la ecuación (2). Este parámetro permite estimar si hay pérdida o ganancia de color, indiferente de la luminosidad.

$$\Delta C^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

Donde:  $\Delta C^*$  es el diferencial del chroma;  $\Delta a^*$  es  $a^*$  del protocolo de fotografía analizado -  $a^*$  en la muestra física;  $\Delta b^*$  es  $b^*$  del protocolo de fotografía analizado -  $b^*$  en la muestra física.

## 2.9. Análisis estadístico

Primeramente se generó una caracterización colorimétrica de las muestras físicas con los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  con el fin de identificar variaciones de color entre la albura (definida como la parte joven de la madera, correspondiente a los últimos anillos de crecimiento del árbol) y duramen (definido como la parte del tronco que forma parte del llamado xilema, leño, o tejido leñoso) de cada muestra, y a su vez establecer las diferencias estadísticas, para lo cual se realizó un análisis de varianza (ANDEVA de una vía), una validación de los supuestos y en caso de determinar un efecto significativo se aplicó una prueba de Tukey para identificar las diferencias.

Posteriormente, se analizó la diferencia entre los valores de color y la saturación del color de la muestra física con respecto a los distintos protocolos de fotografía, con el fin de identificar los valores que generaron menor diferencial del color, para lo cual se aplicó nuevamente un ANDEVA con las condiciones anteriormente descritas.

Todos los análisis se realizaron con una significancia de 0,05 y se utilizó el programa OriginPro 2020.

## 3. Resultados

### 3.1. Caracterización inicial de la madera

Se encontraron distintos patrones entre la albura y el duramen de las diez especies en estudio (tabla II), para *T. rosea* no se encontraron diferencias significativas entre albura y duramen, mostrando una coloración rojizo-amarillenta con luminosidad baja ( $L^*$  de 40,3;  $a^*$  de 8,1 y  $b^*$  de 12,0); las restantes nueve especies sí mostraron variaciones entre la albura y el duramen con los tres parámetros de color. Con el parámetro de luminosidad ( $L^*$ ), únicamente *V. gentryi* no mostró diferencias en la albura y el duramen, con un valor promedio de 49,01, las restantes nueve especies sí mostraron diferenciación entre ambas secciones, encontrándose que el duramen mostró un mayor oscurecimiento que la albura, que varió del 5 al 20 %. Con respecto al parámetro  $a^*$  que evaluó tendencia de rojo a verde, se encontraron tres tendencias, con *C. costarricense*, *T. rosea*, *P. quinata* y *V. gentryi* no se dieron diferencias significativas entre albura y duramen, encontrándose tendencias de coloración a ser rojizas, por su parte con *S. mombin* y *H. alchorneoides* se dio un decrecimiento de  $a^*$  en el duramen de un 10 a 15 % con una reducción en la escala del color rojo, finalmente la tercera agrupación se conformó por *S. globulifera*, *S. parahyba*, *C. odorata* y *Z. ekmanii* en las que se dio un incremento en la rojosidad de la madera en el duramen de un 5 al 20 %.

Con el parámetro  $b^*$ , la tendencia de la mayoría de las especies fue la disminución de  $b^*$  en el duramen de un 6 a 20 %, siendo las especies *S. mombin*, *C. costarricense*, *S. parahyba*, *P. quinata* y *C. odorata* las que mostraron dicho comportamiento y manteniendo una coloración levemente amarillenta. Mientras las especies *S. globulifera*, *H. alchorneoides* y *Z. ekmanii* no mostraron diferencias entre el color de la albura y el duramen, presentando valores promedio de  $b^*$  de 12,4.

Finalmente, con la especie *V. gentryi* se incrementó el amarillamiento del duramen en un 9 %.

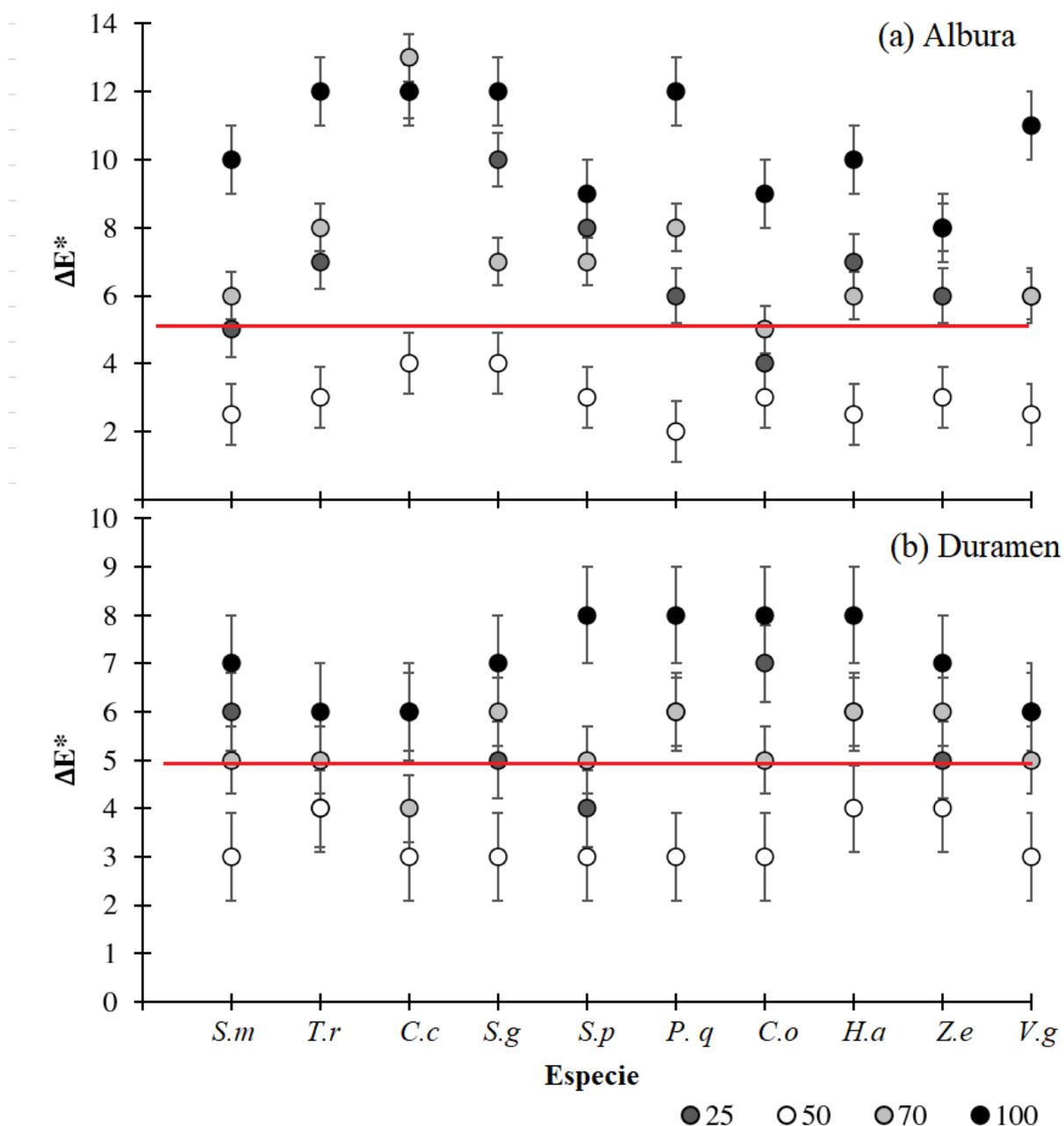
**Tabla II.** Valores de color L\*, a\* y b\* obtenidos en forma directa en la cara transversal de la madera seca de diez especies arbóreas en Costa Rica

Especie	Color Albura			Color Duramen		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
<i>S. mombin</i>	58,4 <sup>A</sup> (8,9)	7,6 <sup>A</sup> (1,3)	13,7 <sup>A</sup> (3,5)	54,0 <sup>B</sup> (3,8)	5,0 <sup>B</sup> (2,2)	10,8 <sup>A</sup> (1,8)
<i>T. rosea</i>	40,6 <sup>A</sup> (6,2)	7,9 <sup>A</sup> (0,9)	12,1 <sup>A</sup> (4,2)	39,2 <sup>A</sup> (2,5)	8,2 <sup>A</sup> (3,1)	11,9 <sup>B</sup> (1,5)
<i>C. costarricense</i>	43,7 <sup>A</sup> (6,6)	13,4 <sup>A</sup> (1,6)	16,3 <sup>A</sup> (2,7)	37,0 <sup>B</sup> (4,0)	11,8 <sup>A</sup> (1,9)	12,6 <sup>A</sup> (1,6)
<i>S. globulifera</i>	59,0 <sup>A</sup> (5,2)	5,8 <sup>A</sup> (1,9)	13,5 <sup>A</sup> (2,5)	48,0 <sup>B</sup> (3,3)	7,2 <sup>B</sup> (1,8)	11,6 <sup>B</sup> (1,7)
<i>S. parahyba</i>	66,2 <sup>A</sup> (4,4)	8,4 <sup>A</sup> (1,3)	17,6 <sup>A</sup> (2,0)	54,2 <sup>B</sup> (2,8)	11,5 <sup>B</sup> (2,1)	13,9 <sup>A</sup> (1,4)
<i>P. quinata</i>	43,4 <sup>A</sup> (3,9)	13,5 <sup>A</sup> (2,1)	18,8 <sup>A</sup> (1,9)	34,3 <sup>B</sup> (3,5)	12,4 <sup>A</sup> (2,0)	11,6 <sup>A</sup> (1,7)
<i>C. odorata</i>	53,9 <sup>A</sup> (3,5)	11,9 <sup>A</sup> (1,5)	17,2 <sup>A</sup> (2,1)	46,9 <sup>B</sup> (2,7)	14,9 <sup>B</sup> (2,2)	14,2 <sup>A</sup> (2,0)
<i>H. alchorneoides</i>	57,8 <sup>A</sup> (2,9)	16,4 <sup>A</sup> (1,5)	13,4 <sup>A</sup> (1,5)	45,4 <sup>B</sup> (3,6)	12,3 <sup>B</sup> (2,5)	9,2 <sup>B</sup> (2,2)
<i>Z. ekmanii</i>	42,2 <sup>A</sup> (3,3)	-2,4 <sup>A</sup> (0,9)	4,9 <sup>A</sup> (1,7)	30,9 <sup>B</sup> (3,8)	0,2 <sup>B</sup> (2,2)	5,2 <sup>B</sup> (2,3)
<i>V. gentryi</i>	49,1 <sup>A</sup> (5,5)	9,7 <sup>A</sup> (1,1)	11,3 <sup>A</sup> (2,0)	49,2 <sup>A</sup> (3,6)	8,4 <sup>A</sup> (1,8)	16,7 <sup>A</sup> (2,5)

**Nota:** Valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar. Letras diferentes muestran diferencias con un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

En la figura 3 se presenta el diferencial del color  $\Delta E^*$ , obtenido entre los colores tomados a las muestras físicas, y el color generado por cada protocolo de fotografiados aplicado tanto a la parte de albura como de duramen, a partir de ello se obtuvieron las siguientes características del estudio: i. todas las especies mostraron un patrón de comportamiento similar, con valores de  $\Delta E^*$  similares por tratamiento (con una variación inferior al 18 %); ii. el patrón también se mantuvo entre la albura y el duramen de las muestras teniendo comportamientos similares de los dos segmentos de la madera; iii. se determinó que la luminosidad al 50 % fue la que presentó valores  $\Delta E^*$  inferiores a 6, considerados como cambios percibidos por el ojo humano, este patrón fue constante con todas las especies; iv. el tratamiento de luminosidad al 100 % fue el tratamiento menos funcional con valores de  $\Delta E^*$  superiores a 8 en albura y a 6 en duramen, lo cual se considera como cambios bastante notables del color por el ojo humano; v. los tratamientos de luminosidad al 25 y 75 % mostraron variaciones en especie y albura y duramen, encontrando de manera general percepción de cambio notable del color de la madera y siendo tratamientos menos funcionales que la luminosidad al 50 %.

Al analizar el diferencial de saturación del color ( $\Delta C^*$ ), se determinó un mismo patrón para todas las especies, tanto en albura como en duramen (figura 4). Conforme la luminosidad se incrementó, el diferencial disminuyó, encontrándose que la luminosidad al 25 % generó una saturación muy alta del color con valores de  $\Delta C^*$  superiores a 10, mientras la saturación al 75 y 100 % fue muy baja (inferior a 5), lo que incidió en que la saturación de color fuese menor y los colores parecieran grisáceos; únicamente la luminosidad al 50 % presentó un mejor comportamiento en cuanto  $\Delta C^*$ , obteniendo valores entre 5 y 7, considerados como el nivel de saturación óptimo del color fotográfico con respecto a la muestras físicas: valores superiores a 7 denotan una alta saturación del color, mientras valores inferiores a 5 denotan poca saturación de colores y por ende una coloración muy tenue.

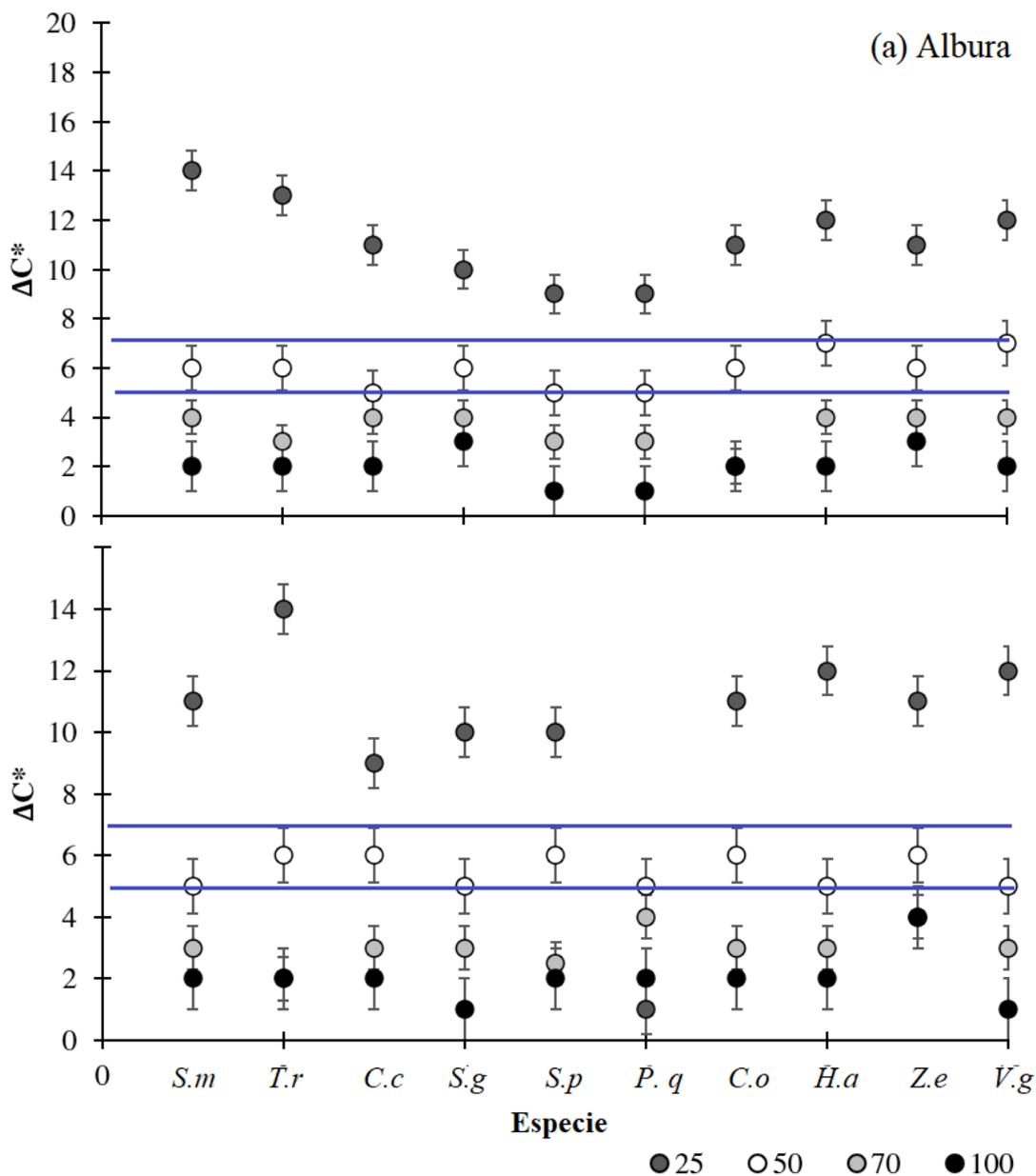


**Nota:** Las líneas rojas indican los valores máximos de aceptabilidad de cambio de color.

**Figura 3.** Valores de diferencial de color ( $\Delta E^*$ ) o según luminosidad en las secciones de albura y duramen en madera de diez especies arbóreas

### 3.2. Variación anatómica

En la tabla III se presenta la variación de la densidad y el diámetro promedio de los vasos con los cuatro tratamientos implementados. Con respecto a la densidad de vasos, se estimó un valor de 6 a 11 vasos por  $\text{mm}^2$ , no encontrándose diferencias significativas en la luminosidad de 25 a 50 % de las diez especies, siendo valores estadísticamente similares; aspecto que varió con la luminosidad al 75 %, la cual únicamente en las especies *S. mombin*, *P. quinata* y *H. alchorneoides* no mostró



**Nota:** Las líneas azules indican los rangos de aceptabilidad de cromas para las imágenes.

**Figura 4.** Valores de diferencial de chroma ( $\Delta C^*$ ) en función a la luminosidad de las imágenes de albura y duramen de diez especies arbóreas

diferencias con los tratamientos de luminosidad al 25 y 50 %, caso opuesto con el tratamiento de luminosidad al 100 %, que mostró diferencias significativas con los demás tratamientos en las diez especies y subestimando hasta en un 50 % la densidad de vasos, esto con respecto a la cantidad de vasos identificados con los métodos tradicionales con estereoscopio, obteniendo que los más exactos son al 25 y 50 %. Con respecto al diámetro de vasos, se determinó una variación de 95 a 185  $\mu\text{m}$ , no encontrándose diferencias significativas en los tratamientos de luminosidad de 25 y 50 % y mostrando valores significativamente similares a los métodos tradicionales con estereoscopio, pero

con diferencias entre los tratamientos de 75 y 100 %, que mostraron valores considerablemente inferiores (subestimaciones) del diámetro.

**Tabla III.** Densidad de vasos y diámetro de vasos de diez especies arbóreas de Costa Rica generados por cuatro niveles de luminosidad en fotografía macroscópica

Especie	Densidad de vasos (vasos*mm <sup>-2</sup> )					Diámetro vasos (µm)				
	Tradicional	25 %	50 %	75 %	100 %	Tradicional	25 %	50 %	75 %	100 %
<i>S. mombin</i>	10 <sup>A</sup> (2)	11 <sup>A</sup> (2)	10 <sup>A</sup> (3)	11 <sup>A</sup> (2)	8 <sup>B</sup> (2)	103 <sup>A</sup> (24)	113 <sup>A</sup> (23)	102 <sup>A</sup> (23)	78 <sup>B</sup> (23)	57 <sup>B</sup> (38)
<i>T. rosea</i>	11 <sup>A</sup> (2)	12 <sup>A</sup> (2)	12 <sup>A</sup> (2)	9 <sup>B</sup> (3)	6 <sup>B</sup> (3)	100 <sup>A</sup> (20)	115 <sup>A</sup> (21)	95 <sup>A</sup> (22)	59 <sup>B</sup> (35)	50 <sup>B</sup> (42)
<i>C. costarricense</i>	9 <sup>A</sup> (3)	9 <sup>A</sup> (3)	9 <sup>A</sup> (2)	7 <sup>B</sup> (2)	5 <sup>B</sup> (3)	105 <sup>A</sup> (23)	126 <sup>A</sup> (26)	109 <sup>A</sup> (28)	75 <sup>B</sup> (38)	58 <sup>C</sup> (39)
<i>S. globulifera</i>	6 <sup>A</sup> (2)	6 <sup>A</sup> (2)	5 <sup>A</sup> (3)	4 <sup>B</sup> (3)	3 <sup>B</sup> (2)	180 <sup>A</sup> (27)	189 <sup>A</sup> (29)	178 <sup>A</sup> (30)	108 <sup>B</sup> (36)	95 <sup>B</sup> (39)
<i>S. parahyba</i>	7 <sup>A</sup> (3)	6 <sup>A</sup> (3)	7 <sup>A</sup> (2)	5 <sup>B</sup> (3)	4 <sup>B</sup> (3)	228 <sup>A</sup> (31)	237 <sup>A</sup> (33)	228 <sup>A</sup> (26)	201 <sup>B</sup> (37)	195 <sup>B</sup> (44)
<i>P. quinata</i>	5 <sup>A</sup> (2)	5 <sup>A</sup> (2)	5 <sup>A</sup> (2)	4 <sup>A</sup> (3)	3 <sup>B</sup> (2)	130 <sup>A</sup> (20)	135 <sup>A</sup> (26)	125 <sup>A</sup> (31)	98 <sup>B</sup> (36)	81 <sup>B</sup> (39)
<i>C. odorata</i>	7 <sup>A</sup> (3)	6 <sup>A</sup> (3)	6 <sup>A</sup> (3)	4 <sup>B</sup> (2)	3 <sup>B</sup> (3)	229 <sup>A</sup> (20)	239 <sup>A</sup> (24)	224 <sup>A</sup> (28)	195 <sup>B</sup> (39)	161 <sup>B</sup> (45)
<i>H. alchorneoides</i>	4 <sup>A</sup> (2)	4 <sup>A</sup> (2)	4 <sup>A</sup> (3)	3 <sup>A</sup> (3)	2 <sup>B</sup> (2)	123 <sup>A</sup> (30)	135 <sup>A</sup> (36)	122 <sup>A</sup> (22)	96 <sup>B</sup> (37)	76 <sup>B</sup> (41)
<i>Z. ekmanii</i>	8 <sup>A</sup> (3)	8 <sup>A</sup> (3)	8 <sup>A</sup> (2)	6 <sup>B</sup> (3)	4 <sup>B</sup> (2)	109 <sup>A</sup> (23)	108 <sup>A</sup> (27)	98 <sup>A</sup> (32)	68 <sup>B</sup> (38)	58 <sup>B</sup> (42)
<i>V. gentryi</i>	11 <sup>A</sup> (3)	11 <sup>A</sup> (3)	12 <sup>A</sup> (3)	9 <sup>B</sup> (3)	5 <sup>B</sup> (3)	2186 <sup>A</sup> (25)	204 <sup>A</sup> (28)	185 <sup>A</sup> (38)	157 <sup>B</sup> (44)	138 <sup>B</sup> (40)

**Nota:** Valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar. Letras diferentes muestran diferencias con un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .

## 4. Discusión

### 4.1. Diferenciación entre albura y duramen y su efecto en la fotografía

La diferenciación en la colorimetría entre la albura y el duramen de la madera se debe a que el primero cuenta con una acumulación de ceras, taninos y enzimas que se van acumulando debido a los procesos fisiológicos del árbol. Ayala *et al.* [13] mencionan que xilema que forma parte del duramen se caracteriza por tener una actividad fisiológica limitada y es considerado un reservorio de agua que es utilizado cuando el individuo entra a un estrés por déficit hídrico, esto permite acumular residuos y nutrientes que afectan significativamente el color de la madera; aspectos que según Marcelo-Peña *et al.* [17] se debe a compuestos orgánicos como: ceras, taninos y enzimas que tiende a oxidarse y reducirse al momento del secado la madera, lo que produce un cambio en la coloración en la madera. En el caso de la albura que forma parte del floema y las partes más activas del xilema, la dinámica fisiológica es mayor por el transporte de agua y nutrientes, con lo que la reserva de agua es menor y por tanto la acumulación de extraíbles, de ahí que se denote la madera con una mayor luminosidad y menores valores de  $a^*$  y  $b^*$  [12].

En el proceso de creación de la digitalización de material se deben tener claras las condiciones de fotografía y cómo la claridad de la albura y el duramen puede afectar la calidad de la imagen, Fioravanti *et al.* [6] mencionan que conforme mayor sea el conocimiento de la variación de color de una especie y cómo este debe ser considerado en la digitalización de material, la calidad de las imágenes será mayor. Ma y Min [18] destacan, para especies tropicales, la necesidad de conocer los rangos de luminosidad en los que se debe ajustar el microscopio en la secciones de albura y duramen, ya que pueden variar dependiendo las características de la especie [19].

## 4.2. Efecto del protocolo en la colorimetría de las muestras

En el proceso de virtualización de xilotecas, el color es una variable fundamental que debe ser controlada y manejada de forma protocolaria con el fin de mantener la reproducibilidad y representatividad de la imagen con respecto a la muestra física. Giachi *et al.* [9] consideraron fundamental la creación de estándares que homogenicen las condiciones de fotografiado y se minimice el sesgo por cambios de luminosidad o de equipo utilizado, ya que cambios no reportados del proceso pueden generar pérdida de precisión al momento de realizar análisis anatómicos o caracterización de las imágenes por parte de los expertos.

En el estudio se determinó que la potencialidad de reproducir el material a nivel macroscópico con una representatividad a la muestra física es posible, siempre y cuando las condiciones ambientales sean homogéneas y se realicen pruebas de calidad de imágenes. Bueno *et al.* [20] destacan que disponer de sistemas de fotografiado validados que sean reproducibles a nivel de región (por ejemplo el trópico), permite mejorar el desarrollo de investigaciones a nivel internacional y comparar y analizar poblaciones o especies a nivel macro, permitiendo tener un entendimiento más global de su comportamiento y desarrollo.

## 4.3. Ventajas y desventajas del protocolo propuesto

La metodología propuesta de luminosidad al 50 % mantiene valores de color y calidad de imagen suficientes para ser comparados directamente con las muestras en físico, aspecto que mantiene exactitud y precisión en comparación con la muestra real; Valverde *et al.* [22] destacan como fundamental para el proceso de digitalización de colecciones de xilotecas mantener la representatividad de las propiedades del material físico. En la actualidad hay una carencia de protocolos estandarizados para la representación de muestras, cada colección y organización ha propuesto protocolos que en muchos casos carecen de una metodología clara o validada [28], por tanto la propuesta actual permite mostrar una opción con una validez científica. Estudios previos desarrollados por Figueroa *et al.* [24] mostraron que los protocolos tradicionales se han enfocado en el escaneo de muestras con un control mínimo de la colorimetría y del efecto de luminosidad en las visualización de vasos y fibras en la cara transversal de la madera, por lo que la calidad de imágenes en mucho casos es difícil de comparar con otras xilotecas o colecciones académicas de fotografías.

Otra de las ventajas que muestra el protocolo es que se ha desarrollado por completo para especies tropicales, aspecto que es interesante ya que la diversidad colorimétrica y anatómica de las especies es mayor que en las regiones templadas, por tanto, estandarizar un procedimiento permitiría generar colecciones homogéneas que sean funcionales para procesos de aprendizaje con inteligencia artificial y creación de claves tradicionales de identificación [21]. Pero también presenta limitaciones; primeramente, cuenta con un aumento específico de fotografiado de imagen, en este caso de 20 X, el cual debe ser nuevamente calibrado si se implementan otros aumentos, igualmente debe ser analizado con más especies forestales y es recomendable un nuevo estudio en el que se analicen especies comerciales ampliamente estudiadas en regiones tropicales, aspecto que permitiría hacer comparaciones con estudios previos. Además, sería relevante su realización con distintas marcas de instrumentación y condiciones de uso, con fin de afinar la metodología, la cual en primera instancia puede ser considerada como una línea base para la homogenización fotográfica bajo estándares en común [28].

## 5. Conclusiones

Se determinó que es posible generar un protocolo de ajuste fotográfico macroscópico en que la colorimetría de la imagen sea representativa a la muestra física. Los resultados no mostraron un patrón claro para las diez especies entre la albura y el duramen, encontrándose variaciones en los valores de color con énfasis en la luminosidad. Con respecto a la selección del mejor protocolo, se determinó para las diez especies tanto en albura como duramen que el uso de una luminosidad al 50 % (correspondiente a 300 lux) es la óptima para tener coloraciones similares a la muestra física. Usar mayores luminosidades genera un aclaramiento de la muestra, lo cual se evidencia con mayor cambio del  $\Delta E^*$  y disminución del  $\Delta C^*$ , lo cual infiere que la representación no sea la mejor y en los análisis anatómicos se tienda a una subestimación de la densidad y el diámetro de los vasos. En cambio, el uso de una luminosidad inferior al 50 % generó un cambio susceptible del color, con un incremento de la saturación del color  $\Delta C^*$ , lo cual no repercutió en la parte del análisis anatómico y no mostró diferencias significativas con el tratamiento de luminosidad al 50 %.

Se debe considerar la propuesta metodológica como una línea base para el proceso de homogenización y estandarización de imágenes macroscópicas en especies tropicales, aspecto que permitiría en el futuro hacer estudios de mayor impacto al comparar especies desarrolladas en distintas regiones, o evaluar procesos de aprendizaje con inteligencias artificiales, igualmente se recomienda continuar con esta línea de estudios comparando especies comerciales ampliamente estudiadas y equipos con distintas características bajo las condiciones óptimas identificadas.

## 6. Agradecimientos

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC por el financiamiento al proyecto “Implementación de tecnologías y aplicaciones de bajo costo para el estudio de la fisiología de especies arbóreas del trópico mesoamericano como herramienta para su conservación” Código 1401094

## Referencias

- [1] K. Brownson, E. P. Anderson, S. Ferreira, S. Wenger, L. Fowler, and L. German, “Governance of payments for ecosystem services influences social and environmental outcomes in Costa Rica”, *Ecol. Econ.*, vol. 174, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106659> ↑2
- [2] M. T. van Wijk, M. Williams, and G. R. Shaver, “Tight coupling between leaf area index and foliage N content in arctic plant communities”, *Oecologia*, vol. 142, no. 3, pp. 421-427, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1733-x> ↑2
- [3] I. Shaver et al., “Coupled social and ecological outcomes of agricultural intensification in Costa Rica and the future of biodiversity conservation in tropical agricultural regions”, *Glob. Environ. Chang.*, vol. 32, pp. 74-86, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.006> ↑2
- [4] I. Hovinga, L. Hein, M. Vega-Araya, and A. Languillaume, “Spatial quantification to examine the effectiveness of payments for ecosystem services: A case study of Costa Rica’s Pago de Servicios Ambientales”, *Ecol. Indic.*, vol. 108, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105766> ↑2
- [5] J. Saporiti Machado, F. Pereira, and T. Quilhó, “Assessment of old timber members: Importance of wood species identification and direct tensile test information”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 207, pp. 651-660, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.168> ↑2

- [6] M. Fioravanti, G. Di Giulio, and G. Signorini, “A non-invasive approach to identifying wood species in historical musical instruments”, *J. Cult. Herit.*, vol. 27, pp. S70-S77, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.05.012> ↑2, 13
- [7] V. de Micco and G. Aronne, “Seasonal dimorphism in wood anatomy of the Mediterranean *Cistus incanus* L. subsp. *incanus*”, *Trees - Struct. Funct.*, vol. 23, no. 5, pp. 981-989, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0340-1> ↑2
- [8] K. Kobayashi, S.-W. Hwang, T. Okochi, W.-H. Lee, and J. Sugiyama, “Non-destructive method for wood identification using conventional X-ray computed tomography data”, *J. Cult. Herit.*, vol. 38, pp. 88-93, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.02.001> ↑2, 3
- [9] G. Giachi, M. C. Guidotti, S. Lazzeri, L. Sozzi, and N. Macchioni, “Wood identification of the headrests from the collection of the Egyptian Museum in Florence”, *J. Archaeol. Sci. Reports*, vol. 9, pp. 340-346, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.08.027> ↑2, 14
- [10] A. Glabasnia, and T. Hofmann, “Sensory-directed identification of taste-active ellagitannins in American (*Quercus alba* L.) and European oak wood (*Quercus robur* L.) and quantitative analysis in bourbon whiskey and oak-matured red wines”, *J. Agric. Food Chem.*, vol. 54, no. 9, pp. 3380-3390, 2006. <https://doi.org/10.1021/jf052617b> ↑2
- [11] F. Reinig et al., “Introducing anatomical techniques to subfossil wood”, *Dendrochronologia*, vol. 52, pp. 146-151, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.10.005> ↑3
- [12] X. Tang, G. Zhao, and L. Ping, “Wood identification with PCR targeting noncoding chloroplast DNA”, *Plant Mol. Biol.*, vol. 77, no. 6, pp. 609-617, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11103-011-9837-2> ↑3, 13
- [13] D. A. Ayala-Usma, R. E. Lozano-Gutiérrez, and C. González Arango, “Wood anatomy of two species of the genus *Chrysochlamys* (Clusiaceae: Clusioideae: Clusieae) from the northern Andes of Colombia”, *Heliyon*, vol. 5, no. 7, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02078> ↑3, 13
- [14] I. Malik, Ł. Pawlik, A. Ślęzak, and M. Wistuba, “A study of the wood anatomy of *Picea abies* roots and their role in biomechanical weathering of rock cracks”, *Catena*, vol. 173, pp. 264-275, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.018> ↑3
- [15] C. P. Pérez-Olvera y R. Dávalos-Sotelo, “Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México”, *Madera y Bosques*, vol. 14, no. 3, pp. 43-80, 2008. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1431206> ↑3
- [16] V. De Micco, G. Aronne, and P. Baas, “Wood anatomy and hydraulic architecture of stems and twigs of some Mediterranean trees and shrubs along a mesic-xeric gradient”, *Trees - Struct. Funct.*, vol. 22, no. 5, pp. 643-655, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0222-y> ↑3
- [17] J. L. Marcelo-Peña, L. Santini, and M. Tomazello Filho, “Wood anatomy and growth rate of seasonally dry tropical forest trees in the Marañón River Valley, northern Peru”, *Dendrochronologia*, vol. 55, pp. 135-145, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.008> ↑3, 13
- [18] F. Ma, and A. Huang, “Rapid identification and quantification three chicken-wing woods of *Millettia leucantha*, *Millettia laurentii* and *Cassia siamea* by FT-IR and 2DCOS-IR”, *J. Mol. Struct.*, vol. 1166, pp. 164- 168, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.04.037> ↑3, 13
- [19] A. Pacheco, J. J. Camarero, M. Pompa-García, G. Battipaglia, J. Voltas, and M. Carrer, “Growth, wood anatomy and stable isotopes show species-specific couplings in three Mexican conifers inhabiting drought-prone areas”, *Sci. Total Environ.*, vol. 698, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134055> ↑3, 13
- [20] I. G. Andrade Bueno et al., “Wood anatomy of field grown eucalypt genotypes exhibiting differential dieback and water deficit tolerance”, *Curr. Plant Biol.*, vol. 22, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100136> ↑6, 14
- [21] J. C. Valverde, D. Arias, E. Mata, G. Figueroa y N. Zamora. “Determinación de las condiciones fotográficas óptimas para la caracterización anatómica de diez especies maderables de Costa Rica“ *Rev. Cubana Cien. For.* vol. 8, no. 3, pp. 439-455, 2020. <http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/613> ↑4, 5, 8, 14
- [22] J. C. Valverde et al., “Identificación de patrones de reflectancia espectral y colorimétricos en madera seca de *Peltogyne purpurea* Pittier“ *Rev. Cubana Cien. For.* vol. 8, no. 2, pp. 262-281, 2020. ↑5, 6, 8, 14
- [23] G. Figueroa, E. Mata, J. C. Valverde, and D. Arias. “Automated image-based identification of forest species: Challenges and opportunities for 21st century xylotheques“, *IWOBI*, vol. 1, 2018. <https://doi.org/10.1109/IWOBI.2018.8464206> ↑6
- [24] G. Figueroa, E. Mata, J. C. Valverde, and D. Arias. “Evaluating the significance of cutting planes of wood samples

- when training CNNs for forest species identification“, *CONCAPAN XXXVIII*, vol. 1, 2018. <https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2018.8596406> ↑6, 14
- [25] J. C. Valverde, and D. Arias. “Variation of physiological parameters in juvenile treetops of *Eucalyptus tereticornis* from a three-dimensional perspective“. *Esp. Rev. Multi. Inv*, vol. 2, no. 23, 2018. <https://doi.org/10.31876/re.v2i23.399> ↑6
- [26] ASTM. D2244 “Standard Practice for Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates“, *ASTM International*, vol. 1, 2012. ↑8
- [27] W. Cui, P. Kamdem, and T. Rypstra. “Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy (Drift) and color changes of artificial weathered wood“, *Wood Fiber Sci*, vol. 36, no. 3, pp. 291-301, 2004. ↑8
- [28] G. Figueroa, E. Mata, J. C. Valverde, and D. Arias. “Using deep convolutional networks for species identification of xylotheque samples“, *IWOBI*, vol. 1, 2018. ↑14

---

## Juan Carlos Valverde

Ingeniero Forestal, Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de la Producción, Candidato a Doctor en Ciencias Forestales en la Universidad de Concepción (Chile). Ha desarrollado investigaciones enfocadas a ecofisiología, bioenergía y optimización de manejo de recursos naturales  
Correo electrónico: juvalverde@udecb.cl

---

## Dagoberto Arias

Ingeniero Forestal, Doctor en Ciencias Forestales, especialista en sistemas de optimización de cultivos y manejo silvicultural. Actualmente es profesor de la Escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica, impartiendo cursos de grado y postgrado.  
Correo electrónico: darias@tec.ac.cr

---

## Geovanni Figueroa

Licenciado en Matemáticas, Doctor en Ingeniería en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desarrolla investigaciones con especies arbóreas e insectos, además de impartición de clases en el área de Matemáticas.  
Correo electrónico: gfigueroa@tec.ac.cr

---

## Erick Mata

Ingeniero en Computación, Doctor en Ciencias de la Computación, docente e investigador con aplicación de Machine Learning y Deep Learning en desarrollo de sistemas automáticos de identificación de especies aplicado a hojas y madera.  
Correo electrónico: emata@tec.ac.cr

---

## Nelson Zamora

Ingeniero Forestal, especialista en identificación taxonómica de especies arbóreas tropicales. Ha desarrollado importantes aportes en la identificación y clasificación de especies arbóreas en Costa Rica. Cuenta con múltiples artículos y libros enfocados en taxonomía arbórea.  
Correo electrónico: nzamora@tec.ac.cr

# Inclusion of Micropiles as Load Recovery Elements in Foundations: Literature Review

*Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento*

Wendy M. Castellanos Guerrero \*<sup>1</sup>, Edgar Rodríguez Rincón <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Militar Nueva Granada (Cajicá, Colombia)  
correspondence e-mail: d7303309@unimilitar.edu.co

Recibido: 13/09/2021. Modificado: 23/09/2021. Aceptado: 04/10/2021.

## Abstract

**Context:** Micropiles are used as reinforcing or underpinning elements, a function that has been tested and analyzed by different authors. In Colombia, the use of this technique is limited to the geotechnics expert's own concepts, which consists of empirical knowledge and successful experiences. Consequently, it is necessary to compile key variables and analytical and numerical methodologies for a better understanding of this technique.

**Method:** This document presents a state of the art supported by articles and research aimed at analyzing and evaluating the behavior of micropiles as load capacity recovery elements in groups of piles with defects.

**Results:** The findings identified in the consulted documents are synthesized as a theoretical support that will become a starting point for future research in this field of geotechnical engineering.

**Conclusions:** It is possible to evidence that micropiles have a positive influence on the load recovery of existing foundations, thus demonstrating the importance of conducting field tests and analyses directly in Colombia, considering the specific strata of soils found in the country.

**Keywords:** settlement, load capacity, axial stress, micropiles

**Language:** Spanish

Open access



Cite as: Castellanos Guerrero, W. M., Rodríguez Rincón, E. "Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento.". *Ing.*, vol. 27, no. 2, 2022. e16984.  
<https://doi.org/10.14483/23448393.16984>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## Resumen

**Contexto:** Los micropilotes son utilizados como elementos de refuerzo del suelo o de recalce, dicha función es comprobada y analizada por diferentes autores. En Colombia el uso de esta técnica está limitado a conceptos propios del geotecnista que involucran conocimientos empíricos y experiencias exitosas. En consecuencia, es necesaria la compilación de variables clave y metodologías analíticas y numéricas para la mejor comprensión de esta técnica.

**Método:** En este documento se presenta un estado del arte sustentado en artículos e investigaciones que tienen como objeto el análisis y la evaluación del comportamiento de los micropilotes como elementos recuperadores de capacidad de carga en grupos de pilotes que presentan defectos.

**Resultados:** Los hallazgos identificados en los documentos consultados logran ser sintetizados como un soporte teórico que se convierte en un punto de partida para futuras investigaciones en este campo de la ingeniería geotécnica.

**Conclusiones:** Se logra evidenciar que los micropilotes tienen una influencia positiva en la recuperación de carga de fundaciones existentes, demostrando la importancia de efectuar ensayos y análisis de campo directamente en Colombia, considerando los estratos de suelos específicos que se encuentran en el país.

**Palabras clave:** asentamiento, capacidad de carga, esfuerzos axiales, micropilotes

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

En el análisis de los micropilotes como elementos recuperadores de carga es de crucial importancia establecer características y metodologías para la construcción de los mismos, además de entender su comportamiento en los diferentes escenarios en los cuales pueden ser ejecutados. Bajo la premisa anterior se crea un comparativo de cada uno de los aspectos más relevantes que se plasman en las publicaciones objeto de estudio. Los micropilotes poseen un diámetro estándar de entre 100 y 300 mm y una longitud de hasta 30 m, se clasifican ya sea por filosofía del comportamiento o método de inyección de lechada [1], también se pueden dividir de acuerdo con su uso por soporte estructural y reforzamiento in situ [2]. En cuanto a su metodología de diseño, es prioridad tener en cuenta la estimación del movimiento del micropilote y la interacción relativa suelo/pilote [3], para el uso de su técnica como elementos de recalce, mejoradores o recuperadores de capacidad de carga frente a los múltiples fallos que se puedan presentar en una cimentación [4]. Considerando lo anterior, se ejecutan pruebas con base en la evaluación del comportamiento de micropilotes individuales y en grupo, contemplando sus características propias [5], lo que permite establecer variables de nivel geotécnico.

Durante la revisión bibliográfica es claro que el uso de micropilotes en la recuperación de cimentaciones es ampliamente documentado, a partir de ello es viable considerar la inclusión de dichos elementos en grupos de pilotes que presentan defectos; en los documentos se comparten diferentes variables, destacando la capacidad de carga, los esfuerzos axiales y el asentamiento, estas se estudian y se discuten en aproximadamente el 90 % de las publicaciones consignadas en este artículo. Como se mencionó previamente no se relacionan investigaciones directamente orientadas a su uso en grupos de pilotes; sin embargo, es posible adaptar resultados consignados por diferentes autores, principalmente internacionales, quienes analizan esta técnica en función de sus experiencias en esta área, siendo punto de partida para comprobar la efectividad del uso de los micropilotes en

la práctica de fundaciones en Colombia, ya que actualmente no existen antecedentes ni avances que contribuyan a generar pautas o criterios específicos y generales para el uso apropiado de esta técnica en terreno colombiano, especialmente enfocándose en el uso o la implementación como elementos recuperadores de capacidad de carga. El desarrollo del presente artículo se estructura en metodología, características generales de micropilotes, micropilotes como elementos recuperadores de capacidad de carga, análisis de variables y conclusiones.

## 2. Metodología

Con el fin de dar respuesta al objetivo principal de este proyecto, se realizó una consulta detallada en distintas publicaciones a través de diferentes bases de datos virtuales y repositorios digitales a nivel internacional y nacional, respecto al uso de los micropilotes como elementos recuperadores de capacidad de carga de cimentaciones y estructuras. Se creó una base de datos en la que se procedió a depurar la información necesaria y solvente de un total de 56 publicaciones, comprendidas entre los años 1995 y 2019, tal como se evidencia en la Figura 1.



Figura 1. Investigaciones consultadas relacionadas por año de publicación

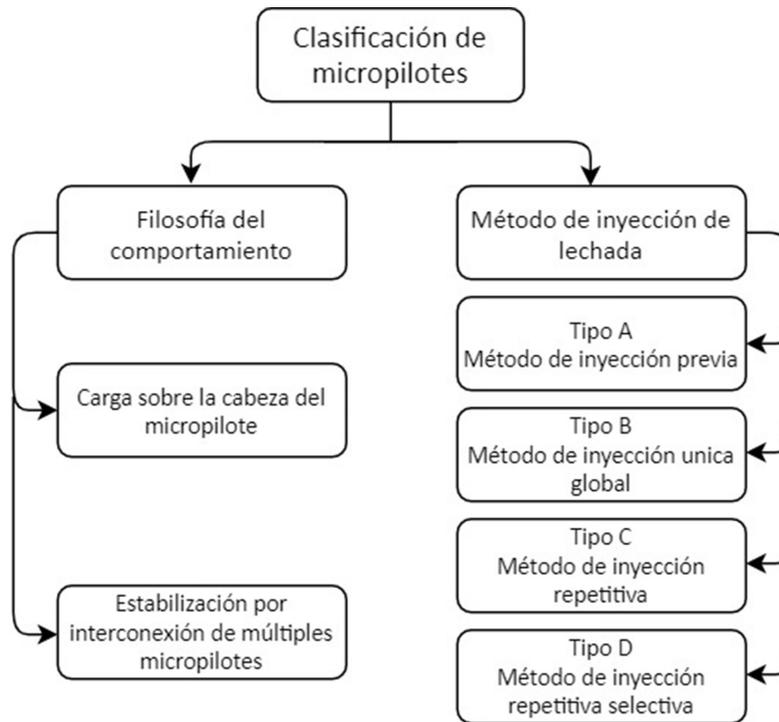
Se creó un marco conceptual histórico del área de geotecnia, permitiendo la creación de un resumen del estado del arte en el que se definen clases, características, procesos constructivos, usos y aplicaciones generales de estos elementos.

## 3. Características generales de micropilotes

### 3.1. Clasificación

Los micropilotes se pueden clasificar dependiendo de algunas de sus características como diámetro, proceso de construcción o naturaleza del reforzamiento; sin embargo, las clasificaciones más importantes son dos: mediante filosofía del comportamiento de los mismos y con base en el mé-

todo de inyección de lechada [1]; ahora bien, para otros autores [6] el tipo A se define como un método de inyección independiente, no como un tipo de micropilote . En la Figura 2 se evidencia que para el primer caso se consideran a su vez dos subtipos, dependiendo de la manera en la cual soporte la carga, ya sea directamente sobre la cabeza del micropilote o mediante estabilización por interconexión de varios de ellos.



**Figura 2.** Clasificación de micropilotes por filosofía y método de inyección

Aquellos que soportan la carga directamente sobre la cabeza del micropilote son conocidos como de soporte axial y son diseñados para transferir la carga a un estrato más apropiado, por lo cual son utilizados también para reforzamiento de estructuras, siendo este tipo el más usado. El segundo caso de comportamiento es el de interconexión tridimensional de micropilotes reticulares, en el que se crea una estructura confinada de suelo/pilote que trabaja en apuntalamiento, estabilización y retención de terreno; no requieren reforzamiento estructural, ya que no soportan las cargas de manera individual como en el primer caso, lo que hace que no sean tan utilizados [7].

Para la segunda clasificación, por el método de la inyección de lechada, los micropilotes se dividen en cuatro categorías [1] de acuerdo con el tipo y la presión de la lechada utilizada, como se muestra en la Tabla I.

### 3.2. Construcción y diseño

En proyectos de ingeniería civil que requieran el uso de micropilotes podrían establecerse ciertas etapas de diseño y construcción, con base en variables de estimación del movimiento e interacción relativa suelo/pilote, por lo cual se realizan pruebas de carga previas a la producción y la instalación del mismo.

**Tabla I.** Métodos de inyección de lechada

Tipo	Proceso de inyección
A – Método de inyección previa	La lechada es colocada por gravedad solamente, no es presurizada, se usan morteros de arena cemento y lechadas de cemento puro.
B – Inyección única global	La lechada de cemento se inyecta a presiones en intervalo de 0,3 a 1,0 MPa.
C – Inyección repetitiva	La lechada es colocada por gravedad, entre 15 y 25 min más tarde y antes del endurecimiento se verterá una lechada similar a la anterior con una presión de al menos 1,0 MPa.
D – Inyección repetitiva selectiva	La lechada es colocada por gravedad, una vez se endurece se verterá una lechada similar a la anterior con una presión entre 2,0 y 8,0 MPa.

**Fuente:** elaboración propia a partir de [1]

El proceso de selección del tipo de micropilote a construir debe contar con un estudio de suelos que permitirá de una manera idónea establecer el tipo de lechada y el proceso de inyección, considerando como factor principal el tipo de suelo y sus características, tal y como se evidencia en la Tabla II.

**Tabla II.** Tipo de inyección de lechada a utilizar según tipo de suelo

Tipo de suelo	Tipo de inyección de lechada
Rocas sanas, suelos cohesivos muy duros y arcillas rígidas.	Tipo A
Rocas más o menos sanas, suelos cohesivos semiduros y suelos granulares.	Tipo B
Rocas blandas y fisuradas y en materiales granulares gruesos y de densidad media.	Tipo C
Suelos cohesivos (salvo los muy duros), suelos de consistencia baja o media y suelos granulares.	Tipo D

**Fuente:** elaboración propia a partir de [1]

Una vez culminada la etapa de diseño se procederá a la construcción que consta de varias fases de ejecución: perforación, fabricación y colocación de la armadura, producción e inyección de la lechada o mortero. En la primera fase, la perforación con taladro podrá ser ejecutada por varios métodos como perforación no encamisada, ya sea por sistema con barrena helicoidal hueca, técnica de trabajo en seco apropiada para suelos con o sin cohesión, o por sistema de tubo simple con rotación, utilizado en suelos limosos, arenosos y gravas finas; requiere lavado de remoción de detritos. También existe la perforación encamisada, dividida en Duplex tipo A y tipo F, ambas son utilizadas en suelos que requieren soporte; en el tipo A la perforación se realiza en seco, ya que el suelo se retira de manera mecánica, mientras el F requiere de la inyección de líquidos para la remoción del suelo [8]. Una vez definido el método de perforación, se continúa con la construcción y la colocación de la armadura final del micropilote que podrá ser por barra, tubería o barra/tubería, la cual deberá ocupar más o menos el 50 % del volumen de la perforación [1], estos valores podrán variar de acuerdo al tipo de armadura; los diámetros aproximados para una estructura de barra se presentan en la Tabla III.

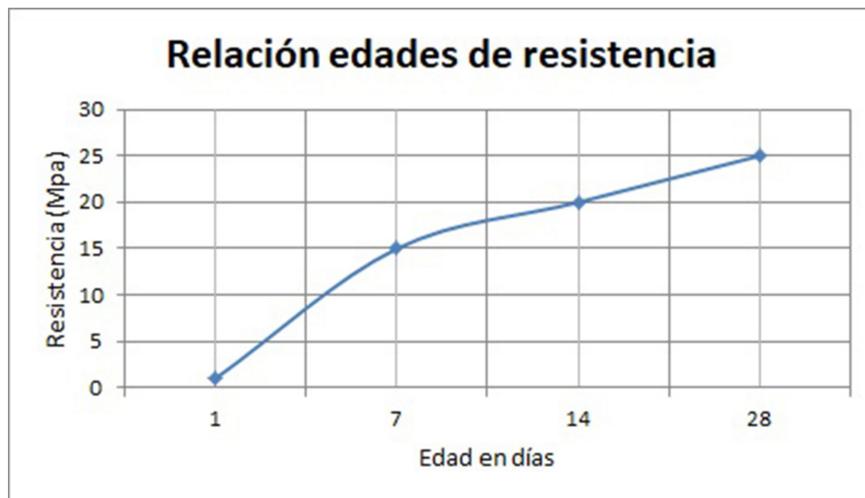
Con respecto a la fase de fabricación de lechada, la dosificación corresponde a una relación agua/cemento que se fijará en función de la resistencia que se requiera y del tipo de inyección

**Tabla III.** Diámetros de perforación

Diámetro de perforación (mm)	Diámetro de micropilote (mm)	Diámetro de armadura (mm)
100	95,25	47,25 - 50,25
120	114,30	50,26 - 60,30
140	133,35	60,31 - 70,35
160	152,40	70,36 - 80,40
180	171,45	80,41 - 90,45
200	190,50	90,46 - 100,50
220	209,55	100,51 - 110,55
250	238,15	110,56 - 125,65

con la cual se vaya a trabajar. En el caso del mortero, su contenido mínimo de cemento debe ser de  $375 \text{ kg/m}^3$  o superior si las especificaciones del proyecto lo requieren [6], [8]. Su resistencia será medida a través de probetas con edades a 28 días y deberá presentar en este plazo valores entre 25 y 40 MPa [9].

A los siete días, la resistencia de las probetas a compresión simple no podrá ser inferior al 60 % del requerido a los 28 días, esto basado en la norma europea de instrucción de hormigón estructural (EHE) [6], que maneja rangos y valores similares a la AASHTO T106/ASTM C-109 [9], tal como se presenta en la Figura 3.

**Figura 3.** Evolución de la resistencia a compresión medida a 28 días

**Fuente:** elaboración propia a partir de [6].

### 3.3. Usos

Los micropilotes actualmente son utilizados en dos ramas principales: soporte estructural y reforzamiento in situ. Dentro del área de soporte estructural se incluyen cimentaciones para nuevas estructuras, recalce de cimentaciones existentes y refuerzo sísmico, mientras que el área de reforzamiento in situ se implementa en estabilización de terraplenes y taludes, protección de suelos, reduc-

ción de asentamientos y estabilidad estructural. Ahora bien, haciendo énfasis en el área de soporte estructural y su uso en el recalce de cimentaciones existentes, se puede encontrar una subdivisión: reparación o reemplazo de cimentaciones existentes, control de movimientos y recuperación de la capacidad de la cimentación [2]. En la Tabla IV se puede evidenciar el comportamiento de diseño y el tipo de construcción utilizado en cada una de las áreas y los usos.

**Tabla IV.** Comportamiento de diseño y tipo de construcción

<b>Soporte estructural</b>			
<b>Uso</b>	<b>Cimentaciones estructuras nuevas</b>	<b>Recalce de cimentaciones existentes</b>	<b>Refuerzo sísmico</b>
Comportamiento de diseño	Caso 1	Caso 1	Caso 1
Tipo de construcción	Tipo A	Tipo A	Tipo A
	Suelos arcillosos duros y rocas	Suelos arcillosos duros y rocas	Suelos arcillosos duros y rocas
	Tipo B, C, D	Tipo B, C, D	Tipo B, C, D
	Suelos normales	Suelos normales	Suelos normales
Frecuencia de uso	95 % aproximadamente de uso a nivel mundial		
<b>Reforzamiento in situ</b>			
<b>Uso</b>	<b>Estabilización de pendientes y taludes</b>	<b>Fortalecimiento de terreno</b>	<b>Reducción de asentamiento y estabilidad estructural</b>
Comportamiento de diseño	Caso 1 y 2	Caso 2	Caso 2
Tipo de construcción	Tipo A y B	Tipo A y B	Tipo A
	Suelos arcillosos duros y semi duros, rocas y suelos granulares	Suelos arcillosos duros y semi duros, rocas y suelos granulares	Suelos arcillosos duros y rocas
Frecuencia de uso	5 % aproximadamente de uso a nivel mundial		

## 4. Micropilotes como elementos recuperadores de carga

Los pilotes son uno de los principales elementos utilizados en cimentaciones profundas, como se mencionó anteriormente; rara vez se construyen de manera individual, generalmente trabajan en grupo con el fin de aprovechar su gran diámetro y su capacidad de carga en la cimentación. En la práctica, su diseño está basado en la evaluación del comportamiento de cada pilote de manera individual, el cual afectará directamente el comportamiento y las características del grupo [5]. Los hallazgos compilados en los documentos consultados se mostrarán a continuación.

La capacidad de carga máxima de un pilote es determinada dependiendo del tipo de carga como se muestra en la ecuación (1).

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s \quad (1)$$

Donde  $Q_{ult}$  es la capacidad última de carga del pilote individual,  $Q_p$  es la capacidad de carga de la punta del pilote y  $Q_s$  es la resistencia por fricción [5]. En cuanto a la capacidad de carga del grupo de pilotes, esta es calculada de una manera similar a la de los pilotes de manera individual,

tal y como se muestra en la ecuación (2).

$$Q_{G_{ult}} = E \times N \times N \times Q_{ult} \quad (2)$$

Donde  $Q_{G_{ult}}$  es la capacidad última de carga del grupo de pilotes, E es el coeficiente de eficiencia calculado con base en la evidencia experimental, N es la cantidad de pilotes que componen el grupo y  $Q_{ult}$  es la capacidad de carga última de un solo pilote [10]. Con base en las ecuaciones 1 y 2 se podrá establecer cuál será la capacidad de carga que recuperarán los micropilotes en el caso del fallo de un pilote dentro del grupo inicial. Una vez calculada la capacidad de carga a recuperar por el grupo de micropilotes, se deberán establecer las variables y los parámetros de diseño calculando la capacidad de carga última de cada micropilote, la cual está determinada por la ecuación (3).

$$QM_{ult} = \alpha_i \times \pi \times D \times L_i \quad (3)$$

Donde  $QM_{ult}$  es la capacidad última de carga del micropilote individual,  $\alpha_i$  corresponde al parámetro ya establecido de interacción suelo/lechada, determinado por el tipo de suelo y dado en  $\text{kN/m}^2$ , el cual se evidencia en la Tabla V, D es el diámetro del micropilote y  $L_i$  es la longitud de interacción [9].

**Tabla V.** Parámetro de interacción suelo/lechada según tipo de suelo

Tipo de Suelo	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
Limo y arcilla (un poco de arena) (suave, medio plástico)	35 - 70 $\text{kN/m}^2$	35 - 95 $\text{kN/m}^2$	50 - 120 $\text{kN/m}^2$	50 - 145 $\text{kN/m}^2$
Limo y arcilla (un poco de arena) (duro, denso a muy denso)	50 - 120 $\text{kN/m}^2$	70 - 190 $\text{kN/m}^2$	95 - 190 $\text{kN/m}^2$	95 - 190 $\text{kN/m}^2$
Arena (un poco de limo) (fina, suelta media densa)	70 - 145 $\text{kN/m}^2$	70 - 190 $\text{kN/m}^2$	95 - 190 $\text{kN/m}^2$	95 - 240 $\text{kN/m}^2$
Arena (un poco de limo, grava) (fino-grueso, medio-muy denso)	95 - 215 $\text{kN/m}^2$	120 - 360 $\text{kN/m}^2$	145 - 360 $\text{kN/m}^2$	145 - 385 $\text{kN/m}^2$
Grava (un poco de arena) (medio-muy denso)	95 - 265 $\text{kN/m}^2$	120 - 360 $\text{kN/m}^2$	145 - 360 $\text{kN/m}^2$	145 - 385 $\text{kN/m}^2$
Suelo glacial (limo, arena, grava) (medio-muy denso, cementado)	95 - 195 $\text{kN/m}^2$	95 - 310 $\text{kN/m}^2$	120 - 310 $\text{kN/m}^2$	120 - 335 $\text{kN/m}^2$

En cuanto a la capacidad de carga del grupo de micropilotes, esta es calculada como se muestra en la ecuación (4).

$$QM_{G_{ult}} = QM_{ult} \times N \times \eta \quad (4)$$

Donde  $QM_{G_{ult}}$  es la capacidad última de carga del grupo de micropilotes,  $QM_{ult}$  es la capacidad última de carga del micropilote individual, N es el número de micropilotes y  $\eta$  es el factor de eficiencia del grupo de micropilotes respecto a los suelos cohesivos y no cohesivos [9], el cual se muestra en la Tabla VI.

Basados en la capacidad última de carga de los micropilotes individuales y del grupo, se podrá calcular el factor de eficiencia de la cimentación recuperadora de carga [3], el cual está definido por la ecuación (5).

$$\eta_c = \frac{QM_{G_{ult}}}{\sum QM_{ult}} \quad (5)$$

**Tabla VI.** Factor de eficiencia del grupo de micropilotes

Suelo	Tipo de cimentación	Espaciado micropilotes (eje a eje)	Factor de eficiencia de grupo
Suelos cohesivos	La losa está en contacto directo con el suelo	$2,0 D < s > 4,0 D$	1,00
	La losa no está en contacto directo con el suelo y el suelo es duro (el esfuerzo cortante del suelo no drenado es mayor a 95 kN/m <sup>2</sup> )	$2,0 D < s > 4,0 D$	1,00
	La losa no está en contacto directo con el suelo y el suelo es relativamente blando	$s = 2,5 D$	0,65
		$s = 3,0 D$	0,70
$s = 6,0 D$		1,00	
Suelos no cohesivos	La losa está en contacto directo con los suelos granulares	$s > 3,0 D$	1,00

A través de los años diferentes autores lograron consolidar las bases del conocimiento acerca del comportamiento del grupo de micropilotes, su factor de eficiencia y el efecto nudo; en varias pruebas de laboratorio [12], [13] brindaron múltiples conclusiones respecto a estas características, en las cuales es evidente un efecto de grupo positivo bajo la carga axial, pero negativo cuando el movimiento del grupo de micropilotes es mayor que el movimiento de un pilote individual.

Dentro de las conclusiones de algunas investigaciones [14], [15] se refiere que el factor de eficiencia del grupo es mayor que 1, siempre y cuando los micropilotes no sean instalados mediante métodos de pre perforación o perforaciones por chorro de agua, se alcanza su pico cuando la razón espacio/diámetro del micropilote se encuentra cercana a 2 y parece incrementar con el número de pilotes que componen el grupo, cuando esta razón es menor a 2 y mayor a 4 el efecto es contrario.

Algunas investigaciones [12]–[15] concluyen que la eficiencia del grupo de micropilotes se ve afectada por la separación que hay entre cada uno de ellos, varios autores han tomado distintos enfoques para predecir la eficiencia, como la relación longitud/diámetro [16]–[18] principalmente en suelos granulares, de manera similar se evaluó dicho factor considerando la inclinación en la que se instalan los micropilotes [19] y lo que esta genera en la eficiencia, obteniendo resultados a través de pruebas in situ; el ángulo de inclinación se contempla con un enfoque de observaciones numéricas y simulaciones [20].

Se desarrolló un modelo numérico en 3D para la estimación de eficiencia de micropilotes individuales y en grupo [21], calculando el impacto de la fricción y la rigidez en la transferencia de cargas, estos análisis son ratificados en estudios posteriores y ensayos adicionales [22]; además de indagar las variables descritas existen documentos enfocados en la importancia de la secuencia de construcción de los micropilotes y cómo afecta el comportamiento del grupo [23].

Es así como se ha demostrado que la eficiencia máxima de un grupo de micropilotes se alcanza siempre y cuando se tengan en cuenta las variables referidas, principalmente la relevancia de trabajar con separaciones entre dos y tres veces el diámetro de los mismos [24], con base en ello se podrá determinar si un grupo de micropilotes sería una opción viable como elementos recuperadores de carga en grupos de pilotes que presentan defectos, considerando que los micropilotes instalados podrán entrar a equilibrar los valores de compresión, tensión y resistencia, que se desequilibraron debido al fallo. Será necesario entrar a evaluar los posibles fallos y los casos en los cuales se consideran una solución óptima.

Los fallos que se pueden presentar en pilotes son múltiples, algunos de los más comunes son: panales por vibración, segregación, lavado de cemento, agrietamiento en los ejes de los pilotes, contaminación del concreto, cierre de la perforación del pilote debido al colapso de las paredes, afectaciones en la estructura del pilote debido a eventos sísmicos, descabezamiento del pilote, deformaciones laterales del terreno, falla de la losa de cimentación, en caso de pilotes no convencionales, como los de madera, debido al tiempo se presentan deterioros del material [4]; para la gran mayoría de estos fallos se podrán utilizar los micropilotes que se encargarán de mitigar los daños producidos en la fundación, excepto en el caso de los eventos sísmicos puesto que el terreno se encuentra en un estado de licuación, lo que lo hace inestablemente apropiado para esta técnica debido a la pérdida de soporte lateral [10].

Existen ciertos factores de nivel físico o geotécnico que influirán de manera positiva en la elección de micropilotes en comparación con otras técnicas, dentro del nivel físico se encuentran: sitios con acceso limitado, condiciones estrechas de trabajo, sitios con restricciones de espacio en general, estructuras débiles adyacentes, etc.

A nivel geotécnico se encuentra: geología de piedra caliza kárstica con vacíos de relleno, suelo con cavidades, fundaciones existentes subyacentes, suelos con un nivel freático alto, entre otros [25]; estos mismos factores permiten evaluar el costo y la rentabilidad del uso de los micropilotes, ya que la ubicación del proyecto es una de las características principales que definirán la viabilidad del uso de este sistema, de igual manera se debe considerar el costo de los materiales a utilizar, los cuales estarán directamente relacionados con la capacidad de carga soportada: a mayor necesidad de soporte mayor longitud y diámetro del micropilote, representando una cantidad más alta de acero, lechada, equipos, mano de obra y por tanto un costo más elevado, a pesar de esto, el costo/beneficio comparado con el uso de pilotes hincados o pozos perforados es superior [10].

La influencia de todas estas variables es evidente en diferentes casos a través de la historia tales como la rehabilitación del puente de 75 años del río Pocomoke en Maryland (Estados Unidos), la fundación original estaba basada en pilotes de madera, los cuales presentaron un compromiso en su capacidad de carga debido a la exposición constante al río, los micropilotes se eligieron para recuperar la carga que habían perdido los pilotes [9].

En Washington (Estados Unidos) se realizó la remodelación y la ampliación del edificio postal agregando nuevos pisos de oficinas y creando un sub-sótano de 7 m de altura, lo que significaba que se construirían nuevas columnas y sería necesario el reforzamiento de la fundación existente por medio de la construcción de micropilotes. Posterior a su construcción, múltiples pruebas fueron ejecutadas mostrando que trabajaban perfectamente con la fundación previa [26].

Para el fortalecimiento de un edificio construido hace 50 años en Sofía (Bulgaria) [27], en razón de asentamiento irregular en la estructura, se hizo necesaria la intervención instalando 57 micropilotes, cada uno de 4 m de longitud con inclinación de 57° mitigando las deformaciones y demostrando la eficiencia y la efectividad de la tecnología de los micropilotes en la reparación de edificios dañados.

En la Provincia de Alta Silesia en Polonia se ejecutó la rehabilitación de una casa que presentaba deflexión en el sector noroeste, a causa de la explotación minera del sector y de la construcción de un piso adicional no contemplado en el diseño original. Se apuntalaron 157 micropilotes de inyección con 300 mm de diámetro y longitud entre 8 y 13 m con la finalidad de minimizar el hundimiento de los muros [28].

La instalación de micropilotes con la intención de soportar el 100 % del peso de la estructura del faro de la Isla Morris en Carolina del Sur (Estados Unidos) [29], se decidió considerando que al momento de la intervención no se conocía el peso real de la estructura ni la contribución residual de los pilotes de cimentación originales; se manejaron 68 micropilotes con capacidad de diseño de compresión permisible de 75 toneladas por pilote, instalados en dos filas concéntricas alrededor de la base de la estructura del faro, gracias a la estabilización se garantizó que este soportaría la temporada de huracanes de otoño y de esta manera se consiguió el objetivo.

Durante la ampliación de la autopista Brooklyn - Queens en Estados Unidos, los micropilotes se utilizaron tanto para las nuevas líneas del viaducto como para el viaducto temporal habilitado con el fin de no restringir el tráfico durante las obras; el factor principal para su elección fue el hecho de que las vibraciones durante la etapa de construcción de los micropilotes eran mínimas en comparación con otros sistemas, así no presentarían afectaciones en los edificios antiguos adyacentes a la autopista [26].

En un último ejemplo de caso real se puede encontrar la ampliación del Hospital Universitario Presbiteriano en Pittsburgh (Estados Unidos), que requirió la construcción de un nuevo foso de elevador de 9 m de profundidad debajo de la base de tres columnas existentes de la estructura adyacente; las dificultades de acceso y el requerimiento de no presentar mayor movimiento cerca de las columnas fueron determinantes. Este proyecto es un claro ejemplo de que los micropilotes diseñados correctamente no solo trabajan de manera axial, sino que trabajan eficientemente de manera lateral aun sin contar con terreno adyacente [26].

## 5. Variables de análisis

En las publicaciones consultadas para el desarrollo de este documento se hace énfasis en las variables específicas de capacidad de carga, esfuerzos axiales y asentamiento. A continuación, se presentan las investigaciones indicadas junto a sus resultados de acuerdo con cada variable analizada.

### 5.1. Capacidad de carga

Se establecieron algunos parámetros para las pruebas de carga [11], determinando que se pueden ejecutar con cargas de hasta dos veces la carga de diseño, siempre y cuando no se exceda el 80 % de la capacidad estructural final. Para el caso de pilotes dañados, las cargas de compresión son compartidas entre la fundación existente y los micropilotes, mientras que las cargas de tensión, laterales y de momento son soportadas únicamente por los micropilotes. Para las que presentan daños leves, todas las cargas serán compartidas, ya que las especificaciones del diseño existente son inciertas y se deberá asumir que los micropilotes deberán soportar todas las cargas del diseño.

En el Distrito Federal en Brasil [30], un análisis de micropilotes tipo “Alluvial Anker” efectuó distintos tipos de pruebas de carga obteniendo el aporte de la zapata existente con el nuevo sistema de micropilotes. Se construyeron siete sistemas de placas con micropilotes de 130 mm de diámetro y 8 m de profundidad, así como pilotes de reacción de 170 mm de diámetro nominal y 12 m de profundidad. En las pruebas de carga se realizaron incrementos iguales no mayores al 20 % de la carga de trabajo del pilote durante 30 min hasta dos veces la carga de trabajo. Las pruebas se realizaron con el aporte de la zapata y sin ella, mediante una perforación bajo la misma. Como conclusión se puede establecer que el aporte de la placa al sistema placa pilote es del 23 % en la carga de trabajo. Estos valores demostraron un importante aporte de la placa al sistema en general y los autores recomendaron tomarla en cuenta en futuras metodologías de diseño de rehabilitación con micropilotes “Alluvial Anker”.

En Shanghái (China) [31] se realizó un estudio sobre el comportamiento de micropilotes individuales en arcilla blanda ejecutando dos pruebas de compresión y dos cargas de tensión en cuatro micropilotes de 150 mm de diámetro y 8 m de longitud, estas con el fin de comprobar los resultados que se habían obtenido por los mismos autores años antes [32]. Se utilizaron dos métodos: uno de carga sostenida lenta, probado únicamente en un micropilote bajo compresión con incrementos de carga de 40 kN una vez el micropilote alcanzaba un desplazamiento de 0,1 mm. En el método de prueba de carga sostenida rápida, los aumentos se realizaban cada hora; se utilizó en los tres micropilotes restantes, uno bajo compresión y dos bajo tensión. Los resultados mostraron que los micropilotes en compresión tienen mayores capacidades de carga que aquellos bajo tensión. Se obtuvo mejor rendimiento en aquellos con pruebas de carga rápida, generando un aumento en capacidad de carga de aproximadamente 22 % respecto a aquellos sometidos a pruebas lentas. La capacidad de carga final bajo tensión corresponde al 60 % aproximadamente de la capacidad final de aquellos bajo compresión. Basado en lo anterior y de acuerdo con lo mencionado por [11], la fundación objeto de estudio presentaba un daño leve.

En una ciudad de la India [33] se analizó el uso de micropilotes de 100 mm de diámetro y 4 m de longitud con el fin de recuperar la capacidad de carga del suelo rehabilitando el sistema de cimentación diseñado inicialmente para soportar 600 kN, considerando 120 kN/m<sup>2</sup> como la presión de soporte segura. Por encima del nivel de la base de cimentación se instaló suelo compactado de hasta 6,5 m de altura compensando el desnivel presentado, que ocasionó una sobrecarga de 130 kN/m<sup>2</sup> en la base, presentando fallo tanto en vigas como en columnas. Con el software Plaxis 2D se realizó un análisis numérico y un modelo geométrico del caso de estudio, estableciendo la curva de desplazamiento tanto del terreno como del mismo con micropilotes. La presión de carga admisible sin modificaciones fue de 66,8 kN/m<sup>2</sup> y cercana a la presión de carga permisible de 70 kN/m<sup>2</sup> considerada en el diseño revisado. En la curva correspondiente al terreno intervenido con micropilotes se mostró mejora general en la capacidad de carga obtenida, con un valor de 260 kN/m<sup>2</sup>, que evidencia el aumento de esta.

Una serie de ensayos en Jumunjin (Corea del Sur) fueron realizados para medir la capacidad de carga y la influencia del asentamiento en micropilotes inclinados en un terreno de arena sílice limpia [34]. Dichas pruebas se adoptaron para micropilotes individuales, en grupo y losas micropiloteadas con cuatro ángulos de instalación de 0°, 15°, 30° y 45° y tres diferentes espaciamientos de 3, 5 y 7 veces el diámetro. Se encontró un incremento en la capacidad de carga con el aumento

del ángulo hasta cierto punto, en donde se empieza a mostrar una disminución o se llega al fallo. Para el caso de los micropilotes individuales la capacidad última de carga se alcanzó a los 15° igual que en el grupo; sin embargo, esta empieza a disminuir hasta que alcanza su punto mínimo a los 45°. El espaciado de los micropilotes no fue significativo en la capacidad de carga. En las losas micropiloteadas la capacidad de carga se vio afectada tanto por el ángulo como por el espaciado. A pesar de ello, la tendencia a alcanzar la última capacidad de carga a los 15° se mantuvo, pero fue evidente que dicha capacidad es siempre mayor cuando el espaciado también lo es, estos resultados son probados a través de cálculos y ensayos in situ además de ser comparados con los resultados de otros autores.

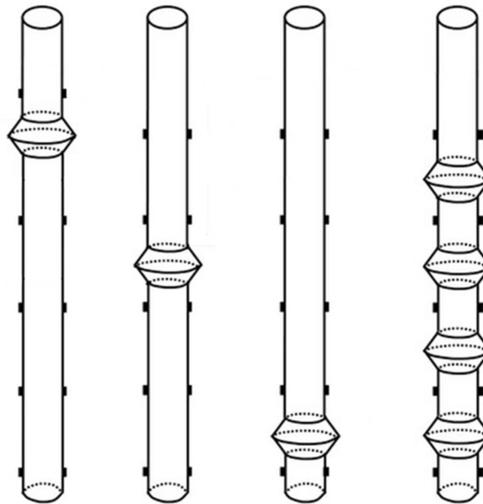
La capacidad portante de la cimentación de un puente en Irán [35] se analizó antes de la inclusión de micropilotes y posterior a la misma, con el fin de comprobar el efecto de esta aplicación en la estabilización del suelo y el aumento en su capacidad de carga; se utilizaron nueve pozos perforados con micropilotes verticales de 18 m de longitud y 80 mm de diámetro inyectados mediante Jet Grouting, a los cuales se le realizaron mediciones por medio de prueba de penetración estándar conocida por sus siglas en inglés SPT (Standard Penetration Test), con estos ensayos se reflejó una relación directa entre los resultados y la mejora de esta variable. Es evidente que a mayor profundidad la capacidad de carga muestra cambios positivos de aproximadamente 60 % a 2,5 m y de hasta el doble al alcanzar 12,5 m, en especial si el suelo presenta características granulares más gruesas. Esta investigación demostró el efecto considerable en la mejora de las propiedades del suelo con los micropilotes.

En Japón, considerando los efectos de los terremotos en cimentaciones se llevaron a cabo pruebas en arena [36] utilizando modelos bajo fuerza gravitacional: con una zapata circular de 40 mm de espesor en acero inoxidable, una con las mismas dimensiones del anterior, pero con un micropilote vertical de 1,8 mm y longitud de 100 mm, por último, una zapata con 8 micropilotes de las mismas dimensiones e inclinación de 60°. Los micropilotes instalados eran recubiertos con arena que simularía la rugosidad de la inyección. Se realizaron varios tipos de pruebas contemplando el contacto directo de la zapata con el suelo o sin él. Se examinó el comportamiento de carga y los desplazamientos de los cimientos, encontrando que la densidad relativa de la arena tuvo influencia en la capacidad de carga de aquellos modelos en los que la zapata tenía contacto. Debido al confinamiento, la presión de la base en la zapata aumentó, al igual que la presión en la superficie de los micropilotes. En las pruebas de la zapata reforzada con micropilotes verticales, la capacidad de carga fue más del doble de la suma de la capacidad de carga individual de la zapata y el grupo de micropilotes. Los ensayos en esta publicación son similares a los ejecutados por [37], que utilizaron modelos en centrifuga con suelos arenosos, pero con el objetivo de calcular el asentamiento y el comportamiento de cargas axiales.

Para determinar la capacidad de carga última de un grupo de micropilotes en suelo arcilloso plástico en India, se estableció una ecuación no lineal a partir de datos experimentales [38], estudiando los comportamientos de losas micropiloteadas con y sin interacción directa en el suelo, los micropilotes se construyeron con diámetros de 25 y 50 mm proporción en longitud de máximo 40 veces su diámetro, configurados en cinco patrones diferentes de 1, 2, 4, 9 y 16 micropilotes. La carga soportada por la losa en contacto con el suelo es de aproximadamente 50 % más que la transportada por una losa sin contacto, lo anterior se debe al efecto de confinamiento producido por el terreno;

se determinó a partir de observaciones experimentales que la capacidad de carga de un grupo de micropilotes crece de una manera no lineal con el aumento del diámetro, la longitud, el número y el espaciado.

En Corea del Sur [39] se efectuaron pruebas de centrífuga en seis modelos a escala: con micropilotes convencionales, de inyección y cuatro especiales conocidos como de forma de onda, tres de ellos contaban con una llave de cortante que es un elemento estructural del mismo material del micropilote en forma de prisma hexagonal, construido en diferentes intersecciones con la finalidad de aumentar la capacidad de carga, tal y como se ve en la Figura 4.



**Figura 4.** Estructura de micropilotes en forma de onda

**Fuente:** elaboración propia a partir de [39].

Todos los modelos tenían longitud estándar de 250 mm. Para los especiales, la llave se ubicó en distintas longitudes del micropilote (a 25 mm, a 100 mm y a 200 mm de la cabeza), el último cuenta con cuatro llaves distribuidas; estos modelos cuentan con dos diámetros, el del cuerpo del micropilote o del eje con 25 mm y 42 mm que es el diámetro para la llave cortante. La capacidad última de carga fue calculada mediante la curva de relación carga/asentamiento, de acuerdo con la FHWA este parámetro se calcula en el momento en que se alcanza 15 % de asentamiento; sin embargo, en los micropilotes tipo forma de onda se debe calcular al alcanzar un 10 % debido al diámetro adicional de la llave de cortante. Los resultados obtenidos fueron: 1.040 kN en el micropilote convencional, 1.981,7 kN para el inyectado, 2.079,8 kN para el micropilote con una llave de cortante en la parte superior, 2.059,2 kN en el construido con llave central, 2.208,8 kN para el de llave inferior, siendo este el que mostró los mejores resultados de capacidad última de carga y 2.167,1 kN en el micropilote que contaba con tres llaves.

En relación con el modelo convencional, la capacidad de carga del inyectado y de los que cuentan con llaves de cortante aumentó 47,5 % y 51,1 % en promedio respectivamente. Es de anotar que los resultados de los ensayos realizados en esta publicación evidencian un incremento en la capacidad de carga considerable, probado así mismo matemáticamente por una ecuación predictiva [40] en la

que se obtienen resultados similares a los encontrados en las pruebas in situ, por lo que podrían ser una de las mejores opciones como recuperadores de carga en grupos que presentan defectos.

Es así como se puede comprobar que a pesar de que los resultados de mejoras sean obtenidos mediante simulaciones y modelos matemáticos, como en el caso presentado por [33], o mediante pruebas de carga in situ, como en las demás publicaciones mencionadas, las mejoras en capacidad de carga tanto en tensión como en compresión gracias a los micropilotes nuevos son exitosas.

## 5.2. Esfuerzos axiales

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos por diferentes autores en la variable de esfuerzos axiales de los micropilotes. En el primer caso se muestran los hallazgos de tres tipos de pruebas realizadas en centrífuga geotécnica [37], una prueba en un solo micropilote, otra en una losa con espesor de 0,6 m en escala prototipo y por último tres pruebas en grupos de micropilotes con losas de múltiples espesores, el diámetro prototipo fue de 150 mm y longitud de 10 m. La rigidez axial del micropilote individual de la losa con y sin micropilotes se evaluó a partir de las pendientes iniciales de las curvas de carga/asentamiento.

Se encontró que en el caso del micropilote individual era de 48.000 kN/m en la escala prototipo, para la losa sin micropilotes fue de 114.000 kN/m, finalmente en las pruebas de losas con micropilotes de espesor de 0,3 m, 0,45 m y 0,6 m fueron de 71.000 kN/m, 134.000 kN/m y 159.000 kN/m respectivamente. La rigidez de la losa se vio afectada principalmente por el espesor; los cálculos de rigidez axial de la losa con micropilotes de mayor espesor muestran que fue un 39 % más alta que la rigidez de la misma losa, pero sin micropilotes, lo que indica que cada micropilote contribuyó a aumentarla.

Por otro lado, en los ensayos en Shanghái (China) [31] se demostró que las distribuciones de fuerzas axiales en micropilotes crecen con las cargas aplicadas en las cabezas, pero disminuyen con la profundidad y la interacción suelo/micropilote. Existía una resistencia en punta en cargas axiales en todos los micropilotes con cargas en compresión, pero esta misma no se reflejaba bajo tensión. La reducción de las fuerzas axiales con la profundidad en micropilotes bajo tensión fue más significativa que bajo compresión, esta comparación se basó en las fuerzas medidas a profundidades de 5,5 y 8,0 m.

En Ontario (Canadá) se ejecutaron múltiples ensayos tanto in situ como en laboratorio para probar los micropilotes tipo barra hueca directamente en un enfoque evaluativo de esfuerzos axiales, construyendo cuatro grupos, cada uno compuesto con cuatro micropilotes y adicionalmente seis individuales, todos de longitud de 6 m con diámetros de 115 y 152 mm, espaciados entre 2 y 5 veces el diámetro [41]. Los resultados de cargas rápidas con incrementos del 5 % cada 5 min y las curvas de carga/desplazamiento mostraron que la rigidez promedio del grupo aumentó en aproximadamente un 50 % y en micropilotes individuales un 39 % debido a diámetros más altos de la broca (es decir, el diámetro del micropilote); en cuanto a la rigidez por espaciado, osciló entre 70.000 y 97.000 kN/m. Las cargas axiales se obtuvieron utilizando el área medida y el módulo de elasticidad equivalente, probando que la resistencia media de la punta representó aproximadamente el 12 % de la resistencia total de los micropilotes.

Para un estudio experimental sobre la respuesta de micropilotes de tornillo introducidos en el suelo por rotación aplicando simultáneamente torque y fuerza hacia abajo, se efectuaron tres pruebas de cargas axiales de tracción y dos de compresión [42]. Se realizaron 20 pruebas en tornillos con diámetro entre 66 y 114 mm, longitud variable de 0,8 a 1,6 m en suelos arcillosos de Italia. Las cargas fueron aplicadas con incrementos de 10 %, manteniéndose constantes de 2 a 13 horas. El hallazgo más interesante es que los micropilotes más cortos sometidos a cargas de tracción presentaron mayores valores de capacidad última de carga (15 a 33 %) en comparación con aquellos de carga compresiva, resultado opuesto a los micropilotes más largos, que alcanzaron valores de capacidad límite en promedio 35 a 50 % más altos en aquellos bajo cargas compresivas. Los micropilotes lograron capacidades de tracción y compresión al fallar en el rango de 23 a 60 kN y de 20 a 75 kN respectivamente. Los resultados de estos ensayos fueron muy similares en comparación con los analizados a profundidad de los micropilotes de tornillos y su respuesta frente a esfuerzos axiales [43].

En un caso especial de simulación de reforzamiento de fundaciones con micropilotes en túneles [44], se realizaron 13 pruebas a escala en cámara con arena densa; se demostró que con la instalación de micropilotes más largos principalmente ubicados en la sección central del túnel y cerca al pilote, disminuyeron significativamente los movimientos en el suelo en aproximadamente 86 %, los momentos de flexión en 25 % y las fuerzas axiales en 20 % en comparación con la situación sin micropilotes. Considerando que no se tiene certeza de la capacidad total exacta de los pilotes existentes y que se requiere que soporten el aumento de la carga estructural, es fundamental diseñar e instalar los micropilotes de refuerzo teniendo en cuenta la rigidez axial de los pilotes existentes y el índice de distribución de carga [45]. Partiendo de esta premisa se propone estimar la rigidez axial de los micropilotes de refuerzo a través de un programa numérico 3D conocido como YSPR y el software Plaxis 3D, en el que se simuló una remodelación de extensión vertical. La rigidez axial estimada en este análisis no se basó en el coeficiente de resorte sino en el módulo de elasticidad, realizando modelaciones bajo niveles de carga a 50 %, 100 % y 150 %, el índice de distribución del pilote existente disminuyó de 23,96 % a 23,47 % y a 22,81 %, por otro lado, este mismo aumentó de 4,16 % a 6,13 % y finalmente a 8,77 % en el micropilote de refuerzo. A partir de los resultados, se encontró que la carga estructural se transfiere al micropilote con una rigidez relativamente alta.

Las cargas axiales de los micropilotes convencionales pueden mostrar mejoría dependiendo de la metodología de construcción utilizada con el uso de micropilotes en forma de onda [39], [46], los cuales han demostrado óptimos resultados en capacidad de carga; lo que comprueba la transferencia de carga compartida completa al fuste y a la punta, demostrando que las cargas compartidas se comportan de manera diferente dependiendo de la ubicación de las llaves. Cuando estas llaves están construidas en la parte superior o central la resistencia del eje aumenta alrededor de la llave, debido a que la presión de confinamiento es relativamente baja. Los micropilotes no exhibieron una mejora significativa en las cargas axiales compartidas a nivel de eje respecto a los micropilotes inyectados, pero en resistencia en punta se pudo apreciar que el micropilote con llave central mostró una mejora considerable. Para el caso de los micropilotes que tienen la llave ubicada en la parte inferior, la resistencia en cargas axiales a nivel de eje es mayor, debido al nivel de confinamiento producido por la densidad del terreno, aunque su mejora en punta no sea tan alta como se esperaba. Por su parte, el micropilote con cuatro de estos elementos estructurales mostró similitud al micropilote con

llave inferior, lo que implica que el número de llaves de cortante no es el factor clave que afecta el aumento en la capacidad de soporte en micropilotes con forma de onda.

### 5.3. Asentamiento

Uno de los comportamientos de fundaciones que debe ser prioridad de análisis es el asentamiento, esta variable es la que nos garantizará la estabilidad de la estructura una vez el suelo complete sus niveles de consolidación; por este motivo existen varios estudios y pruebas enfocadas en la evaluación de resultados respecto al desplazamiento vertical y como, en la mayoría de los casos, los micropilotes pueden ser incluidos para mejorar esta condición. En los ensayos con centrifuga realizados con pruebas en losas con micropilotes [37] la flexibilidad de la misma se vio afectada principalmente por el espesor, influyendo en el asentamiento diferencial y la distribución de la carga entre la losa y los micropilotes. De acuerdo con el espaciado de los micropilotes se disminuirán las deflexiones, lo que se confirmó con una investigación numérica [47].

Las pruebas de asentamiento realizadas en los tres tipos de losas mostraron que en las más gruesas se generaba un comportamiento casi lineal. La más delgada presentó deformaciones que ocasionaron transferencia de cargas directamente al suelo desde la losa y no desde los micropilotes por la presión de contacto, lo que resultó en un aumento de la presión de confinamiento y en consecuencia la carga se transmitió a través de la sección superior de los micropilotes. En la etapa de carga inicial, la mayor parte de la carga era transportada por los micropilotes, a medida que aumentaba la proporción, la presión de contacto disminuyó significativamente. El aumento en la capacidad final de los micropilotes se atribuye al incremento de la presión de contacto de la losa, lo cual se presentó en la losa más flexible, aumentando la presión de confinamiento de los micropilotes. En las losas de mayores espesores, cuando la fuerza axial de los micropilotes alcanzó su carga final, se experimentó un asentamiento excesivo y no pudieron seguir soportando, así la carga transferida por la losa al suelo subyacente se incrementó, aumentando la presión de contacto.

En la ampliación vertical de un edificio se hace necesario el reforzamiento de los cimientos con el fin de compartir las cargas transmitidas, mitigando el asentamiento excesivo de la construcción. Basado en lo anterior se realizaron pruebas a escala en laboratorio de micropilotes convencionales y en forma de onda [48], analizando el factor de rigidez axial como parámetro de cálculo sobre el comportamiento de reparto de carga de pilotes existentes y micropilotes; los resultados llevaron a concluir que los elementos de forma de onda presentan una rigidez superior en comparación con los convencionales y, por tanto, los índices de asentamiento fueron menores y el grado de reducción aumentó linealmente con el incremento de la rigidez del micropilote, confirmando teorías ya expuestas.

En un tanque de prueba con una altura de 600 mm se efectuaron pruebas en una placa de acero con y sin micropilotes en terreno arcilloso de Malasia [49] con el fin de comprobar su efectividad al incluirlos en apuntalamiento de cimientos existentes, refuerzo de suelo in situ, reacondicionamiento sísmico y cimientos en nuevas construcciones. Para las pruebas en laboratorio se aplican cargas de 0,5 a 4,0 kg directamente sobre la placa y luego sobre la cabeza de los elementos de refuerzo instalados. En el primer caso la placa presentó un asentamiento excesivo, mientras que en la placa con micropilotes el asentamiento disminuyó; esta variación es aún más obvia al aumentar la cantidad de los micropilotes, teniendo en cuenta la profundidad y el espaciado entre ellos.

En la construcción de un túnel de dos carriles reforzado con micropilotes en Teherán (Irán) [50], se simuló por medio de Plaxis 2D la proyección del asentamiento de superficie; de acuerdo a los resultados se esperaba que los elementos recuperadores de carga redujeran el asentamiento un 30 %. Una vez iniciada la ejecución de la obra, se recolectaron datos en tiempo real, hallando que la mejora fue únicamente del 15 %; es decir, la mitad de lo proyectado; esto debido a que en algunas secciones del terreno que revestía el túnel los parámetros geotécnicos demostraban que la capacidad portante del suelo era mucho menor, haciendo que la eficacia de los micropilotes no alcanzara su máximo nivel.

En Jumunjin (Corea del Sur), bajo pruebas realizadas a escala e in situ, se midió el asentamiento de los micropilotes en varias configuraciones [34]. Las mediciones de las pruebas se realizaron en diferentes niveles de asentamiento para cada tipo de instalación, apreciando la influencia del ángulo de inclinación. Para el caso de los micropilotes individuales y el grupo, en el momento en que llegaron a un punto de asentamiento óptimo, no se mostraron cambios significativos en la capacidad de carga, mientras que para la placa con micropilotes se incrementó continuamente sin una clara indicación de falla, lo que es consecuente con ensayos efectuados posteriormente que indicaron que la losa tenía un efecto fundamental en el asentamiento [31]. Con base en lo anterior, se midió el factor de interacción de las losas con micropilotes, como resultado se halló que dicho factor generalmente estaba por debajo de 1 para los asentamientos alrededor del 10 % del ancho de la losa; de igual manera se evidenció que en las losas donde el espaciado de micropilotes es mayor, el factor de interacción muestra valores más altos, ya que el efecto de grupo se desvanece.

Los valores de la relación de cargas compartidas en esta configuración fueron más altos inicialmente, lo que indicaba más proporción de carga transportada por los micropilotes a medida que aumentaba el asentamiento; también se observó que la proporción de dicha carga aumentaba cuando el espaciado entre ellos era mayor en las inclinaciones de 15° a 30°, excepto en el caso de espaciado de tres veces el diámetro. Con esta publicación y sus comparaciones con los resultados obtenidos por otros autores es posible concluir que el asentamiento es una variable importante a la hora de medir el comportamiento de los micropilotes instalados de manera vertical y también aquellos que poseen cierto grado de inclinación.

La técnica de inclusión de micropilotes para control de asentamiento y recuperación de carga fue utilizada en Egipto [51] en un edificio construido en 2013 con altura de 10 pisos incluido el sótano, tiempo después agregaron tres niveles adicionales provocando un hundimiento desproporcional por cargas excesivas. Instalaron 36 micropilotes de 150 mm y 13 m de longitud que proporcionaron una capacidad de carga de 720 toneladas, que permitieron la estabilización de la estructura; se verificó el comportamiento de instalación monitoreando su desempeño por un año, tres meses después de la intervención se logró detener por completo el asentamiento.

En Lianyungang (China), una torre de transmisión construida sobre suelo arcilloso blando que por sobrecarga inducida generó un asentamiento diferencial respecto al diseño inicial de la cimentación [52] se intervino con la instalación de 12 micropilotes de 102 mm de diámetro y 12 m de largo para contrarrestar su inclinación, la base de la zapata se maniobró utilizando gatos hidráulicos que permitieron elevar la torre de manera segura; una vez nivelada, se fijó la nueva posición de la base con pernos de alta resistencia que se unirían a los micropilotes fundidos, adicionalmente el

espacio entre el suelo y la cimentación corregida fue llenado con hormigón, ampliando la cimentación inicial. Los datos finales de seguimiento del desplazamiento y la carga aplicada confirmaron que el micropilote inyectado es una buena opción para la rectificación y el refuerzo de la cimentación, especialmente en terrenos blandos y espacios físicos reducidos.

La variable de asentamiento fue analizada en cuatro puentes reforzados con micropilotes en los condados de Salem y Gloucester en Nueva Jersey (Estados Unidos) [53], estos viaductos contaban con pilotes de hormigón octagonales. Se realizó la construcción de cuatro a ocho micropilotes en secciones de cuatro a ocho, para reducir los índices de asentamiento una vez se instalarán en las fundaciones existentes. La carga de compresión de diseño para los micropilotes fue de 356 kN, se construyeron utilizando una tubería de acero con un grosor de pared de 13 mm, con perforaciones internas de 130 mm para el primer y segundo puente, de 150 mm para el tercer puente y 190 mm para el último. En cada puente se instalaron pilas de prueba y se realizaron pruebas de carga de compresión estática de hasta 2,5 veces la carga de diseño.

Todos los micropilotes fueron precargados. El principal parámetro exigido por el área de diseño era que los micropilotes deberían sostener la carga total de compresión, es decir, 356 kN con no más de 25,4 mm de asentamiento. Una vez realizadas las primeras pruebas, se obtuvo que, en el primer puente cargado con 890 kN, el máximo asentamiento alcanzado fue de 5,8 mm, cumpliendo con el estándar establecido. En el caso del segundo puente los micropilotes cargados presentaron un fallo antes de completar la carga máxima, por lo cual debieron incrementar el diámetro de la perforación de 130 a 190 mm, de esta manera cumplieron con el margen de carga máxima, siendo que el mayor asentamiento presentado en este puente fue de 14,05 mm. En el tercer puente nuevamente se presentó un fallo, por lo que se recurrió al cambio de diámetro de perforación, pasando de 150 a 190 mm. Los fallos en estos dos puentes fueron atribuidos principalmente al tipo de suelo y a que en el primer puente la longitud de enlace en la parte inferior del mismo era de 9,1 m mientras que para los demás puentes era de 12,2 m. Una vez modificado el diámetro de perforación, los micropilotes soportaron la carga sin inconveniente, obteniendo un máximo asentamiento de 10,92 mm en promedio.

Este caso demuestra que tanto el diámetro de los micropilotes como su longitud son características importantes a la hora del diseño, conclusión compartida en las pruebas realizadas para el mejoramiento de una línea ferroviaria en Alberta (Canadá) [54], donde los micropilotes se convirtieron en una solución viable para cimentaciones profundas en grandes proyectos de transporte, disminuyendo en gran medida los índices de asentamiento sin alcanzar el parámetro máximo permitido de 25 mm; fue evidente su funcionalidad al ser usados como elementos recuperadores de carga. A pesar de que en estos casos no se mostraban fallos en su estructura de cimentación y que las intervenciones se hicieron con el fin de prevención, son los que más se acercan al objetivo de análisis de los micropilotes como elementos recuperadores de carga en fundaciones que presentan defectos con resultados positivos.

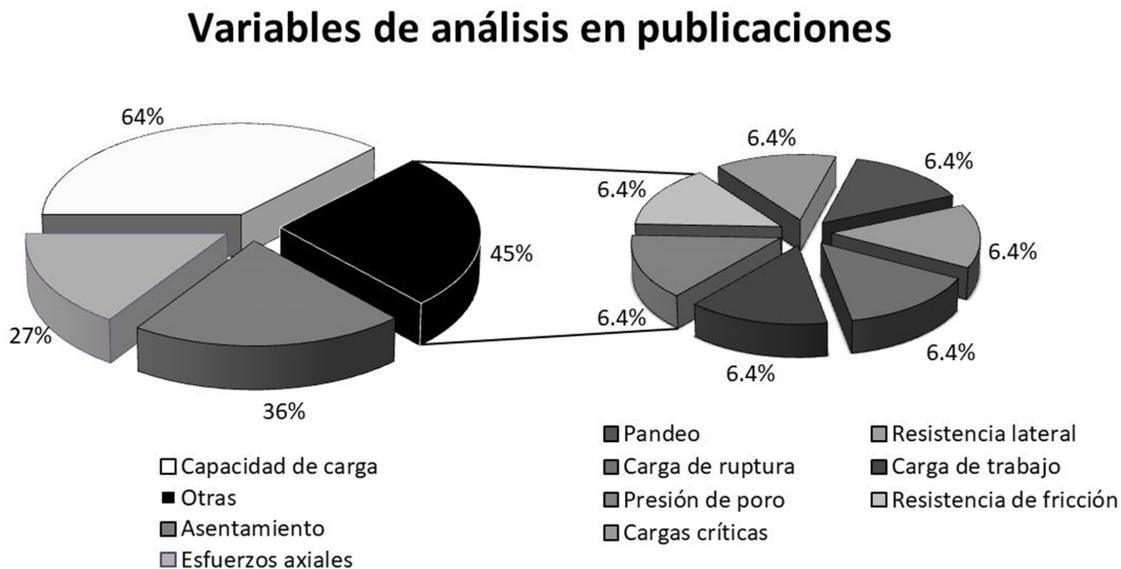
## 5.4. Otras variables

Las variables recopiladas previamente: capacidad de carga, esfuerzos axiales y asentamiento, fueron estudiadas y discutidas en aproximadamente el 90 % de las publicaciones consignadas en

este artículo. El 10 % restante consideran variables diferentes a las tres mencionadas, enfocadas a otros objetivos. La variable de pandeo fue calculada considerando las densidades de los estratos de suelo [11], hallando medidas de tensión, compresión y flexión para secciones específicas del micropilote y no de la longitud total del mismo, otra variable es la resistencia lateral para micropilotes individuales y en grupo simulada en software especializado (COM 624P - LPILE).

Para los micropilotes “Alluvial Anker” [30] las variables de carga de ruptura y carga de trabajo fueron halladas mediante extrapolación de modelos matemáticos. La variable presión de poro fue analizada en la zona arcillosa del valle de México por la generación de un modelo hiperbólico basado en los modelos de Mohr-Coulomb y Tresca, determinando adicionalmente presión inicial, máxima expansión y radio de la zona plástica [55]. La resistencia de fricción se determinó a partir del coeficiente de presión de tierras [33] para conocer la cantidad de micropilotes a instalar.

Las cargas críticas se estudiaron para el caso de expansión del Coliseo Fort Worth en Texas (Estados Unidos) [56], donde se utilizaron micropilotes como reforzamiento temporal de la cúpula durante el proceso de demolición de la estructura adyacente, dichos análisis resultaron indiferentes por tratarse de estudios temporales; sin embargo, demostraron que los micropilotes junto con otros elementos proporcionaron una resistencia en carga suficiente para el proyecto. El compendio de las variables de enfoque evaluadas en este artículo se evidencia en la Figura 5.



**Figura 5.** Porcentaje de variables analizadas en investigaciones consultadas

## 6. Conclusiones

En el refuerzo de cimentaciones de estructuras existentes los micropilotes pueden ser considerados una de las mejores opciones a razón de sus particularidades constructivas, su contribución geotécnica y su relación costo/beneficio en comparación con otras técnicas convencionales; con el paso del tiempo esta técnica se ha implementado en mayor medida haciendo que sus aplicaciones

pasen por el apuntalamiento de cimientos, el refuerzo de suelo in situ, el reacondicionamiento sísmico y el soporte estructural; partiendo de ello se empieza a contemplar la opción de utilizar los micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones defectuosas.

Este artículo hace una revisión de los parámetros que se tienen en cuenta al medir la efectividad de esta práctica, encontrando que las variables de mayor incidencia son la capacidad de carga (siendo esta la más analizada, encontrándose en el 64 % de los manuscritos referenciados), el asentamiento que aparece en el 36 % y los esfuerzos axiales en el 27 %, aunque de igual forma se evalúan otras tales como el pandeo, la resistencia lateral, la carga de ruptura y algunas otras específicas de cada artículo.

Los hallazgos expuestos en los diferentes documentos de esta compilación lograron comprobar que los micropilotes tienen una influencia positiva en la recuperación de carga para fundaciones existentes; la capacidad aumenta con la inclusión de los micropilotes y la proporción de cargas compartidas presenta una mejor distribución, garantizando que todos los elementos de la fundación trabajen de manera adecuada y óptima.

Los esfuerzos axiales exhiben una relación directa entre suelo y micropilote, lo que permite que las cargas sean transferidas de mejor manera, tanto en punta como en fuste; lo anterior en consecuencia con la rigidez y la longitud de los micropilotes que se construyan.

En el caso del asentamiento la disminución de este índice es indiscutible, principalmente en configuraciones grupales con espaciamiento de aproximadamente dos veces su diámetro y que presenten ángulos de inclinación; es importante hacer alusión a la estratificación del suelo, puesto que es un factor que repercutirá en criterios de diseño y construcción.

Las investigaciones consultadas, a pesar de que resaltan estos elementos como recuperadores de carga en diferentes tipos de suelos, no han sido realizadas considerando los estratos específicos que pudiesen encontrarse en terreno colombiano, por lo que es necesario que la academia contribuya a reunir los conocimientos empíricos con los que actualmente se ejecutan proyectos de esta índole y genere una base conceptual de soporte, que detalle los aspectos técnicos y constructivos de los micropilotes en reforzamiento de cimentaciones profundas.

A partir del conocimiento obtenido con esta revisión, se considera importante llevar a cabo estudios tanto en laboratorio como en campo que prioricen la variedad granulométrica de la geografía nacional, para que de esta manera se reduzca la incertidumbre del uso de esta práctica, y por ende aumente y se incentive el manejo de la técnica bajo las condiciones geotécnicas del país, aprovechando los beneficios que brinda; por otro lado es trascendental un análisis minucioso que evalúe a nivel presupuestal la utilidad de esta técnica frente a las soluciones convencionales en cimentación profunda.

## Referencias

- [1] D. A. Bruce, A. F. DiMillio, and I. Juran, "Micropiles: The state of practice. Part I characteristics, definitions and classifications", *Ground Improv.*, vol. 1, no. 1, pp. 25-35, 1997. <https://doi.org/10.1680/gi.1997.010104> ↑2, 4, 5

- [2] A. Cadden, J. Gómez, D. A. Bruce, and T. Armour, "Micropiles: Recent advances and future trends", *Current Practices and Future Trends in Deep Foundations*, pp. 140-165, 2004. [https://doi.org/10.1061/40743\(142\)9](https://doi.org/10.1061/40743(142)9) ↑2, 7
- [3] I. Juran, D. A. Bruce, A. DiMillio, and A. Benslimane, "Micropiles: The state of practice. Part II: Design of single micropiles and groups and networks of micropiles", *Ground Improv.*, vol. 3, no. 3, pp. 89-110, 1999. ↑2, 8
- [4] V. Rama, "Pile foundations", *Geotechnical Engineering*, vol. 1, no. 46, pp. 76-85, 2009. ↑2, 10
- [5] B. M. Das, *Principios de ingeniería de cimentaciones*, Cuarta edición, International Thomson Editores, 1999. ↑2, 7
- [6] Ministerio de Fomento, Secretaria de Estado de Planificación e Infraestructuras y Dirección General de Carreteras, *Guía de cimentaciones en obras de carreteras*, Gobierno de España, Madrid: 2009. ↑4, 6
- [7] D. A. Bruce, A. F. DiMillio, and I. Juran, "A primer on micropiles", *Civil Engineering - ASCE*, vol. 65, no. 12, pp. 51-54, 1995. ↑4
- [8] R. Lorente, *Ejecución de micropilotes en recalce de cimentaciones*, (Tesis de grado), Escuela de ingeniería y Arquitectura de Edificación, Universidad Politécnica de Cartagena, España, 2013. ↑5, 6
- [9] Federal Highway Administration - National Highway Institute, *Micropile Design and Construction. Reference Manual*, U.S. Department of Transportation, 2005. ↑6, 8, 10
- [10] C. Viggiani, A. Mandolini, and G. Russo, *Piles and Pile Foundations*, United States of America: Spon Press, 2012. ↑8, 10
- [11] D. A. Bruce, A. W. Cadden and P. J. Sabatini, "Practical advice for foundation design - Micropiles for structural support", *Contemporary Issues in Foundation Engineering*, 2005. [https://doi.org/10.1061/40777\(156\)14](https://doi.org/10.1061/40777(156)14) ↑11, 12, 20
- [12] L. Shaw, and F. Chew, "Design & construction of micropiles", *Geotechnical Course for Pile Foundation Design & Construction*, 2003. ↑9
- [13] I. Juran, G. Weinstein, and L. Sourisseau, *Forever: Synthesis of the results of the national project on micropiles* (Research Report), 2002. ↑9
- [14] B. Sharma, S. Sarkar, and Z. Hussain "A study of parameters influencing efficiency of micropile groups", *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics*, vol. 14, pp. 11-18, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7_2) ↑9
- [15] H. Wang, D. Zhou, and T. Ma, "Pile group efficiency of micropile structure", *Third International Conference on Transportation Engineering (ICTE)*, Chengdu, China, 2011. [https://doi.org/10.1061/41184\(419\)335](https://doi.org/10.1061/41184(419)335) ↑9
- [16] N. Gogoi, S. Bordoloi, and B. Sharma, "A model study of micropile group efficiency under axial loading condition", *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 323-332, 2014. ↑9
- [17] B. Sharma and P. Buragohain, "Behaviour of micropile groups under oblique pull out loads in sand", *Indian Geotech. J.*, vol. 44, pp. 400-408, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40098-013-0091-1> ↑9
- [18] B. Vani, and P. D. Arumairaj, "Evaluation of settlement and load carrying capacity of footing with micropiles on sand", *Int. J. of Sci. Res.*, vol. 4, no. 6, pp. 44-46, 2015. ↑9
- [19] S. Jose, V. M. Prakash, and H. Paul "A model study on lateral behaviour of micropile under inclined compressive loads in sand", *Int. Res. J. Eng. and Tech.*, vol. 05, no. 4, pp. 2946-2950, 2018. ↑9
- [20] S. D. Manfred, "Numerical study on the behavior of inclined micropiles", *Proceedings of the 37th Annual Conference on Deep Foundations*, Houston, 2012. ↑9
- [21] A. K. Theinat, *3D numerical modelling of micropiles interaction with soil & rock* (Master Thesis), Faculty of the Graduate School, Missouri University of Science and Technology, United States of America, 2015. ↑9
- [22] A. K. Theinat, and R. Luna, "Load transfer mechanism of micropiles in weathered rock", *Geo-Congress*, 2019. <https://doi.org/10.1061/9780784482094.006> ↑9
- [23] A. L. Kouby, J. C. Dupla, J. Canou, and R. Francis, "The effects of installation order on the response of a pile group in silica sand", *Soil and Foundation*, vol. 56, no. 2, pp. 174-188. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.002> ↑9
- [24] D. A. Bruce, "American developments in the use of small diameter inserts as piles and insitu reinforcement", *Deep Foundation Institute*, vol. 26, pp. 11-22, 1988. ↑9
- [25] D. A. Bruce, I. Juran, and A. F. DiMillio, "High capacity grouted micropiles: The state of practice in the United States", *15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Istanbul, 2004. ↑10
- [26] D. A. Bruce, "High capacity pinpiles for structural underpinning", 1992. ↑10, 11
- [27] C. Kolev, "Tilting prevention of a four floor residential building with the assistance of micro-piles beneath the

- foundation”, 12th ISM Workshop, Poland, 2014. ↑10
- [28] K. Sternik, and T. Blejarski, “Application of micropiles to the stabilization of a deflected old tenement house”, 12 th ISM Workshop, Poland, 2014. ↑11
- [29] W. L. Snow, W. B. Wright, and W. Snow “Support of the Morris Island lighthouse using micropiles”, *13th International Workshop on Micropiles*, Canada, 2017. ↑11
- [30] C. Mendoza, R. Pinto, J. Ruge y N. Silveira, “Estudio de sistema placa-pilote con micropilotes de refuerzo auto-perforante”, *XIV Congreso Colombiano de Geotecnia y IV Congreso Suramericano de Ingenieros Jóvenes Geotécnicos*, Bogotá: Sociedad Colombiana de Geotecnia, pp. 285-292, 2014. ↑12, 20
- [31] J. Han, and S-L. Ye, “A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tension”, *Can. Geotech. J.*, vol. 43, no. 1, pp. 19-22, 2011. <https://doi.org/10.1139/t05-089> ↑12, 15, 18
- [32] J. Han, and S-L. Ye, “A field study on the behavior of a foundation underpinned by micropiles”, *Can. Geotech. J.*, vol. 43, no. 1, pp. 30-42, 2011. <https://doi.org/10.1139/t05-087> ↑12
- [33] B. Sivakumar, G. L. Srinivasa, B. Murthy, and D. S. N. Nataraj, M. S. “Bearing capacity improvement using micropiles: A case study”, *GeoSupport Conference*, 2004. [https://doi.org/10.1061/40713\(2004\)14](https://doi.org/10.1061/40713(2004)14) ↑12, 15, 20
- [34] D. Kyung, D. Kim, G. Kim, and J. Lee, “Vertical load carrying behavior and design models for micropiles considering foundation configuration conditions” *Can. Geotech. J.*, vol. 54, no. 2, pp. 234-347, 2016. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0472> ↑12, 18
- [35] V. Farhangi, and M. Karakouzian, “Design of bridge foundations using reinforced micropiles”, *International Road Federation Global R2T Conference & Expo*, Las Vegas, Nevada, USA, 2019. ↑13
- [36] Y. Tsukada, K. Miura, Y. Tsubokawa, Y. Otani, and G.-L. You, “Mechanism of bearing capacity of spread footings reinforced with micropiles” *Soils Found*, vol. 46, no. 3, pp. 367-376, 2006 <https://doi.org/10.3208/sandf.46.367> ↑13
- [37] A. M. Alnuaim, H. El Naggar, and M. H. El Naggar “Performance of micropiled raft in sand subjected to vertical concentrated load: Centrifuge modeling”, *Can. Geotech. J.*, vol. 52, no. 1, pp. 33-45, 2015. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0001> ↑13, 15, 17
- [38] N. Borthakur, and A. K. Dey, “Experimental investigation on load carrying capacity of micropiles in soft clay”, *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 43, pp. 1969-1981, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2894-3> ↑13
- [39] Y-E. Jang, and J-T, Han, “Analysis of the shape effect on the axial performance of a waveform micropile by centrifuge model tests”, *Acta Geotech.*, vol. 14, pp. 505-518, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0657-2> ↑14, 16
- [40] Y-E. Jang, B. Kim, C. Wang, and J-T. Han, “Prediction of vertical bearing capacity of waveform micropile”, *Geotechnique Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 198-204, 2019. <https://doi.org/10.1680/jgele.18.00209> ↑14
- [41] M. A. AbdIbrahim, and M. H. El Naggar, “Axial performance of micropile groups in cohesionless soil from full-scale tests”, *Can. Geotech. J.*, vol. 57, no. 7, 2020. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0695> ↑15
- [42] A. Sanzeni, and E. G. Danesi, “Behaviour of screw micropiles subjected to axial tensile and compressive loading”, *J. Geotech. Eng.*, 2019. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1673952> ↑16
- [43] Z. Guo, and L. Deng, “Field behaviour of screw micropiles subjected to axial loading in cohesive soils”, *Can. Geotech. J.*, vol. 55, no. 1, pp. 34-44, 2018. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0109> ↑16
- [44] H. Sohaei, E. Namazi, and A. Marto, “Control of pile movements induced by tunnelling using micropiles”, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, vol. 18, no. 4, pp. 191-207, 2018. <https://doi.org/10.1680/jphmg.16.00065> ↑16
- [45] D. Kim, J. Kim, and S. Jeong, “Estimation of axial stiffness on existing and reinforcing piles in vertical extension remodeled buildings”, *Eng. Struct.*, vol. 199, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109466> ↑16
- [46] Y.-E Jang, and J.-T. Han, “Field study on the axial bearing capacity and load transfer characteristic of waveform micropile”, *Can. Geotech. J.*, vol. 55, no. 5, pp. 653-665, 2017. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0155> ↑16
- [47] A. M. Alnuaim, M. H. El Naggar, and H. El Naggar, “Performance of micropiled rafts in clay: Numerical investigation”, *Comput. Geotech.*, vol. 99, pp. 42-54, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.02.020> ↑17
- [48] C. Wang, J-T. Han, and Y-E Jang, “Experimental investigation of micropile stiffness affecting the underpinning of an existing foundation”, *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 12, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9122495> ↑17

- [49] Lekshmi, R. Chacko, S. Vinod, T. Jose, and J. G. Philip, "Effect of micropile on foundation settlement", *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 07, no. 5, pp. 7375-7378, 2019 ↑17
- [50] A. Golshani, M. G. Varnusfaderani "Innovative design modification during construction of a twin tunnel using real-time field data", *Transp. Geotech.*, vol. 20, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100254> ↑18
- [51] R. Bakr "Using the micropiles technique as a settlement control tool in the underpinning of limited headroom cases", *Fourth Geo-China International Conference, Shandong, China*, 2016. ↑18
- [52] L. Wen, G. Kong, H. Abuel-Naga, Q. Li, and Z. Zhang, "Rectification of tilted transmission tower using micropile underpinning method", *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 34, no. 1, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001398](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001398) ↑18
- [53] K. Larsson, and D. Jog, "Performance of micropiles used to underpin highway bridges", *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 28, no. 3, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000426) ↑19
- [54] O. Kacar, A. Cushing, and M. R. Lewis, "High-capacity micropiles in Edmonton shale", *Eighth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Philadelphia, Pennsylvania, 2019. <https://doi.org/10.1061/9780784482094.029> ↑19
- [55] R. Ortiz y E. Ovando, "Desarrollo de presión de poro y consolidación alrededor de micropilotes inyectados en suelos blandos", *e-Gnosis*, vol. 7, no. 5, 2009. ↑20
- [56] J. H. Edens, and B. L. Fisher, "Foundation retrofit of three structures utilizing micropiles", *Structures Congress*, 2018. <https://doi.org/10.1061/9780784481325.041> ↑20

---

### Wendy Madeleyne Castellanos Guerrero

Ingeniera Civil de la Universidad Militar Nueva Granada, Tecnólogo en Topografía; investigador del grupo Modelos de Simulación ICDIST.

Correo electrónico: d7303309@unimilitar.edu.co

---

### Edgar Rodríguez Rincón

Doctor en Ingeniería Geotécnica de la Universidad de Brasilia. Magíster en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes. Profesor asistente de la Universidad Militar Nueva Granada y profesor parcial de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador del grupo Modelos de Simulación ICDIST.

Correo electrónico: edgar.rodriguez@unimilitar.edu.co

# Systematic Literature on the Improvement of the Mechanical Properties of Concrete with Fibers of Artificial-Natural Origin

*Revisión sistemática de la literatura sobre la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón con fibras de origen artificial-natural*

**Yamalit Itamar Olivera Pérez** \*<sup>1</sup>, **Sandro Piero Guevara Saravia** <sup>1</sup>,  
**Sócrates Pedro Muñoz Pérez** \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Señor de Sipán (Chiclayo, Perú).

\*Correspondence e-mail: msocrates@crece.uss.edu.pe

Recibido: 29/06/2021. Modificado: 20/09/2021. Aceptado: 15/11/2021.

## Abstract

**Context:** Ince structures are nowadays being affected due to the environment in which they are located, as well as by strong seismic movements, leading them in some cases to collapse.

**Method:** A search of scientific articles for the period 2014-2021 was carried out in different databases. 56 research works that applied fibers were collected. To this effect, keywords such as *hormigón reforzado*, reinforced concrete, and mechanical properties of concrete were used.

**Results:** The mechanical characteristics of concrete which should be prioritized for improvement should be compression resistance capacity, tensile strength, modulus of elasticity, durability properties such as resistance to chemical attack, shrinkage properties, permeability properties, and physical properties such as drying time, unit weight, erosion, and absorption.

**Conclusions:** Among the artificial fibers most used by researchers, metallic fibers stand out. In the same way, among the natural fibers, banana, rice husk, and sugar cane bagasse stand out.

**Keywords:** addition of fibers to concrete, recycled concrete, reinforced concrete

**Language:** Spanish

Open access



Cite as: Y. I. Olivera Pérez, S. P. Guevara Saravia, S. P. Muñoz Pérez. "Análisis de estructuras de carga de dos tormentas eléctricas registradas por la red Lightning Mapping Array en el Magdalena Medio colombiano". *Ing.*, vol. 27, no. 2, 2022. e18207. <https://doi.org/10.14483/23448393.18207>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## Resumen

**Contexto:** Toda vez que hoy en día las estructuras están siendo afectadas debido al medio ambiente en el que se ubican, así como por fuertes movimientos sísmicos, llevándolas en algunos casos hasta el colapso.

**Método:** Se realizó una búsqueda de artículos científicos para el período 2014-2021 en diferentes bases de datos. Se recopilaron 56 investigaciones que emplearon fibras. Para ello se utilizaron palabras claves como: hormigón reforzado, *reinforced concrete* y propiedades mecánicas del hormigón.

**Resultados:** Las características mecánicas del hormigón que debe priorizarse mejorar deben ser la capacidad de resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad, propiedades de durabilidad como la resistencia al ataque químico, las propiedades de contracción, las propiedades de permeabilidad y propiedades físicas como el tiempo de secado, el peso unitario, la erosión y la absorción.

**Conclusiones:** Entre las fibras artificiales más utilizadas por los investigadores destacan las fibras metálicas. Del mismo modo, dentro de las fibras naturales destacan la de banano, la cáscara de arroz y la de bagazo de caña de azúcar.

**Palabras clave:** adición de fibras al concreto, hormigón reciclado, hormigón reforzado

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

Un desafío del siglo XXI es lograr la compatibilidad entre la resistencia requerida y el uso de materiales de construcción ligeros. Las fibras artificiales y naturales se utilizan hoy en día como potenciadores en el campo de la ingeniería, contribuyendo en la mejora de las características mecánicas de los elementos estructurales como la resistencia a la tracción y al impacto [1]. Así por ejemplo, mejorar el rendimiento de flexión y cortante de vigas de hormigón reforzado juega un papel vital en el control del comportamiento sísmico de las estructuras de concreto [2]. Actuales falencias de elementos de gran envergadura han generado la utilización de fibras con el fin de reforzar el desempeño del hormigón [3]. El concreto convencional es deficiente con respecto a sus propiedades dinámicas, sobre todo cuando es sometido al impacto, e insensible respecto a la velocidad de carga [4]. Hormigón reforzado con fibra de acero, por ejemplo, es un material prometedor para muchas aplicaciones en las que se requieren respuestas con respecto a la tracción y a la compresión, un pequeño espesor y una gran suficiencia para absorber energía [5]. Por otro lado, el hormigón reforzado con fibra posee una gran capacidad de resistencia a la flexión, una ductilidad mejorada y una gran suficiencia para absorber energía, más que el hormigón convencional frente a cargas dinámicas [6]. Cuando el hormigón se refuerza con fibras dispersas al azar evita que se formen microgrietas que se ensanchen [7]. La combinación de varios tipos de fibras da como resultado la formación de compuestos híbridos [8], en los que un tipo de fibra podría mejorar las propiedades del hormigón fresco y evitar la formación de grietas por retracción temprana, o también podría contribuir a la mejora de la resistencia y la durabilidad del hormigón endurecido [9]. Entre las peculiaridades más sobresalientes del hormigón, que suma en sus características mecánicas, está su durabilidad, relacionada con el tiempo en función de las estructuras comprometidas a circunstancias o entornos; por lo que esta propiedad describe los campos de aplicación de nuevos componentes cementantes [10].

Nuevas tecnologías constructivas y materiales son aplicados cotidianamente con más frecuencia en la búsqueda de mejoras de calidad, considerando siempre la parte ecológica y la económica en la construcción [11]–[13], siendo prueba de ello la obtención de hormigón de buena calidad hasta con agua tratada [14]. Últimamente se ha incrementado el uso de fibras naturales como refuerzo en materiales de construcción, toda vez que tienen muchas características favorables tales como ser rígidas, livianas, económicas y ecológicas [15]; se han obtenido resultados que presentaron buenas correlaciones entre los resultados experimentales y lo previsto [16]. La utilización de hormigón elaborado con materiales reciclados, en general, es una buena alternativa para poder reducir considerablemente los recursos cuando se fabrican los materiales comúnmente utilizados como cemento y acero [17]. Así, por ejemplo, la creciente cantidad de llantas recicladas y desechos de construcción que se acumulan en los vertederos crea una gran preocupación para la estabilidad ambiental; investigadores y autoridades buscan formas de reducir y reutilizar estos materiales de desecho, promoviendo una práctica de construcción sostenible, incorporando por ejemplo fibras de caucho reciclado, derivado de las llantas, y agregado grueso reciclado para la producción de concreto [18]–[20].

En el litoral peruano también se acumula gran cantidad de residuos plásticos que podrían ser reutilizados como fibras para mejorar las características mecánicas del concreto como resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y propiedades de durabilidad como la resistencia al ataque químico [21], entre otros [22]. Hacer uso de fibras naturales comprende a desechos orgánicos como la fibra de banano [23] o plumas de aves que comúnmente son incinerados. La importancia que además tiene reutilizar estas fibras es que requiere de mano de obra [24] y, por tanto, indirectamente genera puestos de trabajo. Todos esos nuevos materiales reciclados deberían ser más explotados y estudiados por la industria y la ingeniería [25], [26].

Nuevos materiales son eventualmente evaluados en la industria de la construcción con el fin de encontrar mejoras en cada elemento estructural, buscando también la viabilidad y la factibilidad entre costo y calidad, es por eso que la mezcla de hormigón y fibras es un material ya conocido, pero es más usado con fines no estructurales como pavimentos o también para comportamientos frente al fuego, aislamiento térmico; es por eso que se busca evaluar una mezcla de hormigón adicionando fibras, esta vez para usos estructurales [27].

El objetivo de la presente investigación fue realizar una revisión literaria de estudios que estuvieron enfocados en optimizar las propiedades mecánicas del hormigón, adicionando fibras artificiales y naturales. Para ello se ejecutó una búsqueda bibliográfica de artículos científicos y de revisión, tal como se detalla en la metodología, presentándose además en los resultados un extracto de los mismos. Finalmente se presentan las conclusiones y las referencias citadas en el presente documento.

En suma, mejorar la sustentabilidad de las estructuras de hormigón a partir del uso de fibras artificiales y naturales es vital, toda vez que se busca disminuir los costos para construir, reducir el daño al medio ambiente (huella de CO<sub>2</sub> y consumo de energía) [28]–[31], optimizar el tiempo de vida útil y prevenir daños a futuro frente a los problemas recurrentes de las construcciones.

## 2. Metodología

Como parte de la revisión literaria se realizaron dos tablas, en la primera se detallan los términos clave que se emplearon en español y en inglés para la búsqueda, tales como: concreto reforzado (reinforced concrete), propiedades mecánicas del concreto (mechanical properties of concrete), adición de fibras al concreto (addition of fibers to concrete), concreto reciclado (recycled concrete) y mejoramiento del concreto (concrete improvement); tal y como se muestra en la Tabla I. Posteriormente se aplicaron filtros de búsqueda, tales como: “Texto completo”, “Revistas”, “Ingeniería”, “Ciencia de los materiales”, “Concreto” y “Fibras”, de modo que se realizó una búsqueda más puntual, a la vez que se redujo la cantidad de artículos referenciados. En la Tabla II se detalla la distribución de artículos citados en función del año de publicación y la base de datos, se hizo una búsqueda bibliográfica de artículos científicos para el período 2014-2021 en diferentes bases de datos, a saber: Scopus, EBSCOhost, ProQuest, Scielo, ScienceDirect y Redalyc, así como también se buscaron tres artículos de la revista “Ingeniería” de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En total se recopilaron 56 investigaciones relacionadas con el uso de fibras para la optimización de las propiedades mecánicas del concreto, tal y como se muestra en la Tabla II.

**Tabla I.** Resultados de la búsqueda con filtros

Base de datos	Año de publicación	Palabras clave	Resultados de búsqueda	Filtros aplicados	Resultados de artículos después de aplicar filtros	Artículos seleccionados
Scopus	2014-2021	Reinforced concrete with natural fibers	973	“Artículos” “Ingeniería”	475	21
EBSCOhost		Mechanical properties of concrete	4.276	“Texto Completo” “Reinforced Concrete”	79	15
ProQuest		Concrete adding artificial fibers	3.686	“Texto Completo” “Revistas científicas” “Concrete”	187	6
Scielo		Recycled concrete	95	“Ingeniería”	87	9
ScienceDirect		Concrete improvement adding fibers	11.718	“Engineering” “Research articles” “Cement and concrete composites”	317	5

## 3. Resultados

En el marco de utilizar fibras artificiales y naturales para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, se muestra un resumen de las principales investigaciones que emplearon dichas fibras

para mejorar las dosificaciones de concreto, las mismas que se presentan con otras complementarias en las Tablas III, IV y V.

**Tabla II.** Distribución de artículos referenciados en función del año de publicación y la base de datos

Año/Base de datos	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Total
Scopus	–	–	–	–	3	3	8	7	21
EBSCOhost	2	2	–	–	4	2	5	–	15
ProQuest	–	1	1	2	1	–	1	–	6
Scielo	1	1	1	1	1	2	2	–	9
ScienceDirect	–	1	1	1	1	–	–	1	5
<b>Total</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>16</b>	<b>7</b>	<b>56</b>

### 3.1. Aplicación de fibras artificiales para la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón

En el marco de definir ensayos para el estudio de las propiedades del hormigón, Alberti *et al.* [32] propusieron un enfoque metodológico para la caracterización del concreto armado con fibras estructurales mediante procedimientos de ensayos mecánicos como ensayos de flexión de probetas con ranuras prismáticas, ensayos de tracción y ensayos de corte puro. En esa línea, Awoyera *et al.* [33] estudiaron propiedades como el estado fresco y la absorción de agua de un concreto elaborado con desechos de baldosas cerámicas como áridos finos y botellas de tereftalato de polietileno (PET) como fibras. Los residuos cerámicos (RC) los emplearon como reemplazo del agregado fino en proporciones del 50 % y 100 % (en peso del agregado fino), y las fibras plásticas las adicionaron en proporciones de 1,5 % y 2,5 % (en peso de mezcla de hormigón). Sus resultados obtenidos indicaron que la incorporación de fibras plásticas y residuos cerámicos resultó en una disminución del valor de asentamiento; por tanto, una reducción en la trabajabilidad del concreto fresco. La muestra de hormigón con un 100 % de áridos cerámicos finos y un 2,5 % de fibras plásticas alcanzó la mayor capacidad de resistencia a la compresión, así como la capacidad de resistencia a la tracción incrementó con un mayor tiempo de curado. En general, la resistencia a la tracción del hormigón se incrementó hasta en un 45 % mediante la inclusión de un 100 % de agregados de cerámica (como reemplazo en peso del agregado fino) y un 2,5 % de fibras plásticas (en peso de mezcla de hormigón); no obstante, la absorción de agua del hormigón disminuyó al aumentar el contenido de cerámica y fibra plástica.

En esa misma línea, Lima *et al.* [34] analizaron las características físicas y mecánicas de elementos de hormigón prensado con incorporación de tereftalato de polietileno (PET) reciclado. Para ello realizaron un análisis experimental reemplazando, en volumen, agregado fino (piedra fina triturada) por fracciones de PET triturado en contenidos de 15 %, 30 % y 45 %. En función a sus resultados, concluyeron que el contenido que presentó mejores valores fue el que tuvo 15 % de PET, debido a que su resistencia a la compresión mostró un valor superior a los demás, destacando una absorción aún menor, resultado de su mayor homogeneidad y mejor envoltura del compuesto obtenido.

Entre las fibras artificiales más utilizadas por los investigadores destacan las fibras metálicas; en esa línea, Generosi *et al.* [35] analizaron el desempeño a tracción de un hormigón de ultra alto rendimiento reforzado con fibras de acero (UHPFRC, por sus iniciales en inglés, *ultra high performance fiber reinforced concrete*), a partir de ensayos de tracción directa en muestras de hueso de perro, utilizando para ello un sistema con condiciones de contorno rotativas, así como pruebas para el control de desplazamientos. Del mismo modo, emplearon la correlación de imágenes digitales (CID) para medir desplazamientos, deformaciones, número y ancho de grietas, e investigaron el efecto de las fibras de acero (tipo gancho con un diámetro de 0,38 mm y una longitud de 30 mm), sobre el comportamiento de tracción del UHPFRC, variando la cantidad de fibras desde 0 % hasta 2,6 % en volumen. Así obtuvieron que una parte de volumen de la fibra influyó significativamente en la capacidad de resistencia a la tracción del material, la deformación en la resistencia máxima y en el desempeño posterior al agrietamiento.

Por su parte, Karimipour y Ghalehnovi [2] compararon el producto de las fibras de acero y polipropileno sobre su comportamiento ante la flexión de vigas de hormigón con áridos reciclados. Inicialmente estudiaron el desempeño en flexión de vigas de hormigón fabricadas con agregado grueso reciclado (AGR), fibras de acero (FA) y fibras de polipropileno (FPP). Ensayaron un total de 54 vigas de 150 mm de ancho, 200 mm de alto y 1500 mm de longitud, con diferente distanciamiento entre armaduras transversales. Utilizaron el AGR de la demolición de un edificio como reemplazo del agregado grueso natural al 0 %, 50 % y 100 % (en términos de masa). Para mejorar el comportamiento en flexión de las vigas, adicionaron FA y FPP al 0 %, 1 % y 2 % (en términos de volumen), y las muestras se probaron bajo una configuración de flexión. Con estos ensayos, midieron la capacidad máxima de flexión, la deformación máxima en la mitad de la luz de las vigas, la ductilidad y la rigidez de las probetas; encontrándose que la influencia de las fibras de polipropileno (FPP) mejoró significativamente la capacidad de flexión de las vigas, siendo mayor que la obtenida con fibras de acero (FA); no obstante, la adición de fibras de acero (FA) sobre la deformación fue más significativa.

Tawfeeq *et al.* [36] analizaron la flexión de vigas de hormigón conformada por áridos como escoria granulada de alto horno (GBFS, del inglés *granulated blast furnace slag*) en reemplazo del cemento, agregados de bloques reciclados (ABR) en reemplazo del agregado grueso ordinario, fibra de acero, fibras de polipropileno y grapadoras. Diseñaron y ensayaron 10 vigas de hormigón armado de sección transversal de 90 mm de ancho, 150 mm de alto y 1.000 mm de longitud. Para ello prepararon un total de 10 mezclas con diferentes sustitutos (en términos de peso), a saber: ABR (0 %, 25 %, 50 % y 100 %), GBFS (0 %, 25 %, 50 % y 70 %), fibras de acero (0 %, 0,5 %, 1 % y 1,5 %); 0,5 % de fibra de acero de grapadora y 0,5 % de fibras de polipropileno (en términos de volumen). Para cada mezcla de hormigón analizaron la capacidad de resistencia a la compresión y la capacidad de resistencia a la tracción, los mismos que se redujeron al usar GBFS, ABR y fibras; así la reducción extrema de la capacidad de resistencia a la compresión y la capacidad de resistencia a la tracción por flexión fueron del 50 % y 55 %, respectivamente, para el 70 % de GBFS, el 25 % de ABR y el 0,5 % de fibra de acero. La menor disminución en la capacidad de resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción por flexión fue para una mezcla de 25 % de GBFS, 25 % de ABR y 0,5 % de fibra de acero con clavijas de grapadora. El rol de GBFS y ABR fue más eficiente en el desempeño de las vigas de hormigón armado, de ahí que hubo una mejora en la capacidad de flexión para todas las vigas que alcanzaron el 27,7 %, más aún cuando se hizo mediante el uso del

25 % de GBFS, el 25 % de ABR y el 1,5 % de fibra de acero. En suma, de acuerdo con los ensayos realizados y los resultados obtenidos, la utilización de GBFS, ABR y fibras hizo que las vigas de hormigón armado fueran más dúctiles, a partir de la mejora de sus propiedades mecánicas y de durabilidad.

En la misma línea, Carrillo *et al.* [37] realizaron una investigación cuyo objetivo fue determinar la cantidad necesaria de fibras de acero para alcanzar un rendimiento en flexión parigual que el de una losa de concreto en un terreno reforzado con malla electrosoldada, y con la cantidad de acero necesaria por contracción y temperatura. Para ello ensayaron en flexión 10 losas cuadradas cuyo lado fue de 600 mm, 100 mm de espesor y variado tipo de refuerzo, empezando por losas de concreto simple, losas con variadas proporciones de fibra de acero, a saber: 5,9 y 18 kg/m<sup>3</sup>, losas con malla electrosoldada de 5 mm de diámetro y espacios cuadrados de 150 mm x 150 mm. Emplearon curvas “carga-deflexión” para estimar la capacidad de absorción de energía vinculada a variados resultados para la flecha en el centro de la luz de la losa. Asimismo, realizaron un análisis de regresión lineal, cuyos resultados se emplearon para estimar la cantidad proporcional de fibras de acero por sustituir, y de acuerdo con un valor específico de deflexión, determinar el esfuerzo normal de la losa de concreto.

Carrillo *et al.* [38] evaluaron la reacción del ion de cloruro en la compresión del hormigón reforzado con fibras de acero RC-65/35-BN (CRFA), para lo cual ensayaron 54 muestras de CRFA en forma de probetas, identificadas con una relación longitud/diámetro = 65, con combinaciones de 27,50 y 60 kg/m<sup>3</sup>. Estudiaron la influencia de dos lugares corrosivos en los que ensayaron 18 probetas que fueron expuestas a la acción de un medio acuoso, 18 en ion cloruro (Cl-) al 3,5 % y 18 se mantuvieron sin alterar, durante 60 días. Así evidenciaron que la corrosión afectó en un 2 % la resistencia a la compresión, y hubo un incremento del 13 % en la relación de Poisson del CRFA y un descenso del 6 % del módulo de elasticidad. En suma, ambientes corrosivos a corto plazo no alteraron considerablemente las características mecánicas del hormigón añadiendo fibras de acero (CRFA); sin embargo, los autores consideran que a largo plazo sí se verían afectadas por la corrosión propiedades del hormigón como la resistencia a la compresión.

Asimismo, Akbari y Abed [39], empleando fibras de acero y vidrio, evaluaron las propiedades de hormigón, al cual adicionaron 0,3 %, 0,6 % y 0,9 % en volumen de fracción de acero y fibras de vidrio, combinadas con concreto con relaciones de agua/cemento (a/c) de 0,35 y 0,45 respectivamente. Para cada relación de agua/cemento prepararon 21 muestras de las que analizaron su resistencia a la compresión, 14 muestras cilíndricas de las que evaluaron su resistencia a la tracción y 14 muestras de las que analizaron su resistencia a la flexión. Sus productos experimentales demostraron que la adición de 0,3 % a 0,9 % de fibras de acero al concreto sumó constantemente la capacidad de resistencia a la flexión, a la compresión y a la tensión, respecto al concreto simple; sin embargo, el aumento de fibras de vidrio solo entre el 0,3 % y 0,6 % aumentó la resistencia a la compresión. En suma, sus resultados demostraron que el mejor rango para mejorar la resistencia del hormigón con fibra de acero fue el de 0,3 % a 0,9 %; mientras que para la fibra de vidrio fue de 0,3 % a 0,6 % por fracción de volumen de fibra.

Por su parte, Ortega *et al.* [40] evaluaron la viabilidad de hacer un hormigón reforzado con fibras y de muy buena trabajabilidad, así mismo propusieron utilizar escoria de acero de horno de

arco (EAF) y escoria de alto horno granulada (GGBFS); realizaron pruebas creando mezclas de hormigón reforzadas con 0.5 % (volumen de fibras) tanto en su estado fresco como en estado endurecido, y finalmente los resultados revelaron que al diseñar este hormigón con fibra artificial brindó resistencias adecuadas, así como mejor ductilidad, tenacidad, entre otras propiedades. También demostraron la excelente adherencia entre las fibras y el material cementoso; es decir, el uso de este hormigón sería viable y factible desde el punto de vista mecánico.

Otras de las fibras artificiales utilizadas por los autores referenciados en el presente artículo de revisión para la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón son las fibras de caucho; al respecto, Shahjalal *et al.* [41] estudiaron la respuesta a la flexión de vigas de concreto reforzado con fibras de caucho reciclado (CR), combinado con agregado grueso reciclado (AGR) y fibras de polipropileno (FPP). Para ello ensayaron 14 vigas de concreto reforzado, cuyas medidas fueron 150 mm de ancho, 200 mm de alto y 1.500 mm de largo. Diseñaron varias combinaciones conteniendo caucho granulado en 5 % y 10 % (en volumen, como reemplazo de la arena), fibras de acero en 0,59 % y 1,60 % (en peso de la mezcla), agregado grueso reciclado en 30 % (en volumen de la mezcla) y fibra de polipropileno en 0,5 % (en peso de la mezcla). Sus resultados evidenciaron una mejora de las características mecánicas del concreto a corto y largo plazo tras la introducción de fibra de caucho reciclado y fibras de polipropileno. Las vigas de hormigón con 30 % de AGR, 5 % de CR y 0,5 % de FPP presentaron una mejor capacidad de flexión, ductilidad y tenacidad. En suma, esta investigación demostró un nuevo camino hacia la producción más ecológica de mezclas de concreto sostenible, que podría ser replicada en estudios futuros.

En esa misma línea, Groli y Pérez [42] emplearon fibras metálicas de neumáticos reciclados con el objeto de mejorar el comportamiento en servicio del concreto, para ello realizaron tres series de ensayos, a saber: sobre vigas sujetas a dos cargas puntuales, sobre componentes de tamaño reducido y sobre vigas con amplio momento constante. Finalmente, sus resultados evidenciaron el producto efectivo de añadir fibras metálicas en el comportamiento estructural del concreto, mejorando sus condiciones de trabajabilidad, servicio y resistencia.

Por su parte, Farfán y Leonardo [17] evaluaron la resistencia a la flexión y la compresión de una mezcla de hormigón de 21 MPa adicionando aditivo plastificante a los 7, 14 y 28 días, utilizando además en su estructura caucho reciclado en 5 %, 10 % y 15 % (respecto al peso de la mezcla). Analizaron tres especímenes, adicionando aditivo plastificante y caucho reciclado, y dos especímenes de control, con y sin aditivo plastificante. Las muestras en las que se utilizó 10 % y 5 % de caucho reciclado alcanzaron valores de resistencia a la compresión de 21 MPa y 22 MPa respectivamente. Respecto a la capacidad de resistencia a la flexión, se alcanzó un valor pico de 82 MPa para la muestra conformada con un 10 % de caucho reciclado. Si bien se perdió resistencia mecánica a partir de una mayor adición de caucho reciclado, esta se mejoró a partir de la incorporación de aditivo plastificante. En suma, se obtuvo una mejora considerable en la capacidad de resistencia a flexión y compresión del hormigón, adicionando fibras de caucho reciclado y aditivos plastificantes.

Asimismo, Köroğlu [43] analizó el desenvolvimiento de un hormigón compuesto autocompactante (SCC, del inglés *self-compacting concrete*) reforzado con cables de acero de neumáticos reciclados. Primero indagó sobre las características frescas y fraguadas de las mezclas habituales y las reforzadas con fibras de acero, y luego analizó 16 vigas de diferentes capas con una prueba

de flexión de cuatro puntos, teniendo en cuenta variados espesores de capas y fracciones de fibras. En suma, como una de sus conclusiones, refiere que aparte de darle utilidad a desechos que afectan el medio ambiente, como es el caso de neumáticos reciclados, estos se pueden reutilizar y extraer algunos componentes como sus fibras de acero y emplearlas para mejorar el comportamiento en compresión y flexión de elementos estructurales que están constituidos por mezclas de hormigón.

A continuación, de manera complementaria a las investigaciones líneas arriba descritas, en la Tabla III se muestra un resumen de las referencias utilizadas en la presente revisión, aquí se especifica el tipo de fibra artificial utilizada, el tipo de cemento, la relación agua/cemento y la resistencia alcanzada en MPa por los especímenes ensayados. Vale precisar que algunas referencias se mencionan en las Tablas III, IV y V porque no realizaron directamente ensayos ni obtuvieron resultados de laboratorio; sin embargo, presentan definiciones y el estado de arte sobre fibras utilizadas en la mejora de las propiedades del concreto.

### 3.2. Aplicación de fibras naturales para la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón

Elbehiry *et al.* [1], [15] refieren que últimamente se ha incrementado el uso de fibras naturales como refuerzo en materiales de construcción, toda vez que tienen muchas características favorables, como ser fuertes, livianas, económicas y ecológicas. Es así que realizaron un análisis de elementos finitos de vigas reforzadas con barras de fibra de banano (BFB), para ello diseñaron vigas compuestas de estas fibras naturales, y bajo una carga puntual llevaron a cabo varios análisis mediante el programa de elementos finitos no lineal ANSYS. Sus estudios experimentales se realizaron sobre un grupo de siete de vigas de hormigón con el objeto de: (1) definir los valores más críticos del comportamiento en flexión de vigas de hormigón reforzado con fibra de banano, (2) estudiar los aspectos de las barras de fibra de banano, (3) estudiar el comportamiento de las barras de fibra de banano en las mezclas de hormigón, y (4) estudiar el efecto de las fibras de banano con diferentes calidades de hormigón. Sus resultados mostraron que el uso de fibras de banano como material de refuerzo aumentó significativamente la capacidad de resistir el agrietamiento y el descascarado en las vigas de hormigón, por lo que el uso de estas fibras como refuerzo proporcionó una mayor resistencia a la flexión con un 25 % en relación con el hormigón simple convencional.

En esa misma línea de emplear fibras de banano, Loganathan y Thirugnanam [6] realizaron un estudio experimental en el que indagaron sobre las propiedades mecánicas de un concreto híbrido añadiendo fibras de acero y fibras de banano. Para ello realizaron ensayos de laboratorio con un hormigón en condiciones normales y un hormigón fibroso, de los cuales analizaron propiedades mecánicas como capacidad de resistencia a la compresión, capacidad de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, y propiedades de durabilidad como resistencia al ataque químico. Diseñaron mezclas de hormigón preparadas con contenidos óptimos de fibra y también sin añadir fibras (hormigón normal), a saber: vigas de concreto armado con hormigón grado M30, reforzadas con acero grado Fe415 como refuerzo principal y fibras de banano como refuerzo secundario. Estos elementos estructurales se sometieron a cargas cíclicas para evaluar su comportamiento en condiciones de carga sísmica simulada, a partir de lo cual se obtuvo que el desempeño de vigas de hormigón armado con fibra híbrida es relativamente mejor que el de las vigas de hormigón convencional. En

**Tabla III.** Fibras artificiales utilizadas en la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón

<b>Fibras artificiales</b>	<b>Tipo de cemento</b>	<b>Relación agua/cemento (a/c)</b>	<b>Proporciones de fibra en peso y/o volumen</b>	<b>Resistencia alcanzada (MPa)</b>	<b>Referencia</b>
<b>Plástico</b>	Cemento Portland tipo I	0,3 y 0,4	20 %	Compresión: 70	[11]
<b>Plástico marino</b>	Cemento Portland ordinario	0,58	2,5 %, 5 %, 7,5 % y 10 %	Compresión: 19	[21]
<b>Tereftalato de polietileno</b>	Cemento Portland CP II Z - 32	0,5	15 %, 30 % y 45 %	No se detalla	[34]
<b>Polietileno</b>	Cemento Portland ordinario	0,5	1,5 % y 2,5 %	Compresión: 25	[33]
<b>Acero y polipropileno</b>	Cemento Portland ordinario	No se detalla	0 %, 1 % y 2 %	No se detalla	[2]
<b>Acero</b>	Cemento Portland CEM I 52.5 R	0,2	0 % a 2,6 %	Compresión: 29	[35]
<b>Acero</b>	Cemento Portland tipo I	0,5	20 %	Compresión: 29	[9]
<b>Acero ZP-306</b>	Cemento Portland ordinario	0,6	0 %, 25 %, 50 % y 100 %	Compresión: 26 a 36	[5]
<b>Acero</b>	Cemento Portland ordinario	0,55	15 % a 35 %	Compresión: 23	[44]
<b>Acero y vidrio</b>	Cemento Portland ordinario	0,35 y 0,45	0,3 %, 0,6 % y 0,9 %	Compresión: 54	[39]
<b>Acero RC-65/35- BN</b>	Cemento Portland convencional tipo I	0,58	10 % a 25 %	Compresión: 36 a 46	[38]
<b>Acero</b>	Cemento Portland ordinario	0,5 y 0,69	0,66 % y 1,1 %	Compresión: 38	[32]
<b>Acero</b>	Cemento Portland CEM I 42.5 R	0,42	1 % a 5 %	Compresión: 45	[43]
<b>Metales</b>	Cemento Portland ordinario	0,42	0,5 % y 1 %	Compresión: 49 y 66	[4]
<b>Metales reciclados</b>	Cemento Portland Ordinario	0,5	0,5 % a 1,3 %	Compresión: 34	[42]
<b>Caucho</b>	Cemento Portland tipo I	0,48	10 % a 20 %	Compresión: 33	[17]
<b>Caucho y polipropileno</b>	Cemento Portland ordinario	0,5	0 % y 0,5 %	Compresión: 31	[41]
<b>Aditivo + nanosílice</b>	Cemento Portland tipo I	0,2	1 % a 1,5 %	Compresión: 62	[22]
<b>Escoria granulada de alto horno</b>	Cemento Portland ordinario	0,3	0 %, 20 %, 30 % y 40 %	Compresión: 56	[36]

lugar de considerar un solo tipo de fibra, la combinación de dos tipos (acero y banano) aumentó sustancialmente la ductilidad y el grado de absorción de energía; además, el fenómeno representa y es particularmente adecuado para estructuras ubicadas en áreas sísmicas.

**Tabla IV.** Fibras naturales utilizadas en la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón

Fibras naturales	Tipo de cemento	Relación agua/cemento (a/c)	Proporciones de fibra en peso y/o volumen	Resistencia alcanzada (MPa)	Referencia
Corteza de plátano	Cemento Portland	0,3	1,8 %	Compresión: 25	[1]
Corteza de plátano	Cemento Portland	0,3	25 %	Compresión: 18	[15]
Bagazo de caña de azúcar	Cemento Portland	0,48	2,5 %	Compresión: 41	[23]
Bagazo de caña de azúcar	Cemento Portland ordinario	0,56	0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % y 10 %	Compresión: 30	[45]
Bonote (coco)	Cemento estabilizado	0,45 y 0,6	1 % a 5 %	Compresión: 11	[46]
Cáscara de arroz	Cemento Portland tipo I	0,5	20 %	Compresión: 29	[9]
Cáscara de arroz	Cemento Portland	0,45	10 %	Compresión: 57	[28]
Cáscara de arroz	Cemento Portland	0,55	2,5 %, 5 %, 7,5 % y 10 %	Compresión: 32	[47]
Escoria de carbón	Cemento Portland tipo I	0,45	25 %	Compresión: 36	[48]

Otro de los componentes naturales utilizados hoy en día para la mejora de las propiedades del concreto son las cenizas, en ese contexto, Bheel *et al.* [45] analizaron las propiedades mecánicas del hormigón después de combinar cenizas de fibra de caña de azúcar con piedra caliza. Para ello evaluaron las propiedades del hormigón fresco y endurecido mediante la sustitución del cemento por cenizas de caña de azúcar (SCBA, del inglés sugarcane bagasse ash) y finos de piedra caliza (LSF, del inglés lime stone fines). El cemento fue reemplazado por cenizas y finos de piedra caliza en 0 % (0 % SCBA + 0 % LSF), 5 % (2,5 % SCBA + 2,5 % LSF), 10 % (5 % SCBA + 5 % LSF), 15 % (7,5 % SCBA + 7,5 % LSF) y 20 % (10 % SCBA + 10 % LSF), respecto al peso del cemento. Para ello utilizaron un total de 60 probetas de hormigón con proporción de mezcla de 1:1.5:3 y una relación a/c de 0,56, las mismas que se ensayaron para determinar la capacidad de resistencia a la compresión y resistencia a la tracción por rotura a los 7 y 28 días respectivamente. Sus resultados demostraron que la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción aumentaron en un 10,33 % y 10,10 %, para la proporción de 5 % de cenizas de caña de azúcar + 5 % de finos de piedra caliza, como reemplazo del cemento, después del día 28; sin embargo, la resistencia a la compresión del hormigón disminuyó a medida que aumentaba el contenido de cenizas de fibra de caña de azúcar y finos de piedra caliza.

Por otro lado, Deep y Dulal [46] realizaron un estudio de las propiedades de ingeniería de bloques de tierra apisonada reforzados con fibra no estabilizada y estabilizada con cemento. Investigaron el efecto de la cantidad de fibra de coco (bonote), la longitud y el contenido de cemento sobre las propiedades de bloques de tierra apisonada en términos de resistencia, densidad y durabilidad, seguido de la estimación de las propiedades mediante un análisis de regresión estadístico. Como refuerzo utilizaron bonote de 1 % a 5 % en peso, con longitudes de 25 mm a 50 mm, además de 10 % de cemento como estabilizador; así la resistencia a la compresión en seco aumentó, habiendo considerado 1 % de bonote de 25 mm de longitud. Disminuyó gradualmente con el aumento del

**Tabla V.** Otros materiales utilizados para la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón

Materiales	Tipo de cemento	Relación agua/cemento (a/c)	Proporciones de fibra en peso y/o volumen	Resistencia alcanzada (MPa)	Referencia
<b>Ceniza volante</b>	Cemento Portland CPS 30R	0,6	20 %, 40 % y 60 %	Compresión: 35	[8]
<b>Cenizas volantes y escoria de alto horno</b>	Cemento Portland ordinario	0,48	2,6 %	Compresión: 44	[10]
<b>Ceniza volante</b>	Cemento puzolánico tipo IP	0,56	2,5 %, 5 %, 10 % y 15 %	Compresión: 22	[24]
<b>Ceniza volante</b>	Cemento Portland ordinario	0,4	No se detalla	Compresión: 18	[51]
<b>Ceniza volante</b>	Cemento Portland ordinario	0,33	15 %, 20 %	Compresión: 67	[52]
<b>Nitrato de potasio (KNO<sub>3</sub>)</b>	Cemento Portland tipo III	0,45	No se detalla	Compresión: 30	[14]
<b>Agregados reciclados</b>	Cemento Portland ordinario	0,34	No se detalla	Compresión: 6. Módulo de rotura: 2	[25]
<b>Agregado de bloque de arcilla triturado</b>	Cemento Portland ordinario	0,7	No se detalla	Compresión: 11	[53]
<b>Concreto reciclado</b>	Cemento Portland V-ARI	0,8	No se detalla	Compresión: 8	[54]
<b>Concreto reciclado</b>	Cemento Portland ordinario	0,3	No se detalla	Compresión: 34	[55]

porcentaje y la longitud de la fibra; no obstante, la resistencia a la tracción aumentó con el incremento del porcentaje y la longitud del bonote. Los bloques de tierra apisonada estabilizada con cemento (CSRE, del inglés *cement stabilized rammed earth*) reforzados con fibra de bonote al 1 % y 3 % con longitudes de 25 mm y 50 mm respectivamente cumplieron los criterios de durabilidad especificados por normas como la ASTM D-698-12. Las propiedades de resistencia y durabilidad se vieron mejoradas con la estabilización con cemento, toda vez que se redujo la porosidad de la microestructura del material, al igual que el refuerzo de bonote junto con el cemento, que aumentó la eficiencia de las muestras de tierra apisonada. Con base en el análisis estadístico realizado para predecir la resistencia a la compresión y la tracción, correlacionando el porcentaje de fibra de coco, la longitud, la densidad y el contenido de cemento, se elaboraron ecuaciones a partir del análisis de regresión, presentándose una fuerte correlación entre los valores reales y previstos, que se pueden utilizar para la predicción precisa de las propiedades de tierra apisonada.

Por su parte, Venites *et al.* [21] evaluaron las características mecánicas del hormigón elaborado con fibras de plástico marino desechado, para lo cual elaboraron dosificaciones de hormigón convencional y con sustitución del 2,5 %, 5 %, 7,5 % y 10 %, en masa de los agregados finos. Después de realizar las dosificaciones elaboraron muestras cilíndricas de diámetro 150 mm x 300 mm de altura y estudiaron el *slump* (asentamiento), la densidad, el módulo de elasticidad y la resistencia. Sus resultados evidenciaron que un incremento de la cantidad de plástico genera una reducción del *slump*, así como un incremento de la resistencia y del módulo de elasticidad. Las muestras con reemplazos del 7,5 % evidenciaron una mejora de la capacidad de resistencia a la compresión (18,19 MPa) similar al 90,5 % del convencional (20 MPa). En suma, sus resultados hallados representan información relevante que incentiva a la reutilización de residuos plásticos del mar para la producción de hormigón con resistencia moderada.

En la misma línea, Alvarado *et al.* [12], reemplazando la arena por plástico reciclado, analizaron la capacidad de resistencia a la compresión de bloques de hormigón. Elaboraron para ello bloques con agregado de polvillo proveniente de industrias, polietileno de baja densidad (PEBD), polietileno de alta densidad (PEAD) y polipropileno (PP). Así adicionaron en peso de material de hormigón, 12 % de polvillo, 8 % de PEBD, 16 % de PEAD y 20 % de PP, habiéndose obtenido que con el PEBD y PP adicionados en un 5 % cada uno, se superó el fraguado del concreto a los 28 días, alcanzando la resistencia máxima a la compresión los  $2 \pm 0,3$  MPa. En suma, es factible realizar bloques de hormigón con agregados plásticos reciclado. Se encontró que para el PP es posible realizar bloques entre 20 y 12 % de agregado, para el PEBD solo es posible con agregados de 5 %, mientras que para el polvillo y PEAD no es posible realizar bloques agregando entre 20 y 12 %. Vale indicar que la forma y granulometría en la que se encuentra el plástico reciclado puede ser un ruido no controlado en los ensayos, lo cual influye significativamente en la cantidad que se agrega al bloque a elaborar, y que podría ser estudiado en trabajos futuros.

A continuación, de manera complementaria a las investigaciones descritas, en la Tabla IV se muestra un resumen de las referencias utilizadas en la presente revisión, aquí se especifica el tipo de fibra natural utilizada, el tipo de cemento, la relación agua/cemento y la resistencia alcanzada en MPa por los especímenes ensayados. Vale precisar que algunas referencias se mencionan en la Tabla IV porque no realizaron directamente ensayos ni obtuvieron resultados de laboratorio; sin embargo, presentan definiciones y el estado de arte sobre fibras naturales utilizadas en la mejora de las propiedades del concreto.

### 3.3. Otras aplicaciones para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón

Bheel *et al.* [47] evaluaron los efectos de las cenizas de cáscara de arroz (CCA) y cenizas volantes (CV) sobre las propiedades mecánicas del hormigón, sustituyendo parcialmente al cemento. El cemento fue reemplazado en peso con CCA y CV en un 5 % (2,5 % CCA + 2,5 % CV), 10 % (5 % CCA + 5 % CV), 15 % (7,5 % CCA + 7,5 % CV) y 20 % (10 % CCA + 10 % CV). Ensayaron 90 muestras de hormigón con proporciones de mezcla de 1:2:4 y una relación a/c de 0,55. Emplearon probetas cúbicas y cilíndricas para medir la resistencia a la tracción y la compresión, respectivamente, después de 7 y 28 días. Sus resultados mostraron que después de 28 días la resistencia a la compresión de la muestra al 5 % de CCA + 5 % de CV mejoró en un 16,14 % y la resistencia a la tracción mejoró en un 15,20 % en comparación con la muestra de hormigón tradicional. Asimismo, el valor de asentamiento de la muestra disminuyó a medida que aumentaba el contenido de CCA y CV.

Mejias y Águila [11] evaluaron la resistencia a la compresión de morteros elaborados con cemento, aditivo súper plastificante y puzolana, con el objeto de producir hormigón de alta resistencia. Microsílice fue la puzolana empleada y policarboxilato el súper plastificante, este último permitió reducir la relación agua/cemento. Desarrollaron dos fases en laboratorio, en la primera determinaron la proporción adecuada de cemento-microsílice en función de la resistencia a compresión, con variadas dosificaciones de estos componentes. En la segunda etapa definieron la proporción necesaria de aditivo súper plastificante para disminuir la relación a/c a valores entre 0,30 y 0,40; y con ello aumentar la resistencia a compresión, teniendo como objetivo sobrepasar los 70 MPa. En

función de sus resultados, la mayor resistencia se alcanzó cuando se adicionó 20 % de microsílíce respecto al material cementante y cuando se adicionaron 11,60 litros de policarboxilato por cada  $\text{m}^3$  de concreto. Con esta conjugación a los 28 días la resistencia a la compresión alcanzó los 79,3 MPa; no obstante, para la adición de 15 % de microsílíce solo se necesitaron 10,2 litros de policarboxilato y se logró una resistencia de 74,3 MPa, valor óptimo y con virtudes económicas.

Shariful *et al.* [50], en el marco de mejorar las propiedades de materiales adicionando componentes reciclados, evaluaron la capacidad de los residuos industriales tales como las cenizas volantes (CV), junto al cemento, como estabilizadores para la producción de bloques de tierra estabilizada comprimida (CSEB, del inglés *compressed stabilized earth block*). Para ello consideraron una combinación diferente de cemento y cenizas volantes para preparar CSEB (5 % a 10 % de cemento y 5 % a 25 % de CV, por peso de suelo seco), y para encontrar la composición de mezcla óptima en términos de resistencia, durabilidad y deformación. Es así que con el aumento del contenido de cemento, la resistencia de los bloques aumentó gradualmente; sin embargo, con la adición de cenizas volantes la resistencia se incrementó hasta un cierto límite y luego comenzó a disminuir. Se obtuvo que la inclusión de 7 % a 8 % de cemento y 15 % a 20 % de cenizas volantes proporcionó una resistencia a la compresión en seco adecuada ( $>5$  MPa), una resistencia a la compresión de húmedo a seco ( $>0,33$  MPa) y una durabilidad suficiente en términos de absorción de agua ( $<20$  %), según lo recomendado por el British Standard and Standards Australia. Con un contenido de cemento definido y con el incremento de cenizas volantes, la deformación máxima y la deformación por falla aumentaron; lo que indicaba una capacidad de deformación mejorada de los bloques debido a la inclusión de cenizas volantes. Además, el módulo de elasticidad mejoró al aumentar la cantidad de cemento y cenizas volantes tanto en estado seco como húmedo. Finalmente se concuerda con lo referido por los autores, quienes indican que los CSEB preparados con cemento y cenizas volantes como estabilizadores pueden utilizarse como materiales de construcciones ecosostenibles; además, esto da paso a otras líneas de investigación para el estudio de materiales reciclados como plástico, vidrio y polímeros.

## 4. Conclusiones

Se realizó una búsqueda sistemática de artículos científicos y de revisión referentes al mejoramiento de las propiedades mecánicas del hormigón adicionando fibras artificiales y naturales. Se concluye que entre las fibras artificiales más utilizadas por los investigadores destacan las fibras metálicas, con una relación promedio agua/cemento de 0,42, una proporción promedio de fibra de 0,5 % a 1 %, permitiendo alcanzar así resistencias promedio en compresión de entre 49 y 66 MPa. Vale indicar además que entre las fibras artificiales aplicadas para mejorar las propiedades del concreto también destacan las fibras de caucho reciclado, las fibras de plástico, las fibras de vidrio y las cenizas volantes provenientes de industrias, que, si bien no son directamente fibras, derivan de las antes mencionadas.

En el marco de la aplicación de fibras naturales para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, se identificaron las fibras de banano, fibras del bagazo de caña de azúcar, fibras de bonote, fibras de cascarilla del arroz, fibras de cascarilla de café, entre otras.

Se concluye que los compuestos cementosos de ingeniería (CCI) tienen excelentes propiedades mecánicas que los hacen adecuados para aplicaciones de construcción y reparación; no obstante, el alto costo y el suministro limitado de la arena de sílice comúnmente utilizada como único agregado ha limitado su uso generalizado. De ahí que proponen el uso de hormigón reciclado, pues como parte de su evaluación de sostenibilidad y costo realizado, indican que el uso de hormigón reciclado como agregado en mezclas es sostenible y económico.

Finalmente indicar que mejorar la calidad de las estructuras de hormigón a partir del uso de fibras artificiales como naturales es vital, toda vez que se busca optimizar el tiempo de vida útil y prevenir daños a futuro frente a los problemas recurrentes de las construcciones.

## Referencias

- [1] A. Elbehiry, and M. Mostafa, “Finite element analysis of beams reinforced with banana fiber bars (BFB)”, *Fibers*, vol. 8, no. 8, 2020. <https://doi.org/10.3390/fib8080052> ↑2, 9, 11
- [2] A. Karimipour, and M. Ghalehnovi, “Comparison of the effect of the steel and polypropylene fibres on the flexural behaviour of recycled aggregate concrete beams”, *Structures*, vol. 29, pp. 129-146, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.013> ↑2, 6, 10
- [3] E. P. Sumukh, S. K. Goudar, and B. B. Das, “A Review on the Properties of Steel-Concrete Interface and Characterization Methods”, *Smart Tech. Sustain. Devel.*, vol. 78, pp. 167-203, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5001-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5001-0_15) ↑2
- [4] G. Sanz Diéz de Ulzurrun Casals y C. Zanuy Sánchez, “Caracterización del comportamiento en flexión del hormigón reforzado con fibras sometido a impacto”, *Hormigón y Acero*, vol. 68, no. 282, pp. 139-145, 2017. ↑ 2, 10
- [5] J. Carrillo, A. P. Barrera Peñaloza y D. A. Acosta, “Evaluación del desempeño a tensión por compresión diametral del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306”, *Ing. Competitividad*, vol. 16, no. 1, pp. 261-272, 2014. ↑2, 10
- [6] P. Loganathan, and G. S. Thirugnanam, “Experimental study on mechanical properties and durability properties of hybrid fibre reinforced concrete using steel and banana fibres”, *J. Struc. Eng.*, vol. 44, no. 6, pp. 577-585, 2018. ↑ 2, 9
- [7] L. J. Rodríguez, W. A. Sarache y C. E. Orrego, “Compuestos de poliéster reforzados con fibra de plátano/banano (Musa paradisiaca) modificada químicamente. Comparación con fibra de vidrio y fique (Furcraea andina)”, *Información Tecnológica*, vol. 25, no. 5, pp. 27-34, 2014. ↑2
- [8] C. A. Juárez Alvarado, J. R. González López, J. M. Mendoza Rangel y A. A. Zaldivar Cadena, “Compuestos cementantes fibroreforzados de bajo impacto ambiental comportamiento mecánico”, *Alconpat*, vol. 7, no. 2, pp. 135-147, 2017. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i2.189> ↑2, 12
- [9] E. d. J. Vidaud Quintana, “Uso de fibras metálicas y naturales como adición al concreto”, *Construcción y Tecnología en Concreto*, p. 12, 2016. ↑2, 10, 11
- [10] G. Valencia Saavedra, E. Angulo Ramírez y R. Mejía de Gutiérrez, “Resistencia química de concretos de activación alcalina ceniza volante/escoria: sulfatos y ácidos”, *Informador Técnico*, vol. 82, no. 1, pp. 67-77, 2018. <https://doi.org/10.23850/22565035.1351> ↑2, 12
- [11] L. S. Mejías Guevara y I. Águila Arboláez, “Estudio de la resistencia a la compresión de morteros a base de cemento, puzolana, y superplastificante para su aplicación en concreto de alta resistencia”, *Rev. de la Fac. de Ing.*, vol. 33, no. 3-4, 2018. ↑3, 10, 13
- [12] M. B. Alvarado Bawab, S. Vega y J. Marín, “Elaboración de bloques de concreto con agregados plásticos reciclados”, *Informador Técnico*, vol. 82, no. 2, pp. 38-40, 2018. ↑3, 13
- [13] W. A. Castro López, H. A. Rondón Quintana y J. C. Barrero Calixto, “Evaluación de las Propiedades Reológicas y Térmicas de un Asfalto Convencional y Uno Modificado con un Desecho de PEBD”, *Ing.*, vol. 21, no. 1, pp. 7-18, 2016. ↑3
- [14] A. C. Velezmoro Capaldo, H. A. Blanco y C. Peñuela, “Influencia del nitrato presente en el agua de mezclado sobre las propiedades físicas del concreto”, *Rev. de la Fac. de Ing.*, vol. 29, no. 2, pp. 61-67, 2014. ↑3, 12

- [15] A. Elbehiry, O. Elnawawy, M. Kassem, A. Zaher, N. Uddin, and M. Mostafa, "Performance of concrete beams reinforced using banana fiber bars", *Case Studies in Construction Materials*, vol. 13, no. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00361> ↑3, 9, 11
- [16] D. Armas Ruiz, S. Ruiz Galarza, M. Piovan, L. Carrión Matamoros y C. Narváez Muñoz, "Caracterización de propiedades mecánicas de las fibras de banano de la corteza y el cuerpo del tallo", *Científica*, vol. 20, no. 1, pp. 21-31, 2016. ↑3
- [17] M. Farfán y E. Leonardo, "Caucho reciclado en la resistencia a compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante", *Ing. de Construcción*, vol. 33, no. 3, pp. 241-250, 2018. ↑3, 8, 10
- [18] G. J. Peláez Arroyave, S. M. Velásquez Restrepo y D. H. Giraldo Vásquez, "Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura", *Cienc. Ing. Neogranad.*, vol. 27, no. 2, pp. 27-50, 2017. <https://doi.org/10.18359/rcin.2143> ↑3
- [19] A. Alnedawi, and M. A. Rahman, "Recycled concrete aggregate as alternative pavement materials: Experimental and parametric study", *J. Transp. Eng. B: Pavements*, vol. 147, no. 1, 2021. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000231> ↑3
- [20] O. O. Rodríguez Rubio, A. E. Fernández Muñoz y H. A. Vacca Gámez, "Comportamiento de un material granular con adición de concreto hidráulico reciclado en Colombia", *Carreteras*, no. 217, pp. 66-72, 2018. ↑3
- [21] J. F. Venites Mosquera, Y. M. Córdoba Palacios, K. P. Mena Ramírez y O. F. Arbeláez Pérez, "Propiedades mecánicas de concretos modificados con plástico marino reciclado en reemplazo de los agregados finos", *Politécnica*, vol. 16, no. 31, pp. 77-84, 2020. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v16n31a6> ↑3, 10, 12
- [22] A. Pajuelo Amez y A. Pómez, "Concreto de alto desempeño utilizando nanosílice", *Concreto al día - ACI Perú*, pp. 40-46, 2015. ↑3, 10
- [23] B. M. Paricaguán Morales y J. L. Muñoz Cuevas, "Estudio de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar", *Ingeniería UC*, vol. 26, no. 2, pp. 202-212, 2019. ↑3, 11
- [24] S. Huaquisto Cáceres y G. Belizario Quispe, "Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento", *Rev. Investig. Altoandín*, vol. 20, no. 2, pp. 225-234, 2018. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.366> ↑3, 12
- [25] V. A. Ulloa Mayorga, M. A. Uribe Garcés, D. P. Paz Gómez, Y. A. Alvarado, B. Torres, and I. Gasch, "Performance of pervious concrete containing combined recycled aggregates", *Ing. Investig.*, vol. 38, no. 2, pp. 34-41, 2018. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n2.67491> ↑3, 12
- [26] N. Rojas Arias, L. J. Torres Parra, M. P. Espinoza Merchán, and P. M. Cocha Vesga, "Recovery and incorporation of expanded polystyrene solid waste in light-weight concrete", *Ing.*, vol. 25, no. 3, pp. 237-249, 2020. <https://doi.org/10.14483/23448393.15681> ↑3
- [27] A. Aguado, L. Agulló, A. De la Fuente, S. H. Pialarissi Cavalero y L. Segura-Castillo, "Innovaciones del hormigón con fibras estructural", VI Congreso Nacional de Ingeniería Civil Valencia, 2015. ↑3
- [28] T. Shanmuga Priya, A. Mehra, S. Jain, and K. Kakria, "Effect of graphene oxide on high-strength concrete induced with rice husk ash: mechanical and durability performance", *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 6, no. 1, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00378-9> ↑3, 11
- [29] B. Li, W. Huang, B. Luo, and G. Chen, "Cycle behaviour of precast composite wall with different ecological filled blocks", *Adv. Struct. Eng.*, vol. 22, no. 2, 2019. <https://doi.org/10.1177/1369433218785212> ↑3
- [30] C. Lacerda Gomes, F. S. Jacques Poggiali y R. Cabral de Azevedo, "Concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e adições minerais: uma análise bibliográfica", *Matéria*, vol. 24, no. 2, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0673> ↑3
- [31] D. Macanjo Ferreira, E. Luso, M. Lurdes Cruz, L. M. R. Mesquita, and G. Gontijo, "Fire behaviour of ecological soil-cement blocks with waste incorporation: Experimental and numerical analysis", *J. Fire Sci.*, vol. 38, no. 2, 2020. <https://doi.org/10.1177/0734904119893921> ↑3
- [32] M. G. Alberti, A. Picazo, J. C. Gálvez, and A. Enfedaque, "New methodological approach towards a complete characterization of structural fiber reinforced concrete by means of mechanical testing procedures", *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 14, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10144811> ↑5, 10
- [33] P. O. Awoyera, O. B. Olalusi, and N. Iweriebo, "Physical, strength, and microscale properties of plastic fiber-reinforced concrete containing fine ceramics particles", *Materialia*, vol. 15, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100970> ↑5, 10
- [34] J. M. Lima Barreto, H. Nogueira da Costa, L. F. Cândido y A. E. Bezerra Cabral Correio, "Análise das propriedades físicas e mecânicas de blocos de concreto prensados sem função estrutural com incorporação de PET reciclado",

- Matéria*, vol. 24, no. 2, pp. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0672> ↑5, 10
- [35] N. Generosi, J. Donnini, and V. Corinaldesi, “Characterization of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) tensile behaviour”, *Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations*, vol. 30, pp. 1068-1078, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58482-5\\_94](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58482-5_94) ↑6, 10
- [36] W. M. Tawfeeq, T. K. Mohammed Ali, Y. Al-Kumzari, M. Al-Hosni, K. Al-Fazari, M. Al-Bedwawi, and A. Al-Bashkardi, “Flexural performance of reinforced concrete beams made by using recycled block aggregates and fibers”, *Innov. Infrastruct. Solut.* vol. 6, no. 38, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00402-y> ↑6, 10
- [37] J. Carrillo, D. Silva y M. Sánchez, “Desempeño de losas de concreto sobre terreno reforzadas con malla electrosoldada o fibras de acero”, *Ing. Investig. Tecnol.*, vol. 17, no. 4, pp. 499-510, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.11.009> ↑7
- [38] J. Carrillo, J. Cárdenas Pulido y W. Aperador Chaparro, “Efecto del ion cloruro sobre las propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras de acero RC-65/35-BN”, *Ing. Desarro.*, vol. 33, no. 2, pp. 149-171, 2015. ↑7, 10
- [39] J. Akbari, and A. Abed, “Experimental evaluation of effects of steel and glass fibers on engineering properties of concrete”, *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 54, pp. 116-127, 2020. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.54.08> ↑7, 10
- [40] V. Ortega-López, A. García-Llona, V. Revilla-Cuesta, A. Santamaría y J. San José, “Fiber-reinforcement and its effects on the mechanical properties of high-workability concretes manufactured with slag as aggregate and binder”, *J. Build. Eng.*, vol. 43, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102548> ↑7
- [41] M. Shahjalal, K. Islam, J. Rahman, K. S. Ahmed, M. R. Karim y A. M. Billah, “Flexural response of fiber reinforced concrete beams with waste tires rubber and recycled aggregate”, *J. Cleaner Produc.*, vol. 278, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123842> ↑8, 10
- [42] G. Grolí y A. Pérez Caldentey, “Mejora de la sostenibilidad y el comportamiento en servicio de estructuras de hormigón mediante el uso de fibras metálicas recicladas”, *Hormigón y Acero*, vol. 69, no. 286, pp. 223-233, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.hya.2017.07.002> ↑8, 10
- [43] M. A. Köroğlu, “Behavior of composite self-compacting concrete (SCC) reinforced with steel wires from waste tires”, *Rev. Construc.*, vol. 17, no. 3, pp. 484-498, 2019. <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.484> ↑8, 10
- [44] A. S. Carey, I. L. Howard, D. A. Scott, R. D. Moser, J. Shannon y A. Knizley, “Impact of materials, proportioning, and curing on ultra-high-performance concrete properties”, *Materials Journal ACI*, vol. 117, no. 1, pp. 213-222, 2020. ↑10
- [45] N. Bheel, A. S. Memon, I. A. Khaskheli, N. M. Talpur, S. M. Talpur y M. A. Khanzada, “Effect of sugarcane bagasse ash and lime stone fines on the mechanical properties of concrete”, *Eng. Tech. Applied Sci. Res.*, vol. 10, no. 2, pp. 5534-5537, 2020. <https://doi.org/10.48084/etasr.3434> ↑11
- [46] S. S. Deep Raavi, and D. Dulal Tripura, “Predicting and evaluating the engineering properties of unstabilized and cement stabilized fibre reinforced rammed earth blocks”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120845> ↑11
- [47] N. Bheel, M. A. Jokhio, J. A. Abbasi, H. B. Lashari, M. I. Qureshi, and A. S. Qureshi, “Rice husk ash and fly ash effects on the mechanical properties of concrete”, *Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 5402-5405, 2020. ↑11, 13
- [48] R. A. Robayo Salazar, P. E. Matthey Centeno, Y. F. Silva Urrego y S. Delvasto Arjona, “Comportamiento en estados fresco y endurecido de un concreto autocompactante, adicionado con escoria de carbón, y elaborado con agregado grueso de concreto reciclado”, *Informador Técnico*, vol. 78, no. 2, pp. 128-139, 2014. <https://doi.org/10.23850/22565035.96> ↑11
- [49] A. D. Ortega Sánchez y H. Gil, “Estudio del comportamiento mecánico de morteros modificados con fibras de aserrín bajo esfuerzos de compresión”, *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 37, no. 1, pp. 20-35, 2019. ↑
- [50] M. Shariful Islam, T. E. Elahi, A. Rafat Shahriar, and N. Mumtaz, “Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 255, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119392> ↑14
- [51] P. T. Jitha, B. Sunil Kumar, and S. Raghunath, “Strength development and masonry properties of geopolymer stabilised soil-LPC (lime-pozzolana cement) mixes”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 250, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118877> ↑12
- [52] C. A. Granados, H. E. Rojas Cubides y F. Santamaria, “Evaluación del apantallamiento electromagnético del

- concreto a partir de simulaciones en alta frecuencia y la aplicación del modelo de Jonscher”, *Ing.*, vol. 25, no. 2, pp. 162-178, 2020. <https://doi.org/10.14483/23448393.15611> ↑12
- [53] L. Á. Moreno Anselmi, M. Á. Ospina García y K. A. Rodríguez Polo, “Resistencia de concreto con agregado de bloque de arcilla triturado como reemplazo de agregado grueso”, *Ingeniare. Rev. chil. ing.*, vol. 27, no. 4, pp. 635-642, 2019. ↑12
- [54] H. Guimarães Aragão, J. J. Aragão, P. R. Lopes Lima, J. M. Feitosa Lima y M. Batista Leite, “Análise teórica e experimental da deflexão de vigas T pré-moldadas produzidas com concreto reciclado”, *Rev. sul-am. eng. estrut.*, vol. 16, no. 3, pp. 114-134, 2019. <https://doi.org/10.5335/rsae.v16i3.8609> ↑12
- [55] J. Junak, and A. Sicakova, “Effect of surface modifications of recycled concrete aggregate on concrete properties”, *Buildings*, vol. 8, no. 1, 2018. <https://doi.org/10.3390/buildings8010002> ↑12
- [56] A. Adesina, and S. Das, “Evaluation of the durability properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete as aggregate”, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 33, no. 2, 2021. <https://orcid.org/0000-0002-4262-9398> ↑

---

### **Yamalit Itamar Olivera Pérez**

Ingeniera Civil de la Universidad Señor de Sipán (Chiclayo, Perú).  
Correo electrónico: operezyam@crece.uss.edu.pe

---

### **Sandro Piero Guevara Saravia**

Ingeniero Civil de la Universidad Señor de Sipán (Chiclayo, Perú).  
Correo electrónico: gsaraviasandr@crece.uss.edu.pe

---

### **Sócrates Pedro Muñoz Pérez**

Doctor en Gestión pública y Gobernabilidad de la Universidad César Vallejo. Magister en Ciencias de la Tierra con Mención en Geotecnia de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Ingeniero Civil de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Doctorando de Ingeniería Civil en la Universidad Nacional de Santa. Director de la Escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Señor de Sipán (Chiclayo, Perú).  
Correo electrónico: msocrates@crece.uss.edu.pe

# Methodology for the Design of a Hybrid Energy System with a Didactic Approach: Case Study Centro Educativo Luis López de Mesa

*Metodología para el diseño de un sistema de energía híbrido con enfoque didáctico: estudio de caso Centro Educativo Luis López de Mesa*

**Diego Alejandro Zambrano Joya**<sup>1</sup>, **David Leonardo Rodríguez Salazar**\*<sup>1</sup>, **Diego Julián Rodríguez Patarroyo**<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia).  
correspondence e-mail: dlrodriguez@correo.udistrital.edu.co

Recibido: 15/04/2021. Modificado: 02/11/2021. Aceptado: 29/11/2021.

## Abstract

**Context:** The case study presented is the product of a methodological proposal to design a hybrid energy system with a didactic approach for schools in rural areas that are not interconnected or with intermittent electricity flow. The methodology is designed to be applied in communities without advanced knowledge in renewable energies.

**Method:** Initially the hybrid energy system is designed through dimensioning based on the acquisition of information and energy characterization of the educational community. The second phase is to determine, through the teaching processes, a model of structural blocks that allows addressing the design of a hybrid energy system as a didactic tool. The third phase consists of developing the structural blocks model for the case study of the Luis López de Mesa educational center, establishing the scope and benefits of the proposed methodology.

**Results:** Through wind and solar energy resources, the design of the hybrid energy system is able to satisfy the energy requirement and reduce the negative environmental impact. In turn, the teaching body manifests a high interest in the theoretical-didactic learning component that bases the methodological proposal of this research, supported by the contribution of an illustrative brochure that functions as a didactic tool.

**Conclusions:** y evaluating the methodology, it was possible to provide a support tool for the development of didactic practices taught by teachers, fostering and promoting the use of renewable energies in the structuring of curricular networks, contributing to the growth of human and environmental values in the elementary school student community.

**Keywords:** alternative energies, didactics, hybrid energy system, learning tool, methodology

**Language:** Spanish

## Open access



Cite as: Zambrano, D. A., Rodríguez, D. L., Rodríguez, D. J. "Metodología para el diseño de un sistema de energía híbrido con enfoque didáctico: estudio de caso Centro Educativo Luis López de Mesa". *Ing.*, vol. 27, no. 2, 2022. e17876.  
<https://doi.org/10.14483/23448393.17876>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## Resumen

**Contexto:** El estudio de caso presentado es producto de una propuesta metodológica para diseñar un sistema de energía híbrido con enfoque didáctico para escuelas de las zonas rurales no interconectadas o con intermitencia del flujo eléctrico. La metodología está diseñada para ser aplicada en comunidades sin conocimientos avanzados en energías renovables.

**Método:** Inicialmente se diseña el sistema de energía híbrido a través del dimensionamiento con base en la adquisición de información y la caracterización energética de la comunidad educativa. La segunda fase es determinar, a través de los procesos de enseñanza, un modelo de bloques estructurales que permita abordar el diseño de un sistema de energía híbrido como herramienta didáctica. La tercera fase consiste en desarrollar el modelo de bloques estructurales para el estudio de caso del centro educativo Luis López de Mesa, estableciendo los alcances y beneficios de la metodología propuesta.

**Resultados:** A través de los recursos energéticos eólico y solar, el diseño del sistema de energía híbrido logra satisfacer el requerimiento energético y reducir el impacto ambiental negativo. A su vez, el cuerpo directivo docente manifiesta un alto interés en el componente de aprendizaje teórico-didáctico que fundamenta la propuesta metodológica de esta investigación, sustentada en el aporte de un folleto ilustrativo que funcione como herramienta didáctica.

**Conclusiones:** Evaluando la metodología se logró proporcionar una herramienta de apoyo para el desarrollo de prácticas didácticas impartidas por los docentes, fomentando y promoviendo el uso de las energías renovables en la estructuración de las mallas curriculares, aportando al crecimiento de valores humanos y ambientales en la comunidad estudiantil de básica primaria.

**Palabras clave:** didáctica, energías alternativas, herramienta de aprendizaje, metodología, sistema híbrido de energía

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

El objetivo de este documento es mostrar el desarrollo de una metodología para diseñar un sistema de energía híbrido (SH) con enfoque didáctico, para escuelas de las zonas rurales no interconectadas o con intermitencia del flujo eléctrico. Se plantea desde una perspectiva comunitaria, con el fin de apoderar a la sociedad por medio de una mirada didáctica. Esta metodología se justifica debido a la baja penetración de este tipo de energías en estos contextos y a la falta de herramientas didácticas que permitan abordar los conceptos relacionados con las fuentes de energía, y en general con el cambio climático. Se evaluaron los resultados obtenidos por medio de un estudio de caso en el centro educativo Luis López de Mesa ubicado en el municipio de Granda (Meta, Colombia).

Según el informe de Progreso Energético del Banco Mundial, en la población global se registran 840 millones de personas sin acceso a la electricidad, de las que alrededor de 732 millones forman parte de la población rural [1], por ejemplo, en América Latina y el Caribe se estima que aún 22 millones de personas permanecen sin acceso a la energía eléctrica [2].

En Colombia, la capacidad de cobertura energética se divide entre las áreas geográficas conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN), conocidas como Zonas Interconectadas (ZI) y por otro lado las Zonas No Interconectadas (ZNI), que se componen de municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al SIN [3], los cuales equivalen a un 52 % del territorio na-

cional [4]. No obstante, las ZI del país presentan en promedio 53,15 veces al año (por usuario) interrupciones en el servicio eléctrico [5]. Por lo tanto, presentándose ocasionalmente un mal servicio de energía eléctrica a causa de interrupciones o fallo en la red [6], se tiene que la Ley 143 de 1994, artículo 20, el estado tiene como objetivo básico asegurar una adecuada prestación del servicio [7] en el que se garanticen criterios de calidad, confiabilidad y seguridad.

Por otra parte, las emisiones globales de dióxido de carbono relacionadas con la generación de energía eléctrica aumentaron 1,7 % en 2018 [8], siendo el mayor aportante a estas emisiones la generación de energía por medio de combustibles fósiles. Motivados bajo la premisa de la mitigación del dióxido de carbono y la reducción de la contaminación del aire, a finales del año 2019 más de 140 países emprendieron proyectos relacionados con energía solar, hídrica y eólica para maximizar su capacidad de generación con energías renovables y diversificar su matriz energética con estos recursos [9].

Bajo el marco de la problemática medioambiental que vive el mundo, Colombia ha venido diversificando su matriz energética progresivamente, partiendo en el año 2014 con la firma de la Ley 1715 por parte del Congreso de la República, que beneficia el uso de las energías renovables, dando incentivos y reducciones de impuestos, buscando promover el desarrollo y la utilización de fuentes de energía no convencionales renovables [10].

En la implementación de los proyectos de energías renovables orientados a las comunidades, la mayoría no logra un impacto social planeado, a pesar de casos como La Guajira colombiana, en la que los sistemas que siguen operativos o funcionales poseen problemas fácticos, debido a que la comunidad que los utiliza no cuenta con la formación necesaria para realizar su mantenimiento básico in situ [11].

Una propuesta de solución a las problemáticas observadas es la apropiación de estas tecnologías por la comunidad a través de procesos educativos. La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) por medio de la campaña nacional “Aprendiendo el uso racional de la energía eléctrica (AURE)” habla de que la educación en energías renovables es el camino para transformar la forma de producción de energía, minimizando el efecto de cambio climático e impactando a las comunidades [12].

Para lograr estos propósitos en el país, la apropiación de las energías renovables en los centros educativos rurales requiere incentivar de manera permanente la inclusión de proyectos académicos y gubernamentales [13], a fin de implementar sistemas de energía renovable para la autogeneración energética, de manera limpia y sustentable, dejando de lado poco a poco la visión del futuro inestable que plantean los combustibles fósiles [14], [15].

Así mismo, más allá de contribuir en la transición energética, los proyectos de energías renovables tienen como función adicional la apropiación de los conceptos de enseñanza energética [16], [17], que se puede incluir en los Derechos Básicos de Aprendizaje (DBA) propuestos por el Ministerio de Educación Nacional de Colombia (MEN), para fortalecer el contenido curricular de los establecimientos educativos en el país [18].

En este sentido, un estudio realizado en la última década, publicado en la revista *The American Society of Mechanical Engineers* a finales del 2011, presenta una metodología de co-diseño para el desarrollo de sistemas de energía sostenible y renovable para comunidades marginadas en la Nación Pomo Pinoleville (California, EE.UU.) con la que se logró un diseño utilizado para asegurar fondos federales y así crear viviendas que ayudarán a su autosuficiencia económica [19]. Para el 2014 se publica un artículo en la revista *Vinculando*, el cual afirma que la escuela juega un importante papel en la educación en cuanto a la protección del ambiente, por lo que propone una vinculación de la educación ambiental con el contenido de las asignaturas en los diferentes tipos de enseñanzas con miras al aprovechamiento de las energías renovables [20].

En 2016 una investigación sobre el aprovechamiento del potencial energético con biomasa forestal en el departamento de Nariño, publicada en la revista *Ingeniería Solidaria*, presentaba una metodología para el aprovechamiento de este recurso, deduciendo que es factible usar residuos forestales para la energización de zonas aisladas y así beneficiar el ambiente [21]. Para el 2018, la misma revista publica la propuesta de una solución tecnológica en el sector educativo, aportando a modelos de enseñanza-aprendizaje de las ciencias naturales a través del desarrollo de una aplicación con realidad aumentada, logrando recrear animaciones que permitieran asimilar a la comunidad estudiantil, de forma interactiva y efectiva, información de los sitios naturales y su importancia [22].

En 2020 se publica una investigación sobre el desarrollo de una metodología de construcción participativa en la revista *Brazilian Journal of Development*, que se basa en proyectos sostenibles de energía renovable comunitaria y es validada mediante la implementación de un sistema fotovoltaico para la comunidad indígena Aico (Tolima, Colombia) buscando con esta un enfoque incluyente, que posibilite el empoderamiento tecnológico de la comunidad [23].

Como se pudo observar, la literatura especializada aborda la enseñanza de energías renovables a través de metodologías participativas, sin embargo, las investigaciones orientadas hacia la producción de herramientas didácticas que permitan fortalecer y promover la enseñanza energética en una comunidad son limitadas y no reconocen las características del contexto, ni ambientales, ni los rasgos culturales, así como las normatividades vigentes.

Por tanto, la metodología planteada en este artículo surge a partir de un modelo de aprendizaje que permita explotar las funcionalidades didácticas con las que cuenta el dimensionamiento y eventual implementación de un SH. A través de la aplicación de las estrategias de energía comunitaria [21], [22] se propone una herramienta didáctica de energía escolar-didáctica que contempla la estructura de enseñanza-aprendizaje por medio de la participación directa de la comunidad estudiantil en lo que respecta a un proyecto de energía sostenible.

Se eligió el centro educativo Luis López de Mesa para el estudio de caso porque manifiesta intermitencias esporádicas en el flujo eléctrico con duración de 1 a 2 días. A pesar de estar ubicado en una ZI, en donde la empresa encargada de prestar el servicio energético EMSA tiene cobertura de 85,67 % en la cabecera municipal y 92,22 % en las zonas rurales [25] y cuenta con un indicador de confiabilidad SAIDI (tiempo de la duración de la interrupción) del periodo 2019 con valores por debajo de las 20 horas y un indicador SAIFI (frecuencia con que se da una interrupción) de aproximadamente 70 veces [5].

## 2. Metodología

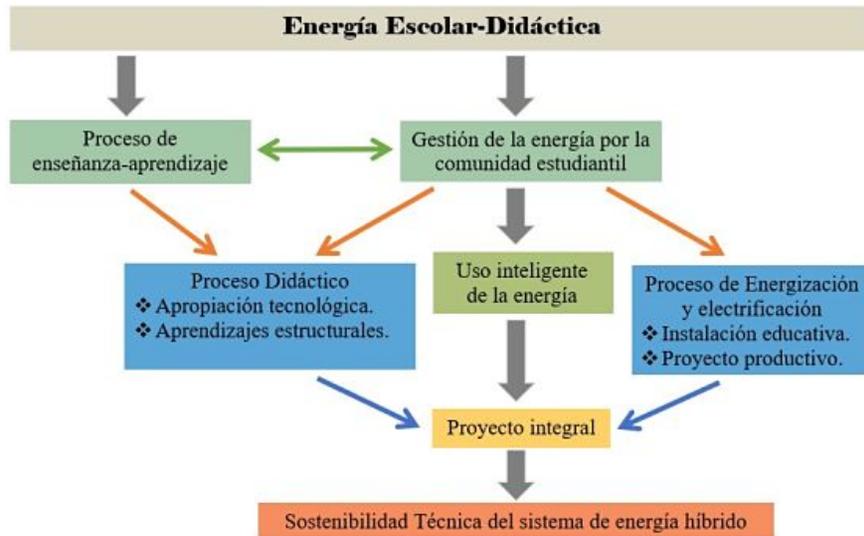
La propuesta metodológica consta de cinco fases (Figura 1) en las que se integran los aspectos técnicos y comunitarios para establecer un proyecto sostenible. Estas son:

- **Fase 1:** Reconocimiento del contexto, adquisición de la información y caracterización de la comunidad y su gestión energética a través del acompañamiento por parte de la comunidad académica en procedimientos de investigación cuantitativa y cualitativa como encuestas y cuestionarios.
- **Fase 2:** Evaluación de las alternativas energéticas por parte de la comunidad académica para estimar el potencial de energía con el que cuentan los recursos naturales aledaños a su ubicación por medio del análisis de la información publicada en bases de datos de la NASA, IDEAM o cualquier registro procedente de entidades similares.
- **Fase 3:** Dimensionamiento y diseño de un sistema de energía híbrido con los recursos energéticos de mayor potencial de generación para suplir las necesidades energéticas de la comunidad, utilizando los procedimientos de diseño técnico establecidos en literatura especializada.
- **Fase 4:** Evaluación del alcance, en la que se identifican los beneficios que se pueden lograr en la comunidad con la inclusión de las fuentes de energía renovables, como reducción de gases de efecto invernadero, abastecimiento energético o herramientas de apoyo didáctico.
- **Fase 5:** Socialización con la comunidad educativa, evaluando la metodología y exponiendo sus resultados ante el cuerpo de trabajo académico mediante sesiones informativas virtuales y/o presenciales para su futura implementación en el Proyecto Educativo Institucional (PEI).

La Figura 2. expone el diagrama de flujo de la energía escolar- didáctica en el que se articulan los componentes clave para lograr los objetivos de las fases metodológicas de la Figura 1. considerando la inclusión de energías renovables en un centro educativo, no solo desde la perspectiva técnica, sino integrando un enfoque didáctico.



**Figura 1.** Fases que constituyen la metodología para la apropiación de energías renovables en un centro educativo rural



**Figura 2.** Diagrama de flujo de la metodología de un centro educativo para la implementación de energías renovables

De esta forma, las dos primeras fases están relacionadas con la gestión de energía por la comunidad estudiantil. La tercera fase constituye el proceso de energización, mientras que la cuarta fase sustenta el proceso didáctico con el aporte en forma de componente teórico-práctico para las estrategias o modelos didácticos que apoyan el proceso de enseñanza-aprendizaje de los conceptos normatizados en los Estándares Básicos de Competencias (EBC) y los Derechos Básicos de Aprendizaje (DBA). El uso inteligente de la energía está relacionado con todas las fases de la metodología, pues la eficiencia energética es clave durante estos procesos. Finalmente, el proyecto integral se fundamenta con el logro de la quinta fase, que además argumenta el planteamiento de la sostenibilidad técnica del SH por parte de la comunidad estudiantil.

## 3. Resultados

### 3.1. Reconocimiento del contexto

En Colombia, el decreto 1860 de 1994 establece que la hoja de ruta de escuelas y colegios es el PEI, en el que se especifican las maneras o los aspectos por los cuales el centro educativo ha decidido lograr los fines de la educación [26], [27]. Una de estas maneras es la herramienta de educación formal del Proyecto Ambiental Escolar (PRAE), promulgado bajo el Decreto 1743 de 1994 [28], el cual busca motivar el progreso de estrategias investigativas y de intervención, en las que se involucra la participación y la gestión por parte de la comunidad estudiantil, desarrollando conocimientos, valores y actitudes acordes con la concientización ambiental [29].

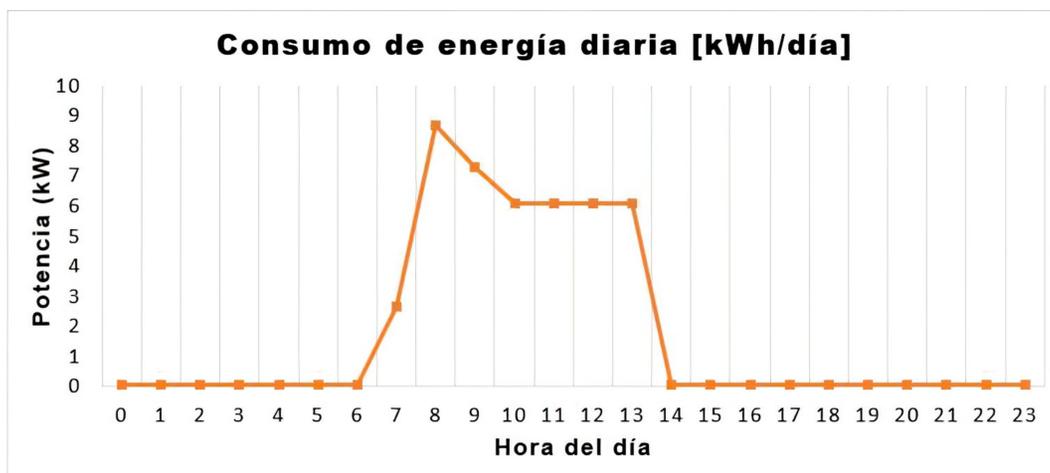
Para el estudio de caso, el centro educativo Luis López de Mesa manifiesta un enfoque de su PRAE hacia el ahorro y el cuidado del agua como recurso natural esencial para la sostenibilidad del futuro, adicionalmente otro enfoque está dirigido hacia los procesos de recolección, selección y reciclaje de residuos sólidos tales como el cartón o el plástico. Con lo que, a la fecha, el centro educativo no incluye un enfoque hacia las energías renovables, desperdiciando el potencial que pueden ofrecer en el aprendizaje energético de las generaciones venideras por medio de su aplicación como herramientas didácticas.

**Tabla I.** Cuadro de cargas eléctricas esenciales del centro educativo Luis López de Mesa

Cantidad	Cargas	Potencia equipo (W)	Potencia total (W)	Horas uso diarias	Consumo diario máximo (Wh/día)
2	Internet (Router+decodificador)	10	20	24	480
3	Refrigerador	320	960	5	4.800
28	Luminarias	50	1.400	2	2.800
34	Tomas eléctricas	150	5.100	5	25.500
1	Electrobomba	1.200	1.200	3	3.600
5	Cámaras de seguridad	5	25	24	600
<b>TOTAL</b>			<b>8.705</b>		<b>37.780</b>

Se requiere de la caracterización de las necesidades energéticas del centro educativo. Mediante un cuestionario realizado al cuerpo docente se determina el conjunto de equipos eléctricos esenciales para el desarrollo básico de las actividades académicas en el centro educativo, expuesto en la Tabla I, a fin de determinar un valor de carga instalada y el consumo de energía diario, parámetros necesarios para el dimensionamiento del SH.

Con base en esta información y las consideraciones aportadas por las directivas del centro educativo sobre las horas del día en que se usan los equipos eléctricos, la curva del ponderado del consumo diario de energía de los equipos eléctricos esenciales para el centro educativo Luis López de Mesa se presenta en la Figura 3.

**Figura 3.** Consumo de energía diaria de los equipos eléctricos esenciales para el centro educativo Luis López de Mesa

### 3.2. Evaluación de alternativas energéticas

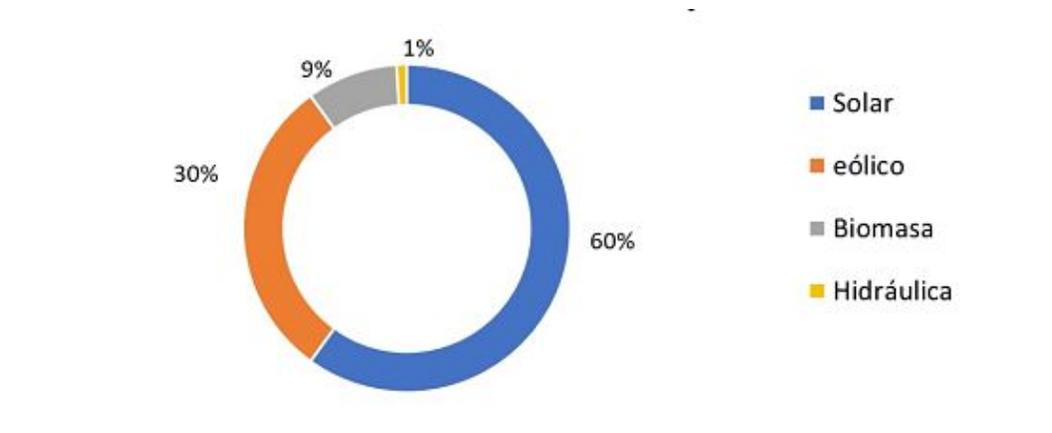
Los recursos energéticos renovables están condicionados a las variables ambientales, por ende, es necesario reconocer la climatología del emplazamiento para identificar su potencial de generación. En lo que respecta al estudio de caso, el centro educativo Luis López de Mesa se ubica en el

municipio de Granada, Meta (ver Figura 4), en el que se evaluaron los recursos eólico y solar.



**Figura 4.** Ubicación geográfica del centro educativo Luis López de Mesa. En a) departamento del Meta y en b) municipio de Granada [30]

En el caso del recurso hídrico se observó que las estaciones meteorológicas que sensan las corrientes de agua necesarias para implementar una PCH (Pequeña Central Hidroeléctrica) no se encuentran en el rango espacial adecuado, por esta razón se excluye que el recurso hídrico en este estudio. Para el recurso de biomasa, solo se tuvieron en cuenta los residuos humanos de la misma población estudiantil [31], se logra una producción de  $0,35 \text{ m}^3$  de biogás al día, este se podría utilizar para las necesidades energéticas de menor escala, como por ejemplo la cocción de alimentos. En resumen, la distribución de los recursos energéticos renovables en la institución educativa se registra en la Figura 2, donde la mayor participación es del recurso solar seguido del recurso eólico.

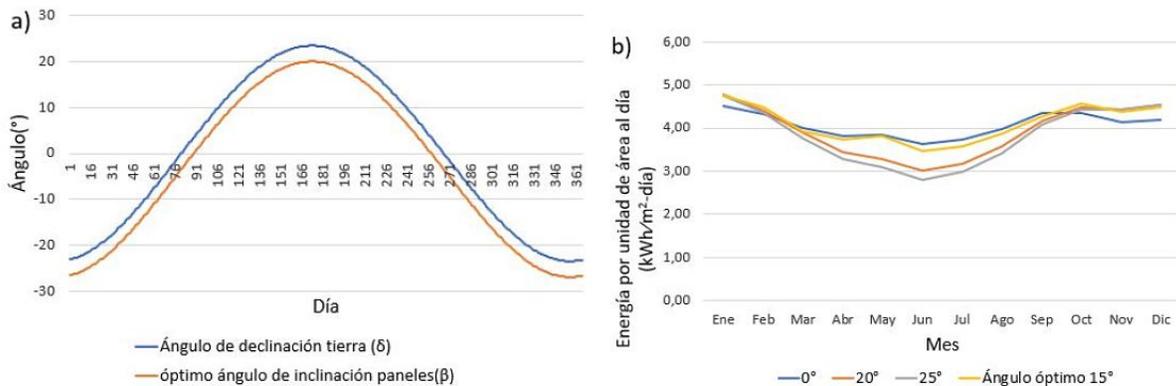


**Figura 5.** Distribución de los recursos energéticos renovables en el centro educativo

### 3.2.1. Recurso solar

El ángulo de inclinación óptimo en el estudio de caso es de  $13,15^\circ$  (ver Figura 6), pero a partir de [32], se define en  $15^\circ$  para evitar que la lluvia se acumule en los paneles solares. Posicionando los paneles solares en este ángulo de inclinación, la irradiación incidente aproximada promedio anual

es de 4,11 kWh/m<sup>2</sup>, mientras que con la superficie en inclinación de 0°, 20° o 25° se presentan valores más bajos, tal como lo expone la Figura 6.

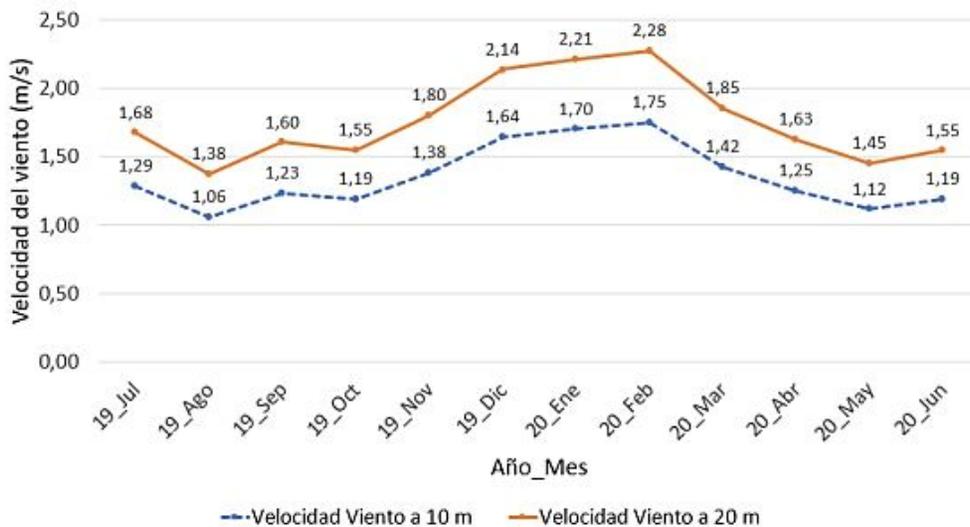


**Figura 6.** Evaluación del recurso solar. En a) ángulo de inclinación óptimo para paneles solares y en b) promedio de incidencia de radiación solar sobre superficies en Canaguaro, Meta

### 3.2.2. Recurso eólico

La curva inferior de la Figura 7. presenta la velocidad del viento mensual a 10 m de altura, con un promedio de 1,35 m/s [33], consecuencia de la presencia de obstáculos como árboles o colinas. Por lo que se hace necesario utilizar la ecuación (1), que es la fórmula logarítmica del perfil del viento establecida en [34], [35], para estimar las velocidades a una altura de 20 m, las cuales se pueden apreciar en la curva superior de la Figura 7, teniendo un promedio de velocidad de 1,76 m/s, valores apropiados para el funcionamiento de una turbina eólica.

$$v_z = v_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (1)$$



**Figura 7.** Velocidad del viento a 10 m (curva inferior) y 20 m (curva superior) de altura para el periodo 2019-2020

Utilizando la distribución de Weibull [36], se determinó la frecuencia de velocidades de viento entre 0,5 m/s y 5,5 m/s, a una altura de 20 m, hallando los parámetros de Weibull  $K = 1,5372$  y  $C = 2,1986$ , obteniendo la frecuencia a una velocidad determinada que se dará en un tiempo determinado. Consiguiendo así las características del viento para elegir una turbina eólica adecuada que genere la mayor cantidad de energía posible.

Los datos de frecuencia se multiplican por el número de horas que tiene un año para definir el perfil de velocidad del viento durante el periodo de junio de 2019 a julio de 2020. Además, en la rosa de viento para este periodo temporal se observa que la dirección del viento con mayor frecuencia sopla hacia el oeste noroeste, pero los vientos con mayor intensidad se presentan hacia el este (ver Figura 8).

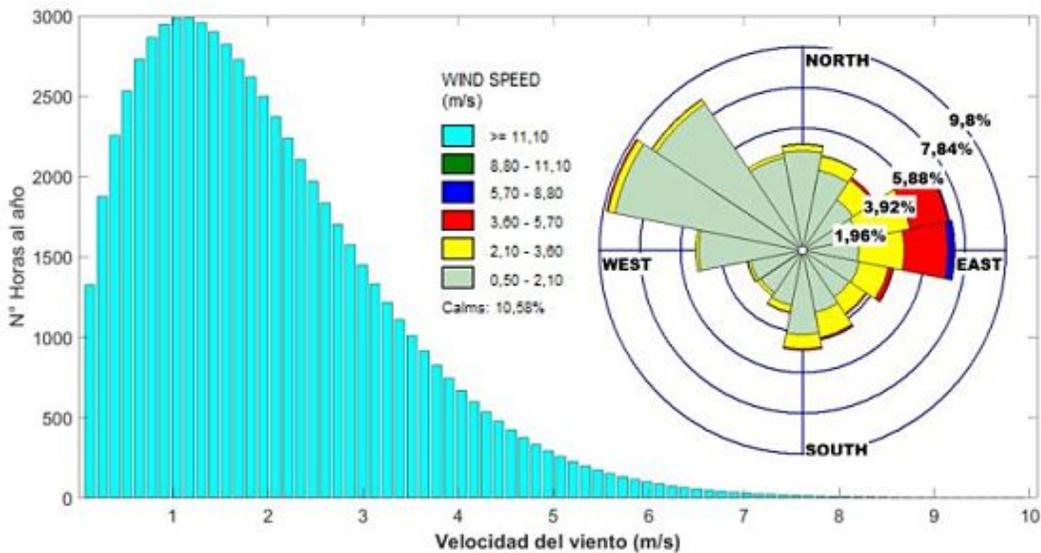


Figura 8. Distribución de Weibull en horas al año y dirección del viento en el centro educativo Luis López de Mesa

### 3.3. Dimensionamiento y diseño

Aunque el consumo de energía expuesto en la figura 3 se realiza durante cuatro horas del día, el SH funciona 24 horas y acumula la energía en el banco de baterías para suplir la carga en este periodo de tiempo. En consecuencia, se presenta a continuación el desarrollo y la selección de los cinco elementos constitutivos de la propuesta de diseño de un SH solar-eólico.

#### 3.3.1. Generador eólico

Con base en la evaluación del recurso eólico y usando la información depositada en las fichas técnicas que ofrecen diferentes fabricantes de turbinas de eje horizontal, como lo son las curvas de potencia-velocidad de viento y generación de energía mensual o anual-velocidad promedio de viento, se procede a estimar la energía que se puede obtener para una variedad de generadores ofertados en el mercado.

A continuación, se hace una comparación entre cuatro tipos de turbinas eólicas ofertadas en el mercado mundial que funcionan para las características identificadas en la evaluación del recurso eólico, que son la ANTARIS 7,5 kW, la Enair 70 PRO, la Nohana 3000 y la SunSurfs WT3 3000W.

La turbina eólica seleccionada es la de tipo SunSurfs WT3 3000W, la cual puede generar 1.588 kWh/año y cuyas especificaciones técnicas se presentan en [37]. El resumen de la energía anual que puede generar este tipo de turbina se expone en la Tabla II.

**Tabla II.** Energía y potencias de la turbina eólica SunSurfs WT3 3000W

<b>Velocidad</b>	<b>Número de horas al año</b>	<b>Potencia (W)</b>	<b>Energía (kWh/año)</b>
0,5	2.056	0	0
1,5	3.124	0	0
2,5	1.940	100	194
3,5	1.018	400	407,2
4,5	444	1.400	621,6
5,5	166	2.200	365,2
<b>Energía Anual</b>			<b>1.588</b>

### 3.3.2. Generador Solar

La selección del panel solar con mayor generación de energía bajo las condiciones solares evaluadas previamente se realiza por medio de la comparación entre los modelos de paneles solares BSM370M-72, SW450M-96, RS500M-96 y YS550M-96, ofertados en el mercado mundial y considerados para una tensión de 48 V [37].

Considerando que la temperatura media del municipio de Granada, Meta es de 24 °C [38], valor de temperatura menor al utilizado en las pruebas STC [39], pero que, bajo la diversidad de las condiciones climáticas de la zona de estudio, se estima aumente entre los 28 °C y los 30 °C. Sugiere que la generación de energía eléctrica del panel solar se reduce un 5 %.

Por tanto, la ecuación que describe la energía eléctrica capaz de generar el panel solar al día [40] para el centro educativo Luis López de Mesa se presenta en la ecuación (2):

$$E_{\text{panel\_corregida}} = 0,95 \cdot E_{\text{panel}} = 0,95 \cdot \text{Potencia pico de panel} \cdot NHE \quad (2)$$

Según [40], utilizando el ángulo de inclinación de 15° y a partir de los datos observados en la Figura 6, el parámetro NHE es de 3,46 horas al día, ya que este valor corresponde al mes cuando se presenta mayor nubosidad.

Finalmente, calculando la energía total que se genera en un año con cada opción de panel solar, se selecciona el panel solar modelo YS550M-96 con 550 Wp, capaz de generar 660 kWh/año, cuyas especificaciones técnicas se exponen en [41].

### 3.4. Requerimiento energético del centro educativo

Teniendo en cuenta que una de las tecnologías de generación eléctrica que constituyen el SH es la solar fotovoltaica, se deben considerar los factores de pérdida que influyen en el rendimiento una instalación fotovoltaica individual [42]. Por ende, utilizando el proceso de [43], se propone el parámetro de rendimiento global de instalación fotovoltaica (R) como:

$$R = (1 - K_B - K_C - K_V) \cdot \left(1 - \frac{K_A \cdot N}{P_d}\right) \quad (3)$$

Al considerar las variables que determinan el parámetro de rendimiento global de instalación fotovoltaica definidas en [44], los valores que se seleccionan para el cálculo de la ecuación (3) se toman a partir de criterios de diseño de mayor conveniencia, apoyados en [45], [46], resultando en que R sea igual al 71,10 %. De modo que el consumo energético real en términos de energía del centro educativo al año es aproximadamente 19.395 kWh/año.

#### 3.4.1. Capacidad energética del sistema de energía híbrido

A causa de que el precio en el mercado para la turbina eólica SunSurfs WT3 3000W es alrededor de 50 veces más alto que el precio para una unidad de panel solar YS550M-96, se considera la configuración 8/92 para el SH, es decir, el 8 % del consumo energético real del centro educativo se abastecerá por la turbina eólica y del 92 % restante se encargará el sistema fotovoltaico.

Bajo la mencionada configuración, se sugiere el uso de una turbina eólica SunSurfs WT3 3000W. En cuanto al número de paneles solares necesarios y su respectiva configuración eléctrica, se considera la metodología expuesta en [47] para el cálculo de paneles solares totales necesarios, resultando en que para el caso de estudio, se requieren de 28 paneles solares modelo YS550M-96.

A pesar de que [47] expone un procedimiento que permite establecer el número de paneles en serie y en paralelo, por conveniencia se considera apropiado realizar una distribución en dos subsistemas, el primero de ellos compuesto por quince paneles solares monocristalinos en paralelo de 550 Wp cada uno y de una turbina eólica de 3000 W, el segundo subsistema lo compone una conexión en paralelo de trece paneles solares monocristalinos de 550 Wp.

En la Tabla III se registra la diferencia entre la generación y el requerimiento de energía estimada para el SH, resaltando que esta diferencia de energía, que tiene un valor de 670 kWh/año, suplirá las necesidades energéticas en los días del año en que la irradiación solar disminuye por causa del clima, cuando la temperatura de operación de las celdas solares incrementa considerablemente y afecte el funcionamiento del panel [48], [49], e incluso ante una eventualidad en que la velocidad del viento esté por debajo del promedio anual.

#### 3.4.2. Sistema de acumulación de energía

Se compararon tres opciones de baterías ofertadas en el mercado (OPzS Solar 3850, A602/3920 Solar e IND17-6V), se seleccionó la batería modelo OPzS Solar 3850 con capacidad nominal de 3.850 Ah, debido a que es la batería más económica entre las opciones planteadas previamente, sus especificaciones técnicas se pueden observar en [50]. Como la tensión nominal de las baterías

**Tabla III.** Diferencia de energía generada por el sistema híbrido y la necesaria para el centro educativo

<b>Centro educativo Luis López de Mesa</b>	<b>Energía generada [kWh/año]</b>	<b>Energía requerida [kWh/año]</b>	<b>Diferencia [kWh/año]</b>
Turbina eólica	1.588	1.552	36
Sistema fotovoltaico	18.476	17.843	633
Sistema de energía híbrido	20.064	19.395	669

seleccionadas es de 2 V, se deben utilizar en serie 24 baterías para conseguir los 48 V de tensión eléctrica del sistema, precisando la necesidad de 24 baterías de 3.850 Ah de 2 V.

### 3.4.3. Controlador de carga

Utilizando los lineamientos establecidos en [47], [51], se realiza el dimensionamiento del controlador de carga para un SH eólico-solar. Se selecciona el controlador modelo Coleman Air 440-HVA, cuyas especificaciones técnicas se exponen en [52], para la unión del subsistema fotovoltaico 1 a la turbina eólica. En cuanto al subsistema fotovoltaico 2, se selecciona el controlador modelo JND-X200A con las especificaciones técnicas definidas en [53].

### 3.4.4. Inversor

Para dimensionar la capacidad del inversor en la instalación del SH se siguen los pasos mencionados en [47]. Seleccionando el inversor del fabricante Shenzhen Snat Energy Electrical Technology Co. Ltd. de modelo HF4835U80, cuyas especificaciones técnicas se observan en [54], a fin de suplir la potencia necesaria de 10.446 W.

Como resultado, en la Figura 9 se presenta el diagrama unifilar general del sistema híbrido eléctrico propuesto, donde se pueden evidenciar los dos subsistemas mencionados previamente, generando una potencia estimada con pérdidas de 14 kW.

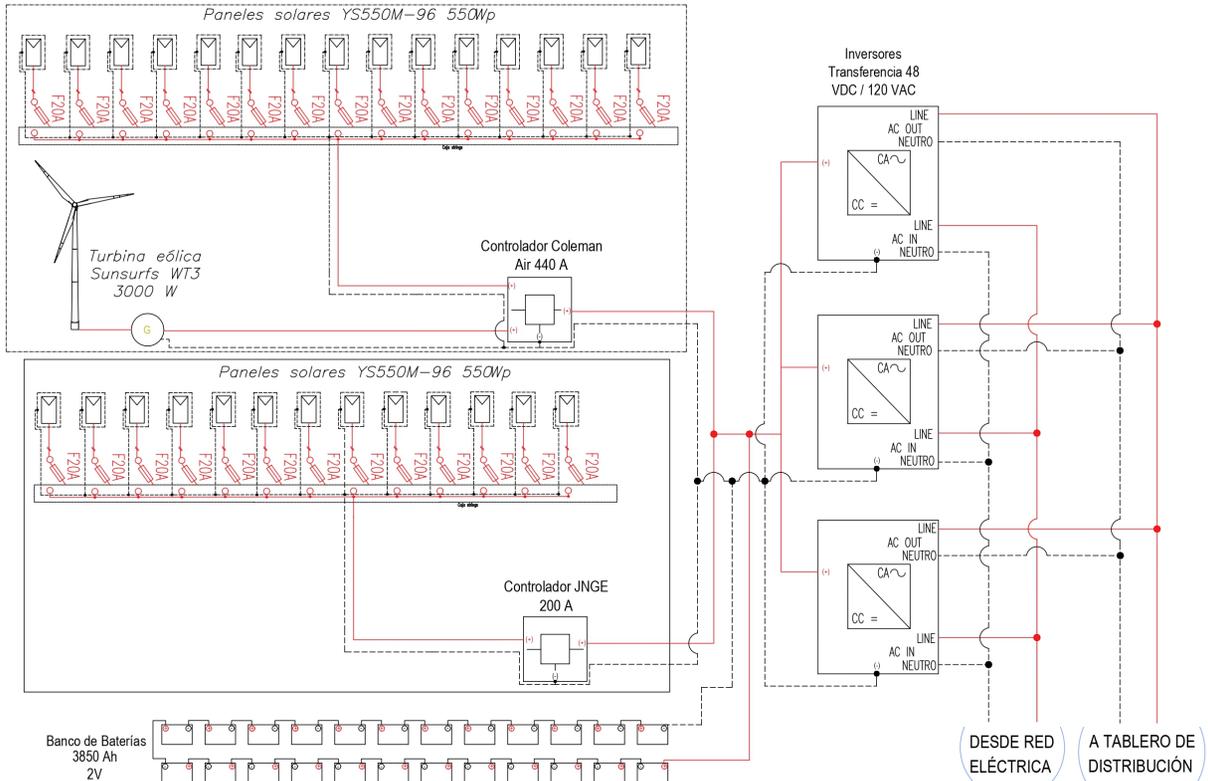
## 3.5. Evaluación del alcance

### 3.5.1. Abastecimiento energético

La eventual implementación del SH permitiría satisfacer las necesidades de consumo eléctrico cuando se registre la ausencia del servicio proporcionado por la red local, integrando estaciones de monitoreo que permitan a la comunidad estudiantil registrar visualmente y adquirir conocimientos sobre conceptos como: flujo de carga, diferencia de potencial, energía solar, energía solar fotovoltaica, energía eólica, entre otros. Esto permite una reducción de los índices de desescolarización infantil [55] y de los impactos ambientales.

### 3.5.2. Reducción de gases de efecto invernadero

El diseño del SH y su eventual implementación permiten la reducción de los gases de efecto invernadero. El cálculo del ahorro de emisiones de dióxido de carbono se realizó teniendo en cuenta



**Figura 9.** Diagrama unifilar sistema de energía híbrido diseñado para estudio de caso

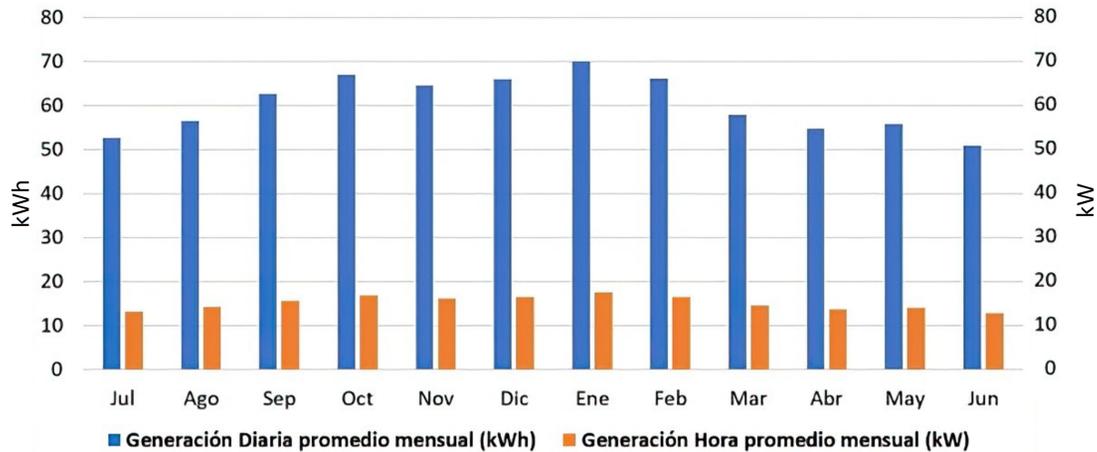
la generación de kWh que se espera del SH mes a mes, aplicando el factor marginal de emisión de gases de efecto invernadero del Sistema Interconectado Nacional, el cual según la resolución 642 de 2019 tiene un valor de 0,381 kgCO<sub>2</sub>eq por cada kWh [56].

Calculando la generación diaria promedio mensual y la generación hora promedio mensual, se representa este cálculo en la Figura 10, en donde se tiene una generación real promedio de 60,35 kWh diarios, satisfaciendo gran parte de las necesidades energéticas del centro educativo, presentando así una producción energética promedio hora de 15,08 kW en el transcurso del tiempo que opera el SH.

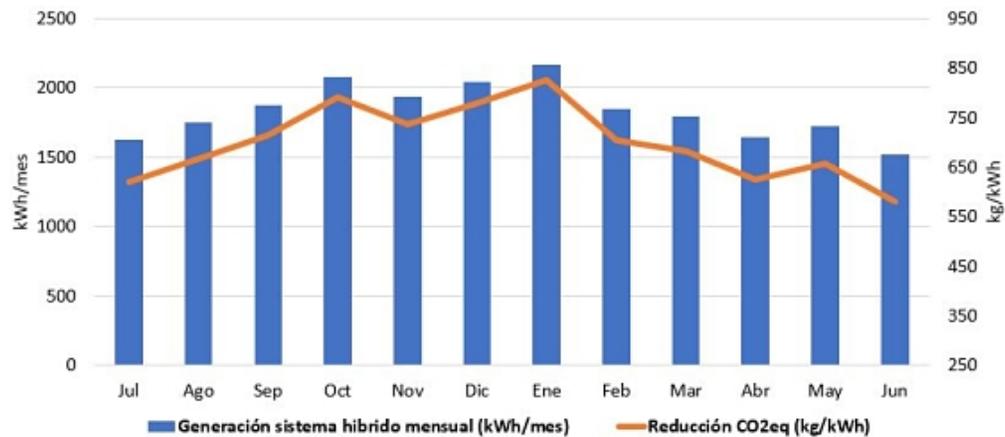
Esta generación de energía eléctrica por medio de fuentes renovables representa una reducción de dióxido de carbono en el transcurso de julio de 2019 a junio de 2020 de 838 kgCO<sub>2</sub>eq que se puede ver en la Figura 11, con un factor marginal de emisión de gases invernaderos anteriormente mencionado de 0,381 kgCO<sub>2</sub>eq por cada kWh.

### 3.5.3. Recurso didáctico

Como recurso didáctico, el diseño de un SH forma parte de la necesidad de adecuación de la formación académica a las exigencias ambientales de la actualidad, cuya percepción es positiva cuando se le mira desde las perspectivas de lo instituido e instituyente [57].



**Figura 10.** Generación real sistema híbrido eléctrico del centro educativo Luis López de Mesa



**Figura 11.** Generación sistema híbrido en kWh mensual y reducción emisiones de CO<sub>2</sub>eq ligado a la electricidad (kWh)

Es así que dentro del proceso didáctico se procedió a un acercamiento a la institución educativa mediante un folleto ilustrativo, en donde se explican las diferentes fuentes de energías renovables que se encuentran cerca de su comunidad, así como también de la metodología con los resultados arrojados en cada fase, obteniendo una correcta apropiación de este tipo de tecnologías por parte de la comunidad educativa Luis López de Mesa, generando sensibilización y creando una cultura sobre el cuidado del ambiente.

### 3.6. Socialización con la comunidad

Se presentaron los resultados obtenidos en las anteriores fases por medio de una reunión virtual entre los autores de esta investigación con el cuerpo directivo docente y el docente en el área de ciencias naturales del Centro Educativo Luis López de Mesa. El personal de la institución educativa expresó un notable interés sobre el tema tratado en este artículo, y que en mayor medida le ha llamado la atención el componente teórico y didáctico que fundamenta la metodología, por otro lado, afirma que conoce proyectos sostenibles en municipios cercanos, pero que no cuentan con el impacto social suficiente para la comunidad.

Las directivas del centro educativo hacen un llamado de atención sobre lo que es el costo de la energía, el cual es muy alto, siendo ellos tipo 6, es decir, el máximo en la escala, igualmente manifestaron que debería ser, al contrario, ya que ellos no generan recursos, más bien los gastan, y es que el valor generado por ellos está en el resultado del proceso de la didáctica, en el valor del aprendizaje.

Adicionalmente, resaltan el papel de las universidades públicas, en especial la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, respecto a investigaciones técnico-científicas que integran a las instituciones de educación básica y media de carácter rural, a fin de contribuir con su desarrollo social y tecnológico.

## 4. Discusión y conclusiones

Se elaboró una metodología para el diseño de un sistema de energía híbrido con enfoque didáctico que consta de las siguientes fases: reconocimiento del contexto, evaluación de alternativas energéticas, dimensionamiento y diseño, alcance del diseño, y socialización con la comunidad. Se evaluó en el centro educativo Luis López de Mesa, ubicado en el poblado de Canaguaro, Granada (Meta, Colombia), logrando proporcionar una herramienta de apoyo para el desarrollo de prácticas didácticas impartidas por los docentes, fomentando y promoviendo el uso de las energías renovables en la estructuración de las mallas curriculares, aportando al crecimiento de valores humanos y ambientales en la comunidad estudiantil de básica primaria.

El modelo de energía escolar-didáctica propuesto en la metodología elaborada y evaluado en el estudio de caso, puede ser replicado en variedad de instituciones educativas rurales, en las que se promulguen la aplicación de proyectos sostenibles a fin de fortalecer e incentivar el cuidado medioambiental a temprana edad; sin embargo, se plantea que este tome características dinámicas y sea capaz de adaptarse a las circunstancias propias de cada proyecto en caso de que se requiera.

El diseño del sistema eléctrico híbrido propuesto para el centro educativo Luis López de Mesa sugiere una reducción significativa de GEI de 838 kgCO<sub>2</sub>eq, y adicionalmente es capaz de suplir los requerimientos energéticos esenciales de la institución, en función de reducir las franjas horarias en que no se dispone del suministro por parte de la red local.

Los resultados depositados en [58] hacen referencia a que la participación de las comunidades que pertenecen a las zonas rurales del país es un factor determinante para lograr una transferencia de conocimiento, la cual puede llevar al desarrollo de proyectos energéticos sostenibles; de igual manera, los resultados expuestos en este artículo evidencian que la aplicación de metodologías y modelos de aprendizaje fundamentados en energías renovables que incluyen la participación de la comunidad académica contribuyen al desarrollo de habilidades para el manejo de proyectos energéticos sostenibles, aportando estrategias para la transferencia de conocimiento en zonas rurales del país.

Para futuras investigaciones se recomienda llevar a cabo una etapa posterior a la metodología propuesta en este artículo, que es la parte de alternativas financieras (tasa interna de retorno), a fin de crear una cooperativa a través de las juntas de acción comunal, para que el sistema no solo

sirva al colegio, sino que tenga ligados sectores productivos propios de la comunidad. Además, se puede orientar la metodología hacia el diseño y el dimensionamiento de otros tipos de soluciones energéticas, tales como la iluminación LED inteligente [59], los sensores inalámbricos para el control eficiente del uso energético [60] o las técnicas de iluminación natural pasiva [61].

## Referencias

- [1] IEA, IRENA, UNSD, WB, and WHO, *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2019*, Washington, DC, USA, The World Bank Group, 2019. [Online]. <https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/2019-TrackingSDG7-FullReport.pdf> ↑2
- [2] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, *Subastas de energía renovable y proyectos ciudadanos participativos: América Latina y el Caribe*, París, Francia, REN21, 2017. [En línea]. [https://www.wearefactor.com/docs/LAC\\_REN21.pdf](https://www.wearefactor.com/docs/LAC_REN21.pdf) ↑2
- [3] D. C. Roa Fierro y D. M. Gómez Acuña, *Implementación de proyectos de generación eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía renovable en zonas no interconectadas: estudio de caso (Puerto Carreño - Vichada)* (Tesis de Especialización), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2019. [En línea]. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/24610> ↑2
- [4] Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas, “FAQ - Información institucional”, IPSE. [En línea]. <http://www.ipse.gov.co/transparencia-y-acceso-a-informacion-publica/informacion-de-interes2/preguntas-frecuentes/2-uncategorised/83-preguntas-frecuentes-2#faqnoanchor> ↑3
- [5] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, “Evaluación de la gestión año 2019”, Departamento Nacional de Planeación, Bogotá, Colombia, 2019. [En línea]. ↑3, 4
- [6] L. Y. Serna Duque, S. Pérez Cuartas y P. A. Aristizábal Alzate, *Análisis con base en la falla del servicio público de energía en Colombia y consecuencias en su economía*, (Tesis de Especialización), Universidad Libre Seccional Pereira, Pereira, Colombia, 2016. [En línea]. <https://hdl.handle.net/10901/16796> ↑3
- [7] Congreso de la Republica de Colombia, “Ley 143 de 1994”, D. Of., No. 41.434, 12 de julio, pp. 1-34, 1994. [En línea]. [https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/667537/Ley\\_143\\_1994.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/667537/Ley_143_1994.pdf) ↑3
- [8] IEA, *Global Energy & CO2 Status Report 2019*, International Energy Agency, France, 2019. [Online]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019> ↑3
- [9] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, *Renewables 2020 Global Status Report*, París, France, REN21, 2020. [Online]. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2020\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf) ↑3
- [10] Congreso de la Republica de Colombia, “Ley 1715 de 2014”, D. Of., No. 49.150, 13 de mayo, pp. 1-16, 2014. [En línea]. [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_1715\\_2014.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html) ↑3
- [11] A. N. Figueroa Cuello, *Determinantes de la aceptación social de las tecnologías energéticas renovables desde la perspectiva del usuario líder en La Guajira - Colombia*, (Tesis de Maestría), Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2019. [En línea]. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/4924> ↑3
- [12] Cepal, OLADE, BMZ, GTZ, *Situación y perspectivas de la eficiencia energética en América Latina y El Caribe*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2009. [En línea]. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3726/S2007033\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3726/S2007033_es.pdf) ↑3
- [13] N. E. Hernández Rueda y A. X. Ramírez Contreras, *Estudio sobre la sustitución por Energías Renovables (solar fotovoltaica) en las instituciones educativas de básica primaria y secundaria en Colombia: análisis y posibilidades* (Trabajo de Grado), Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia, 2015. [En línea]. <https://hdl.handle.net/11634/1071> ↑3
- [14] L. V. Guerrero Ayala, *Revisión de las energías alternativas aplicadas en colegios y su influencia en la educación ambiental colombiana* (Tesis de Especialización), Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea]. <http://hdl.handle.net/10654/16415> ↑3
- [15] M. Tostado-Véliz, P. Arévalo, and F. Jurado, “A comprehensive electrical-gas-hydrogen Microgrid model for energy management applications”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 228, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113726> ↑3

- [16] J. A. Niño-Vega, F. H. Fernández-Morales y J. E. Duarte, “Diseño de un recurso educativo digital para fomentar el uso racional de la energía eléctrica en comunidades rurales”, *Saber, Ciencia y Libertad*, vol. 14, no. 2, pp. 256-272, 2019. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2019v14n2.5889> ↑3
- [17] E. G. Merritt, N. Bowers, and S. E. Rimm-Kaufman, “Making connections: Elementary students’ ideas about electricity and energy resources”, *Renew. Energy*, vol. 138, pp. 1078-1086, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.047> ↑3
- [18] Ministerio de Educación Nacional, “Documento para la implementación de los DBA”, Gobierno de Colombia, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea]. [https://www.academia.edu/37346651/Documento\\_para\\_la\\_implementaci%C3%B3n\\_de\\_los\\_DBA\\_PRESENTACI%C3%93N\\_GENERAL\\_Y\\_POR\\_%C3%81REAS](https://www.academia.edu/37346651/Documento_para_la_implementaci%C3%B3n_de_los_DBA_PRESENTACI%C3%93N_GENERAL_Y_POR_%C3%81REAS) ↑3
- [19] R. Shelby, Y. Perez, and A. Agogino, “Co-design methodology for the development of sustainable and renewable energy systems for underserved communities: A case study with the pinoleville Pomo Nation”, in *ASME 2011 Int. Des. Eng. Tech. Conf. Comput. Inf. Eng. Conf.*, Washington, DC, USA, pp. 515-526, 2011. <https://doi.org/10.1115/DETC2011-47748> ↑4
- [20] A. del C. Miranda López, “Educación ambiental en el proceso de enseñanza-aprendizaje en primaria, secundaria y preuniversitario”, *Vinculando*, 2014. [En línea]. <https://vinculando.org/ecologia/educacion-ambiental-en-el-proceso-de-ensenanza-aprendizaje-en-primaria-secundaria-y-preuniversitario.html> ↑4
- [21] A. D. Pantoja Bucheli, J. C. Guerrero Ordoñez y J. F. Castillo Muñoz, “Metodología para el aprovechamiento de potencial energético con biomasa forestal en el departamento de Nariño: caso de estudio”, *Ing. Solidaria*, vol. 12, no. 20, pp. 43-59, 2016. <https://doi.org/10.16925/in.v19i20.1415> ↑4
- [22] L. E. Muñoz-Arracera y R. Montenegro-Santos, “Uso de la realidad aumentada en la enseñanza- aprendizaje de ciencias naturales”, *Ing Solidaria*, vol. 14, no. 24, pp. 1-9, 2018. <https://doi.org/10.16925/in.v14i24.2155> ↑4
- [23] I. Q. Mendoza, C. I. Buriticá Arboleda, N. L. Rondón Flórez y J. S. Bedoya Fierro, “Metodología para el proyecto sostenible de energía comunitaria en la comunidad indígena Aico en Tolima - Colombia”, *Brazilian J. Develop.*, vol. 6, no. 10, pp. 74182-74202, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-009> ↑4
- [24] D. M. López-Valentín, M. T. Guerra-Ramos y L. G. Pulido-Córdoba, “Enseñanza de la energía eléctrica en educación primaria: desarrollo de una unidad didáctica”, *Enseñanza de las ciencias: Rev. Investig. Exp., Didác.*, no. extra, pp. 2002-2007, 2013. [En línea]. <https://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/307674> ↑
- [25] C. A. Guevara Páez, *Caracterización de la infraestructura tecnológica, las organizaciones y el apoyo institucional en la agroindustria de los municipios de Granada, Fuente de Oro y el Castillo-Meta para los Planes de Energización Rural Sostenibles-Pers: una opción para el desarrollo rural productivo* (Trabajo de Grado), Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia, 2019. [En línea]. <https://repositorio.unillanos.edu.co/handle/001/1333> ↑4
- [26] Presidencia de la República de Colombia, “Decreto 1860 de 1994”, *D. Of.*, no. 41.473, 5 de agosto, pp. 1-29, 1994. [En línea]. [https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-172061\\_archivo\\_pdf\\_decreto1860\\_94.pdf](https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-172061_archivo_pdf_decreto1860_94.pdf) ↑6
- [27] Ministerio de Educación Nacional, “Proyecto Educativo Institucional - PEI”, MEN. <https://www.mineducacion.gov.co/1621/article-79361.html> ↑6
- [28] Presidencia de la República de Colombia, “Decreto 1743 de 1994”, *D. Of.*, no. 41.476, 5 de agosto, pp. 1-8, 1994, [En línea]. <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1342748> ↑6
- [29] Ministerio de Educación Nacional, “Educación Ambiental”, *Altablero*, no. 36, agosto - septiembre 2005. <https://www.mineducacion.gov.co/1621/propertyvalue-31665.html> ↑6
- [30] El Meta Turístico, “El Meta, la magia del Llano”, El Meta Turístico. [En línea]. <https://elmetaturistico.wordpress.com/geografia/> ↑8
- [31] J. Martí Herrero, *Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación*, La Paz, Bolivia: GTZ-Enegía, 2008. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1048.6242> ↑8
- [32] C. L. Trujillo Rodríguez et al., “Capítulo 3. Medición recurso solar para aplicaciones fotovoltaicas y térmicas”, en *Microrredes eléctricas*, Bogotá, Colombia: Editorial UD, 2015, pp. 47-59. ↑8
- [33] Datos Abiertos Colombia, “Velocidad Viento”, *Gestión de datos y red meteorológica*, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019. [En línea]. <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Velocidad-Viento/sqfv-3yp8> ↑9

- [34] J. M. Guevara Díaz, “Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica”, *Terra*, vol. 29 no. 46, 2013. [En línea]. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1012-70892013000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-70892013000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es) ↑9
- [35] D. Abramkina, and K. Agakhanova, “Consideration of wind speed changes in the design of ventilation systems for high-rise buildings”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/661/1/012131> ↑9
- [36] A. K. Nayak, and K. B. Mohanty, “Analysis of wind characteristics using ARMA & Weibull distribution”, *2018 National Power Eng. Conf. (NPEC)*, 2018. <https://doi.org/10.1109/NPEC.2018.8476717> ↑10
- [37] SolarStore, “Roof Mount 3000w (3 kw) Vertical Axis Wind Turbine”, Sun-Surfs Solar Online Store, 2021. [Online]. [https://www.solarstore.co/Roof-Mount-3000w-3-kw-Vertical-Axis-Wind-Turbine-\\_p\\_13.html](https://www.solarstore.co/Roof-Mount-3000w-3-kw-Vertical-Axis-Wind-Turbine-_p_13.html) ↑11
- [38] L. P. Gómez Hastamorir, “Situación actual de Granada Meta en relación a la salud pública y los daños medioambientales”, *Boletín Semillas Ambientales*, vol. 11, no. 1, pp. 40-60, 2017. [En línea]. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/bsa/article/view/12232> ↑11
- [39] E. Rúa-Ramírez, I. Mendoza-Jiménez, E. Torres-Suarez, E. Flórez-Serrano y J. Serrano-Rico, “Banco de pruebas didáctico para aprendizaje y medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos”, *UIS Ing.*, vol. 20, no. 2, pp. 1-9, 2021. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021001> ↑11
- [40] J. C. Chávez Soto, and J. P. Medina Sánchez, “Estudio y dimensionamiento de un sistema híbrido eólico solar para el alumbrado de las vías y el cerco perimétrico del campus universitario de la Universidad Nacional del Santa (Tesis)”, Universidad Nacional del Santa, Chimbote, Perú, 2014. [En línea]. <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/1929> ↑11
- [41] Yangtze Power, “Yangtze 96 Cells 48V China 500W-550W Solar Panel”, Yangtze Solar Power Online Store, 2021. [Online]. <https://yangtze-power.en.made-in-china.com/product/ydnJOSgjAmhp/China-Yangtze-96-Cells-48V-China-500W-550W-Solar-Panel.html> ↑11
- [42] A. B. Llamuca Landa y A. X. Caisaguano Moreano, “Control y monitoreo de un sistema de generación de energía eléctrica con paneles solares para el alumbrado público en la Facultad de Informática y Electrónica (Tesis)”, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2016. [En línea]. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/6127> ↑12
- [43] E. J. Contreras Barahona y W. A. Piragauta Castañeda, “Diseño de planta fotovoltaica en el campus de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Villavicencio Meta, Colombia (Trabajo de Grado)”, Universidad Cooperativa de Colombia, Villavicencio, Colombia, 2018. [En línea]. <http://hdl.handle.net/20.500.12494/4181> ↑12
- [44] C. R. Prado Mora, “Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada” (Tesis), Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2008. ↑12
- [45] S. C. Rodríguez Oliva, “Inversor para panel solar” (Trabajo de Grado), Universidad de la Laguna, San Cristóbal de La Laguna, España, 2019. [En línea]. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/16545> ↑12
- [46] W. E. Lindao Suárez, “Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en casa comunal de Cooperativa Los Paracaidistas en la ciudad de Guayaquil”, Universidad Católica de Santiago, Guayaquil, Ecuador, 2020. [En línea]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/14365> ↑12
- [47] H. J. Correa Montenegro y V. J. Gonzáles Silva, “Diseño de un Sistema fotovoltaico autónomo para la generación de energía eléctrica en la Institución Educativa N°287 de la Comunidad Nativa Villa Gonzalo, Distrito Río Santiago, Provincia Condorcanqui, Departamento de Amazonas” (Tesis), Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú, 2018. [En línea]. <https://hdl.handle.net/20.500.12893/2198> ↑12, 13
- [48] C. A. Robles Algarín, “Sistemas híbridos: una estrategia para mejorar la eficiencia en los paneles solares”, *Ing. Solidaria*, vol. 7, no. 12-13, pp. 62-67, 2011. [En línea]. <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/view/357> ↑12
- [49] B. Sreewirote, A. Noppakant, and C. Pothisarn, “Increasing efficiency of an electricity production system from solar energy with a method of reducing solar panel temperature”, *2017 Int. Conf. on Applied System Innovation (ICASI)*, pp. 1308-1311, 2017. <https://doi.org/10.1109/ICASI.2017.7988141> ↑12
- [50] Lidarsolar, “Batería Classic OPzS Solar 3850. 3765 Ah/C-100 2v”, Lidarsolar Online Store, 2021. [En línea]. [https://www.lidarsolar.es/epages/940338785.sf/es\\_ES/?ObjectPath=/Shops/940338785/Products/AE376510](https://www.lidarsolar.es/epages/940338785.sf/es_ES/?ObjectPath=/Shops/940338785/Products/AE376510) ↑12
- [51] F. C. Palma Tomás, “Abastecimiento energético de una vivienda aislada de la red” (Trabajo de Grado), Uni-

- versidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2017. [En línea]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/74833> ↑13
- [52] Coleman Air, “Coleman Air C440-HVA 440 Amp 12/24/48V Volt Wind/Solar Battery Charge Controller”, Coleman Air Online Store, 2021. [Online]. [https://www.colemanair.us/vp\\_asp/scripts/shopexd.asp?id=650](https://www.colemanair.us/vp_asp/scripts/shopexd.asp?id=650) ↑13
- [53] AliExpress, “JNGE-controlador de carga Solar sin conexión a la red, regulador Solar para sistema de energía Solar, 200A”, *AliExpress Online Store*, 2021. [En línea]. <https://es.aliexpress.com/item/32832031998.html?spm=a219c.12057483.0.0.51662dalrbi6lk> ↑13
- [54] AliExpress, “Inversor de potencia Solar sin red, 3500W, 48V, 30a, regulador Solar MPPT, 48V CC a 110V/120V CA, 50hz, 60hz, inversor UPS”, *AliExpress Online Store*, 2021. [En línea]. <https://es.aliexpress.com/item/4000211886178.html> ↑13
- [55] K. J. Huérfano Rodríguez y M. C. Gómez Contreras, “Dimensionamiento e implementación de un sistema híbrido eólico - solar fotovoltaico para abastecimiento de energía eléctrica en la institución Luis Carlos Galán de Cazucá, Soacha” (Trabajo de Grado), Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, 2020. [En línea]. <http://hdl.handle.net/11634/30293> ↑13
- [56] Unidad de Planeación Minero Energética UPME, “Resolución 642 de 2019”, *D. Of.*, no. 51.179, 27 de diciembre, pp. 1-3, 2019. [En línea]. [https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion\\_upme\\_0642\\_2019.htm](https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_upme_0642_2019.htm) ↑14
- [57] J. E. Barrantes Clavijo, F. D. Salgado Martínez y D. J. Rodríguez Patarroyo, *Educación occidental... ¿o educación propia? Un dilema. Análisis de prácticas pedagógicas en el departamento de Guainía*, Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de Pedagogía, 2019. ↑14
- [58] M. Bueno López y P. Rodriguez-Sanchez. “Apropiación del conocimiento en proyectos energéticos a pequeña escala: factor clave para el desarrollo sostenible”. En *V Foro Bienal Iberoamericano de Estudios del Desarrollo*. [En línea]. [https://www.researchgate.net/publication/332333547\\_Apropiacion\\_del\\_conocimiento\\_en\\_proyectos\\_energeticos\\_a\\_pequena\\_escala\\_factor\\_clave\\_para\\_el\\_desarrollo\\_sostenible](https://www.researchgate.net/publication/332333547_Apropiacion_del_conocimiento_en_proyectos_energeticos_a_pequena_escala_factor_clave_para_el_desarrollo_sostenible) ↑16
- [59] D. J. Rodríguez Patarroyo, I. F. Cely Garzón, and C. A. Letrado Forero, “Revision of smart street lighting LED”, *Ing. Solidaria*, vol. 15, no. 28, pp. 1-28, 2019. <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2019.02.09> ↑17
- [60] J. Blanco, A. García, and J. De las Morenas, “Design and implementation of a wireless sensor and actuator network to support the intelligent control of efficient energy usage”, *Sensors*, vol. 18, no. 6, pp. 1-16, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18061892> ↑17
- [61] B. J. Al-Khatatbeh and S. N. Ma'bdeh, “Improving visual comfort and energy efficiency in existing classrooms using passive daylighting techniques”, *Energy Proc.*, vol. 136, pp. 102-108, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.294> ↑17

---

### Diego Alejandro Zambrano Joya

Estudiante de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Actualmente pertenece al semillero LIFAE (Laboratorio de Investigación de Fuentes Alternativas de Energía) en la misma institución universitaria. Correo electrónico: dazambranoj@correo.udistrital.edu.co

---

### David Leonardo Rodríguez Salazar

Estudiante de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Actualmente pertenece al semillero LIFAE (Laboratorio de Investigación de Fuentes Alternativas de Energía) en la misma institución universitaria. Correo electrónico: dlrodriguez@correo.udistrital.edu.co

---

### Diego Julián Rodríguez Patarroyo

Doctor en Ingeniería de Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad Nacional de Colombia; Magíster en Física, Universidad Nacional de Colombia; docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Investigador del semillero LIFAE (Laboratorio de Investigación de Fuentes Alternativas de Energía). Correo electrónico: djrodriguez@udistrital.edu.co

## Research

**Charge Structure Analysis of Two Thunderstorms Recorded by the Lightning Mapping Array Network in the Colombian Magdalena Medio***Análisis de estructuras de carga de dos tormentas eléctricas registradas por la red Lightning Mapping Array en el Magdalena Medio colombiano***Brandon Ardila Murillo\*<sup>1</sup>, Edison Soto Ríos<sup>1</sup>, Didier Argüello Barbosa<sup>1</sup>, Heribert Tello Rodríguez<sup>1</sup>, Jesús López Trujillo<sup>2</sup>, Joan Montanyà<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL, Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia), <sup>2</sup>Lightning Research Group LRG, Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona, España). Correspondence: E-mail: brandon2208141@correo.uis.edu.co - easotor@uis.edu.co

Recibido: 27/04/2021. Modificado: 06/07/2021. Aceptado: 04/10/2021.

**Abstract****Context:** From the location of the Lightning Mapping Array (LMA) network at the borders of the municipalities of Barrancabermeja and Yondó in 2018, uninterrupted data of IC and CG flashes that occurred over this study area were taken. So far, no electrical storms have been characterized in tropical areas such as Magdalena Medio through high-resolution lightning mapping networks. Therefore, in this work, the charge structure of two thunderstorms registered by the LMA network on November 23 and 27, 2018, is determined.**Method:** Based on inspection methods, the bidirectional leader theory, the propagation differences of positive and negative leaders, and a data visualization algorithm, the heights of the recorded thunderstorms' charged regions were defined. Likewise, using information from the LINET network, possible CG flashes that occurred during the studied time windows were determined along with their corresponding currents and polarities.**Results:** Both thunderstorms had a tripolar structure; in the November 23 storm, the height of the lower positive charge region was located between 5 and 7,5 km, the negative charge region was between 7,5 and 9 km, and the upper positive between 9 and 14,5 km. In the case of the November 27 storm, the lower positive, negative, and upper positive charge regions were located between 4 and 6 km, 6 and 8,5 km, and 8,5 and 16 km, respectively.**Conclusions:** In general, the heights of the charge regions in both thunderstorms are similar to those found by the COLMA network located in Santa Marta, Magdalena. Lightning leaders were corroborated which reached maximum heights of 15,88 km, slightly lower than those reported in the northern region of Colombia.**Keywords:** charge structure, lightning leader, lightning mapping array, lightning flash, thunderstorm**Acknowledgements:** The authors would like to thank the Keraunos company for supplying data from the Colombian network for Total Lightning Detection with LINET technology, as well as the Lightning Research Group of Universitat Politècnica de Catalunya for providing data on electrical thunderstorms from the LMA network in Barrancabermeja - Yondó.**Language:** Spanish

## Open access

Cite as: Ardila, B., Soto, E., Argüello, D., Tello, H., López, J., Montanyà, J. "Análisis de estructuras de carga de dos tormentas eléctricas registradas por la red *Lightning Mapping Array* en el Magdalena Medio colombiano". *Ing*, vol. 27, no. 2, 2022. e17925. <https://doi.org/10.14483/23448393.17925>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## Resumen

**Contexto:** A partir de la ubicación de la red *Lightning Mapping Array* LMA en límites de los municipios de Barrancabermeja y Yondó en 2018, se han tomado datos ininterrumpidos de descargas IC y CG que ocurren sobre esta zona de estudio. Hasta el momento no se han caracterizado tormentas eléctricas en zonas tropicales como el Magdalena Medio mediante el uso de redes de mapeo de rayos de alta resolución y, por tanto, en este trabajo se determina la estructura de carga de dos tormentas registradas por la red Dabeiba - LMA los días 23 y 27 de noviembre de 2018.

**Método:** Basados en métodos de inspección, en la teoría del líder bidireccional, en las diferencias de propagación de líderes positivos y negativos y mediante un algoritmo de visualización de datos se definieron las alturas de los centros de carga de las tormentas estudiadas. Así mismo, usando información de la red LINET, se determinaron posibles descargas CG que ocurrieron en las ventanas de tiempo estudiadas con sus respectivas corrientes y polaridades.

**Resultados:** Ambas tormentas presentan una estructura tripolar; en la tormenta del 23 de noviembre la altura de la región de carga positiva inferior se localizó entre 5 y 7,5 km, la región de carga negativa se identificó entre 7,5 y 9 km y la positiva superior entre 9 y 14,5 km. Para el caso de la tormenta del 27 de noviembre, las regiones de carga positiva inferior, negativa y positiva superior se localizaron entre 4 y 6 km, 6 y 8,5 km y 8,5 y 16 km respectivamente.

**Conclusiones:** En general las alturas de las regiones de carga para ambas tormentas son similares a las encontradas por la red COLMA ubicada en Santa Marta, Magdalena. Se corroboraron líderes de rayos que alcanzaron alturas máximas de 15 km, un poco menores a las reportadas en la región norte de Colombia.

**Palabras clave:** descarga atmosférica, estructura de carga, líder de rayo, *Lightning Mapping Array* - LMA, tormenta eléctrica.

**Agradecimientos:** A la empresa Keraunos por el suministro de datos de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos con Tecnología LINET. Así mismo al grupo *Lightning Research Group* de Universidad Politécnica de Cataluña por suministrar los datos de tormentas eléctricas de la red LMA en Barrancabermeja - Yondó.

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

La estructura de carga de nubes de tormenta fue estudiada inicialmente a través de mediciones del campo electrostático producido por descargas atmosféricas usando el método del electrómetro esférico de Wilson [1]. Posteriormente se observaron propiedades eléctricas de tormentas tropicales oceánicas explicadas a través del proceso de electrificación de graupel [2] y se planteó una estructura de carga tripolar compuesta por una capa central negativa, una región positiva superior y una pequeña región positiva inferior [3].

Los primeros análisis de descargas atmosféricas usando sistemas *Lightning Mapping Array* - LMA se hicieron en Oklahoma y Nuevo México en 1999, basados en sistemas *Lightning Detection and Ranging* - LDAR. Este método calcula el tiempo de llegada (TOA) de la radiación impulsiva producida por fuentes emitidas durante la propagación de líderes de rayos en el rango de muy alta frecuencia (VHF), lo que permite localizar cada fuente y de esta manera reconstruir tridimensionalmente una descarga eléctrica [4]. El estudio determinó la estructura de carga eléctrica de tormentas y concluyó que el evento inicial de las descargas intranube ocurre entre la región de carga negativa principal y la positiva superior y se denomina ruptura bipolar positiva.

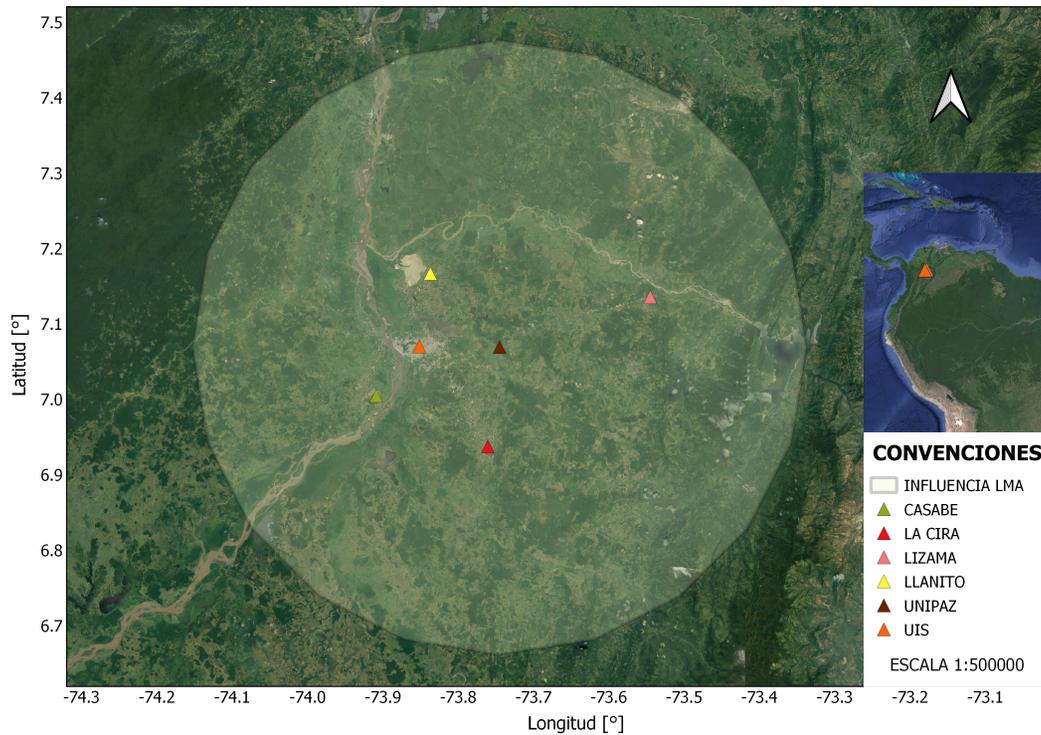
Más adelante se determinó de manera teórica y experimental la precisión de la red de mapeo de rayos ubicada entre el noreste de Kansas y el este de Colorado, de donde se concluyó que las fuentes detectadas se localizan con una incertidumbre espacial de 6 a 12 metros en la horizontal y de 20 a 30 metros en la vertical y una incertidumbre temporal de 40 a 50 ns [5]. Estudios subsiguientes compararon mediciones de campo eléctrico con datos de sistemas LMA e indicaron que las fuentes de radiación iniciales en un rayo ocurren en o cerca de la ubicación del inicio de la descarga dentro de un radio que varía entre 30 y 400 metros, lo que permitió usar en adelante las redes LMA para determinar la ubicación del inicio de una descarga eléctrica [6].

Mediante estas redes también se ha caracterizado la velocidad de propagación de líderes de rayos. En [7] se encontró que los líderes iniciales en descargas intranube comienzan a una velocidad mediana de aproximadamente  $1,6 \times 10^5$  m/s y se desaceleran durante los primeros 10 a 15 ms de la descarga. Posteriormente usando esta misma metodología se mostró que los líderes escalonados que ocasionan una descarga negativa se propagan a velocidades cercanas a  $1,3 \times 10^5$  m/s [8]. Estos sistemas se han usado en su mayoría en zonas templadas como España en donde se caracterizó el desarrollo de líderes bidireccionales y se demostró que la diferencia de velocidad cambia el potencial del líder [9]. En Estados Unidos se relacionó la estructura de carga de tormentas con la altitud de las descargas [10] y se realizaron otras investigaciones en zonas tropicales como Brasil en donde también se estudiaron propiedades de nubes de tormenta [11].

Dentro del marco del proyecto de ASIM ([www.asim.dk](http://www.asim.dk)) y con el apoyo de la Universidad Politécnica de Cataluña se instaló por primera vez en el país una red LMA denominada Colombian Lightning Mapping Array - COLMA ubicada en Santa Marta entre los años 2015 y 2017. Los primeros hallazgos determinaron que las nubes de tormenta en zonas tropicales tienen una extensión vertical de entre 3 y 15 km de altura y que la mayoría de líderes de rayo inician cerca de los 10 km de altura, 2 km más altos en comparación con tormentas estudiadas en España [12]. Posteriormente se encontró que las tormentas tropicales en la zona presentan una estructura tripolar en la que la región de carga positiva superior se encuentra entre 10 y 15 km, la negativa central entre 6 y 9 km y la positiva inferior entre 4 y 6 km, estas dos últimas se ubican entre 2 y 3 km por encima de tormentas medidas en Florida y se hallaron además líderes que se propagaron a alturas de hasta 16 km [13].

En 2018 la Universidad Politécnica de Cataluña, con el apoyo de la Universidad Industrial de Santander UIS y la empresa Keraunos, decidió trasladar la red COLMA al Magdalena Medio con el fin de caracterizar tormentas tropicales en una región de alta actividad de rayos. Para este estudio la red se ubicó entre los municipios de Barrancabermeja y Yondó, y tomó el nombre de Dabeiba - LMA, inspirado en la bondad Dabeiba de la cultura indígena Katia. Las ubicaciones de las estaciones se observan en la Figura 1 donde cuatro de ellas corresponden a campos petroleros de Ecopetrol (Lisama, La Cira, Llanito y Casabe) y las restantes se localizan en la sede de la UIS en Barrancabermeja y en la Unipaz (Instituto Universitario de la Paz). La zona sombreada corresponde al radio de influencia de la red Dabeiba - LMA (45 km medidos desde la estación Unipaz) en donde la eficiencia en la detección y localización de las fuentes emitidas por líderes de rayos es óptima.

Hasta el momento no se han caracterizado tormentas eléctricas en zonas ecuatoriales como el Magdalena Medio mediante el uso de redes de mapeo de rayos de alta resolución; por lo tanto, en este trabajo se determina la estructura de carga de dos tormentas registradas por la red Dabeiba -



**Figura 1.** Ubicación de los sensores de la red Dabeiba - LMA en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, Santander

LMA los días 23 y 27 de noviembre de 2018. Se usa el método de inspección y la teoría del líder bidireccional para analizar descargas individuales a través del gráfico de tiempo-distancia desarrollado en [9], el cual compara las velocidades de propagación de los líderes mapeados y de esta manera permite encontrar su polaridad e inferir la estructura de carga de la nube de tormenta. Dado que las redes LMA pierden eficiencia en la detección de fuentes a alturas bajas, p. ej. a un kilómetro, se incluye información de la red LINET que localiza los impactos de rayo ocurridos durante las tormentas estudiadas.

Este artículo presenta en su segunda sección la metodología aplicada con el fin de delimitar las alturas de los centros de carga, muestra a modo de resultados en su tercera sección algunos ejemplos de las descargas individuales que se estudiaron con el fin de demarcar cada una de estas regiones. En la cuarta sección se discuten los resultados obtenidos y se comparan con los encontrados en otros estudios, y por último en su quinta sección presenta a modo de conclusiones las características encontradas en estos dos casos de estudio en cuanto a altura de las regiones de carga y alturas de iniciación y de propagación de líderes mapeados.

## 2. Metodología

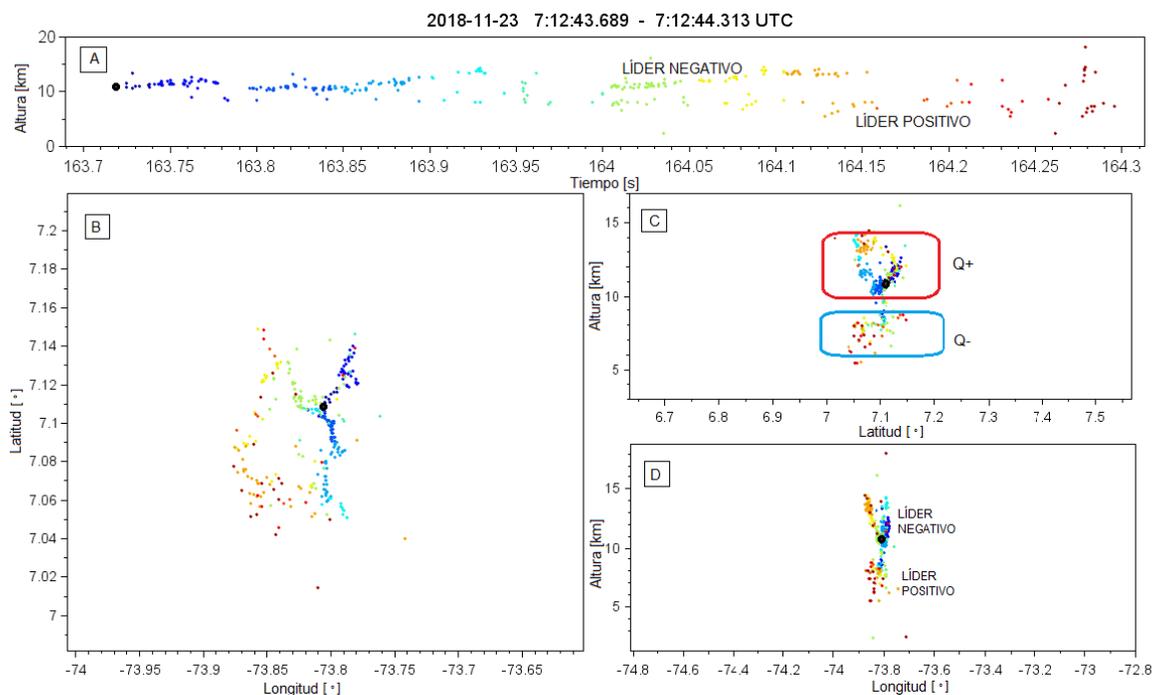
### 2.1. Determinación de la estructura de carga

La teoría del líder bidireccional expuesta por primera vez en [14] afirma que las descargas atmosféricas se inician entre regiones de carga con polaridad opuesta, debido al elevado campo eléctrico que existe entre ellas, y se extienden como árboles de doble extremo, uno negativo (líder negativo)

que se propaga sobre regiones de carga positiva, y uno positivo (líder positivo) en dirección contraria sobre regiones de carga negativa [15], [16].

Basados en lo anterior se logra determinar regiones de carga a través de la localización de fuentes VHF emitidas en los procesos de propagación de líderes de rayos, entendiendo que un líder negativo es más visible que un líder positivo en las frecuencias de radio usadas por la red LMA, lo que da como resultado líderes negativos densamente mapeados en comparación con los líderes positivos [4]. Esto indica que una descarga atmosférica tiene un número relativamente mayor de fuentes mapeadas dentro de las regiones de carga positiva involucradas en su desarrollo en comparación con las fuentes mapeadas en regiones de carga negativa [16].

La determinación de esta última región se logra parcialmente a través de líderes de retroceso que son líderes negativos que se desplazan hacia el origen de la descarga a través de los canales ionizados que dejan los líderes positivos cuando no logran seguir propagándose [17]. Estos líderes intentan re-ionizar el canal formado por el líder positivo. Teniendo en cuenta lo anterior y entendiendo que los líderes positivos no producen una radiación significativa que detecte la red LMA, se usa la hipótesis de que los líderes de retroceso vuelven a trazar partes de los canales dejados por líderes positivos, lo que sirve para determinar parcialmente regiones de carga negativa que se caracterizan por una reducida cantidad de fuentes mapeadas [18]. La Figura 2 muestra una descarga bidireccional individual (flash) en donde se localizan las regiones de carga a través de la identificación de líderes positivos y negativos.



**Figura 2.** Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:12:43.689 y las 7:12:44.313 UTC. El panel A representa la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial o vista de planta en latitud-longitud (0.1° en latitud es igual a 11,11 km), el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo (el color se usa para visualizar la ocurrencia temporal de la descarga) y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

## 2.2. Visualización de datos

Mediante el algoritmo LMA Zoom-Viewer desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña - UPC por el grupo de investigación Lightning Research Group - LRG se obtiene la ubicación espaciotemporal de las fuentes mapeadas en la propagación de líderes de rayo, usando paneles de diez minutos de duración como los de las Figuras 3 y 12 y a través de la evolución de descargas individuales mostradas en paneles como el de la Figura 4. Lo anterior permite definir las alturas de las regiones de carga usando el método de inspección, esto es, regiones de carga positiva identificadas por una gran cantidad de fuentes mapeadas y regiones negativas por un reducido número de fuentes. Este algoritmo determina la altura de iniciación de descargas y tasas promedio de rayos entre otros.

## 2.3. Red Colombiana de Detección Total de Rayos LINET

En 2011 entra en operación la red de localización y detección de rayos LINET, propiedad de Ke-raunos SAS. Esta red opera en rangos de frecuencia VLF/LF y es un sistema Total Lightning que entrega parámetros para cada impacto de rayo (*stroke*) como el tiempo de ocurrencia, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno, polaridad, tipo de descarga, altura de emisión y forma de onda, usando técnicas de tiempo de arribo con modificaciones para obtener soluciones en 3D [19], [20].

Para la obtención de estos datos se ubicaron 19 sensores en lugares estratégicos del territorio nacional con líneas base entre 90 y 140 km [13]. Cada estación de medida se conforma de una antena de campo magnético que opera en las frecuencias VLF/LF, una antena GPS y una unidad de procesamiento de señal. Los impactos de rayo (descarga nube-tierra) detectados por la red LINET se ubican dentro de los paneles del LMA Zoom-Viewer con los símbolos 'X' para impactos con polaridad de corriente negativa (-CG stroke) y '+' para los que tienen polaridad de corriente positiva (+CG stroke).

## 2.4. Análisis tiempo-distancia de descargas (velocidad de propagación)

Se usa el gráfico de tiempo-distancia desarrollado por van der Velde y Montanyà [9], en el cual se reducen las dos dimensiones horizontales a una sola, llamada distancia a un punto de referencia, que corresponde al punto de inicio de la descarga, lo que permite que los ejes de tiempo y distancia sean relativos a la primera fuente de la descarga. Se presentan a lo largo del artículo dos tipos de gráficos de tiempo-distancia. En uno de ellos la coloración de las fuentes corresponde al tiempo, lo que permite identificar la polaridad de los líderes, dado que la variable del tiempo evita que se enmascaren entre sí. En el otro la escala de colores denota la altitud, luego el cambio de coloración de las fuentes permite determinar si un líder se propaga de forma ascendente o descendente.

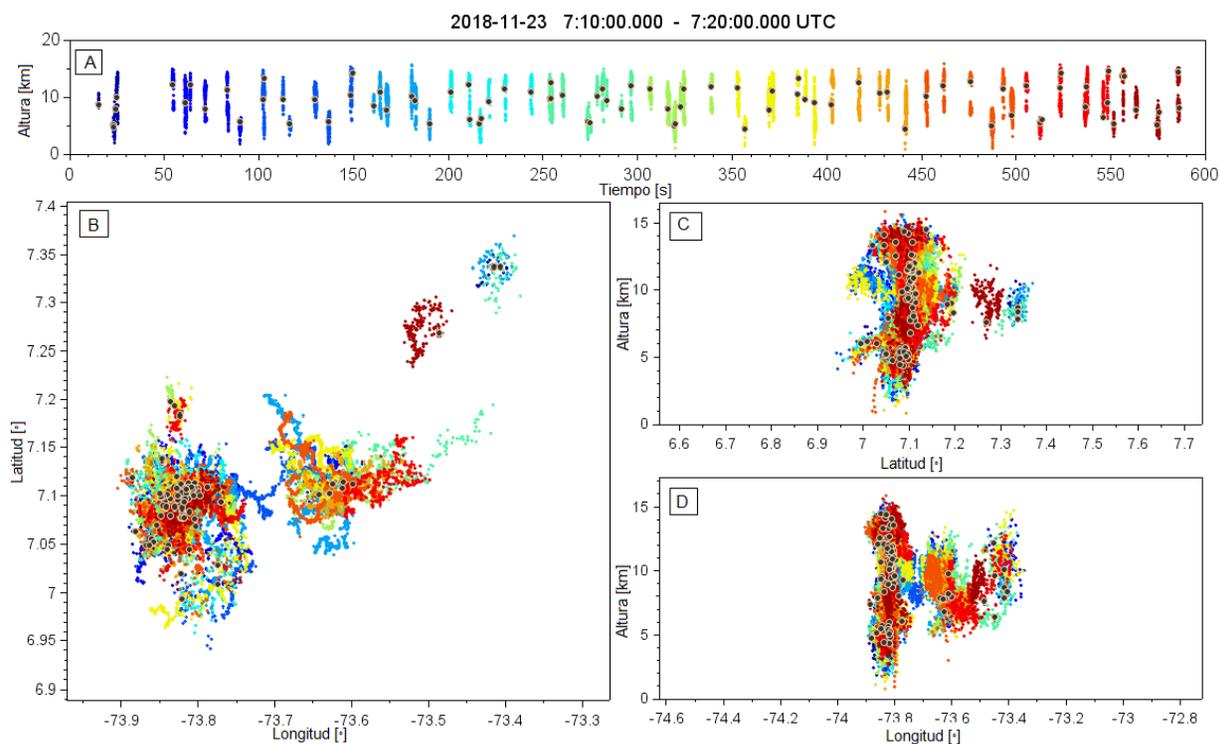
De esta manera, la pendiente que se forma con las fuentes mapeadas da una noción de la velocidad de propagación del líder y por tanto de su polaridad. Aquellas fuentes que sigan la pendiente de menor inclinación hacen referencia a las velocidades de propagación de líderes positivos ( $2 \times 10^4$  m/s) y aquellas con mayor inclinación a líderes negativos ( $1 \times 10^5$  m/s a  $1 \times 10^6$  m/s).

### 3. Resultados

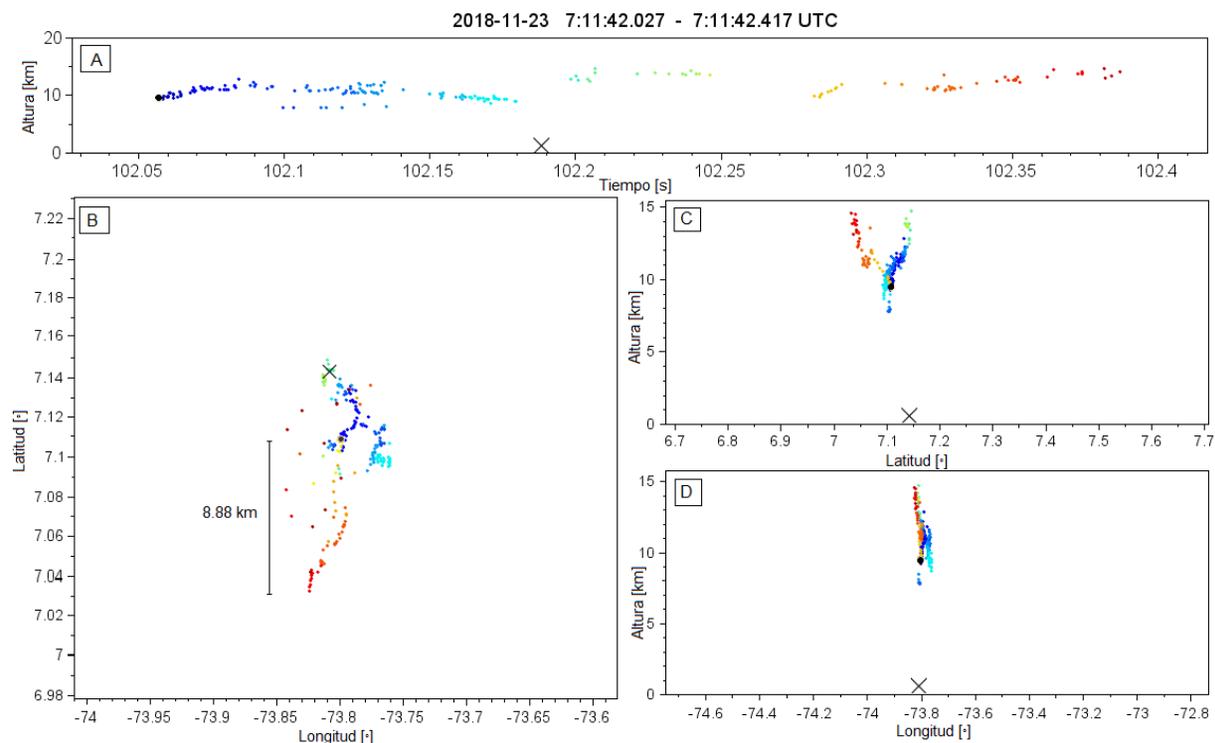
#### 3.1. Tormenta del 23 de noviembre de 2018

La Figura 3 muestra diez minutos del desarrollo espaciotemporal de una tormenta ocurrida el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:10:00 y 7:20:00 UTC. El panel A representa la variación altura-tiempo de las fuentes mapeadas, las cuales forman descargas individuales (grupo de puntos verticales). El panel B corresponde a una distribución espacial en latitud-longitud de las descargas detectadas en la que se observa la evolución horizontal de la celda inferior entre 6.98 y 7.21 grados en latitud (aprox. 25,55 km) y entre -73.42 y -73.87 grados en longitud (aprox. 49,99 km). Los paneles C y D son cortes verticales altura-latitud y altura-longitud respectivamente en donde se evidencian líderes de rayos que se propagan a alturas entre 1,71 y 15,18 km. En total se mapearon 17.375 fuentes de radiación impulsiva en VHF y se registraron 89 descargas individuales con una tasa promedio de siete rayos por minuto. El color de las fuentes para todos los paneles de la figura denota el tiempo y los puntos negros el inicio de cada descarga individual. Así mismo, durante estos diez minutos de actividad la red LINET registró 99 impactos de rayo (*strokes*) con una mediana de corriente de descarga de retorno de 21,1 kA.

A continuación se presentan algunos ejemplos del análisis realizado a las descargas individuales registradas en la Figura 3A. Se aclara que los resultados obtenidos no se basan únicamente en los ejemplos presentados con el fin de ilustrar la metodología. La Figura 4 presenta la distribución



**Figura 3.** Diez minutos de actividad de una tormenta mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:10:00 y 7:20:00 UTC. El panel A corresponde a la distribución temporal de las descargas individuales en altura-tiempo, el B representa su distribución espacial o vista de planta en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos denotan las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y los círculos negros ubican el inicio de cada descarga.

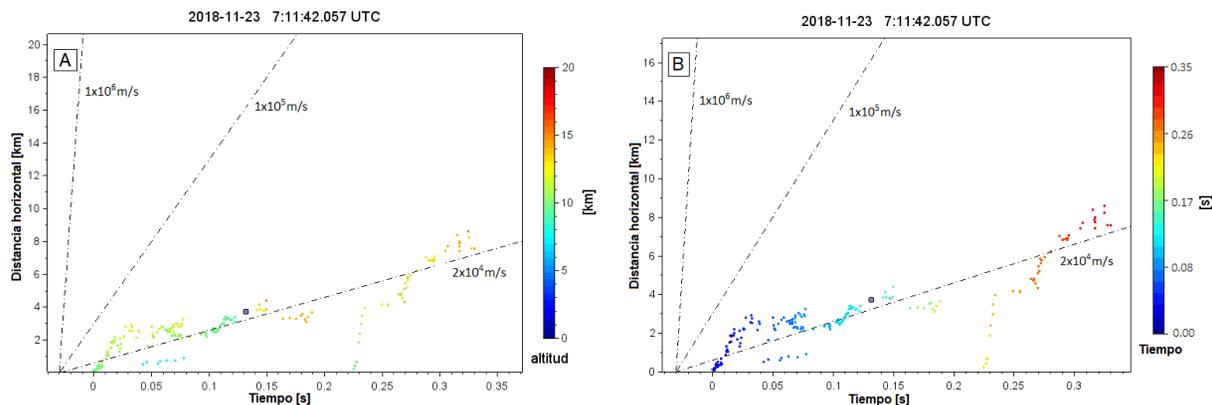


**Figura 4.** Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:11:42.027 y las 7:11:42.417 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos son fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo, el círculo negro ubica el inicio de la descarga y el símbolo X corresponde a un impacto nube-tierra negativo (-CG stroke) registrado por LINET.

espaciotemporal de las fuentes mapeadas durante una descarga ocurrida entre las 7:11:42.027 y las 7:11:42.417 UTC que inicia a una altura de 9,5 km (origen de la descarga indicado por el punto negro) y se alcanza una extensión horizontal máxima de 8,88 km desde el origen de la descarga (ver panel B) a alturas entre 7,5 y 14,5 km (ver paneles C y D).

Los paneles A, C y D de la Figura 4 muestran el desarrollo bidireccional de la descarga, puesto que se observan fuentes que ocurren en el mismo instante de tiempo (igual coloración) pero a diferentes alturas. Así mismo, la red LINET detecta un impacto -CG (símbolo X) a las 07:11:42.189 UTC en las coordenadas 7.141, -73.809 con una corriente de -12,1 kA.

La Figura 5 analiza la descarga individual presentada en la Figura 4 mediante dos gráficas de tiempo-distancia para las cuales la coloración de las fuentes en el panel A denota la altura y en el panel B el tiempo. El panel A permite observar un líder negativo ascendente que se propaga a velocidades cercanas a  $1 \times 10^5$  m/s desde una altura de 9,5 km (tono verde claro) hasta alcanzar un máximo de 13 km (tono amarillo) transcurridos 0,05 segundos después el inicio de la descarga (punto 0,0); posteriormente, a los 0,13 segundos, el líder desciende a una altura mínima cercana a los 9 km delimitando la región de carga positiva superior entre 9 y 13 km de altura. En el intervalo de 0,05 y 0,35 segundos se observan algunas fuentes de líderes negativos de retroceso que se propagan sobre los canales ionizados por líderes positivos (en adelante a estas fuentes de retroceso se les llamará únicamente líderes positivos) a altitudes entre 7,5 y 9 km (tono celeste), lo que acota a



**Figura 5.** Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 4. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada) y el recuadro ubica un impacto de rayo detectado por la red LINET. La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos ( $2 \times 10^4$  m/s) y de líderes negativos ( $1 \times 10^5$  m/s y  $1 \times 10^6$  m/s).

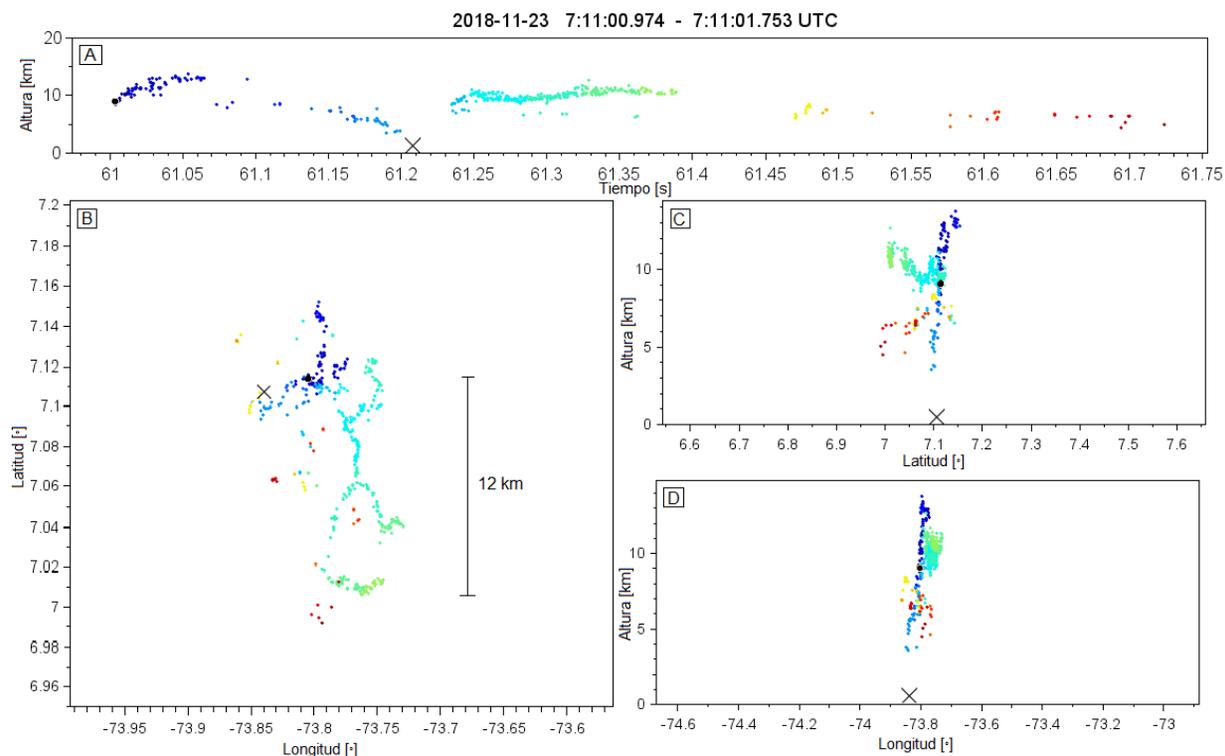
estas alturas la región de carga negativa central de la estructura de carga. La pendiente que forman estas fuentes se ajusta a los  $2 \times 10^4$  m/s correspondiente a la velocidad media de propagación de líderes positivos.

Al cabo de 0,2 segundos del inicio de la descarga se observa un líder negativo ascendente que se propaga 0,15 segundos hasta una altura máxima de 15 km (tono naranja), lo que sugiere que este líder alcanza alturas de propagación elevadas típicas en tormentas tropicales como se ha mostrado en [13]. Al mismo tiempo se observan algunas fuentes de líderes negativos en tono celeste entre los 5 y 7,5 km que delimitan la región de carga positiva inferior.

El panel B evidencia el desarrollo temporal de la descarga e identifica fuentes que ocurren en un mismo instante de tiempo (igual coloración) pero a diferente altura (diferencia de color en el panel A), lo que permite ubicar fuentes de líderes de retroceso en la región de carga negativa central.

La Figura 6 muestra una segunda descarga individual ocurrida entre las 7:11:00.974 y las 7:11:01.753 UTC que inicia a una altura de 9 km y se propaga de manera ascendente como lo muestran las fuentes en tono azul en los paneles A, C y D. Instantes después se mapean fuentes de un líder descendente a alturas entre 3 y 7 km (fuentes del panel A en tonalidad azul capri que pierden altura a lo largo del tiempo) y se registra un impacto -CG en las coordenadas 7.107, -73.840 con corriente máxima de -38.1 kA. Posteriormente se mapean fuentes de un líder ascendente (cambio de tonalidad celeste a verde en paneles A, C y D) a alturas entre 9 y 12 km el cual presenta múltiples ramificaciones y alcanza una extensión horizontal máxima de 12 km desde el punto de inicio de la descarga como se observa en el panel B.

La Figura 7 expone las gráficas de tiempo-distancia de la descarga mapeada en la Figura 6. En el panel A se observa un líder negativo ascendente que inicia a una altura de 9 km (punto 0,0) y se propaga a una altura máxima de 13 km como lo muestra el cambio de coloración de verde a amarillo en la primera pendiente. Transcurridos 0,1 segundos desde el origen de la descarga se observan algunas fuentes emitidas por líderes positivos a alturas de 8 km (tonos celestes) en donde se ubica la

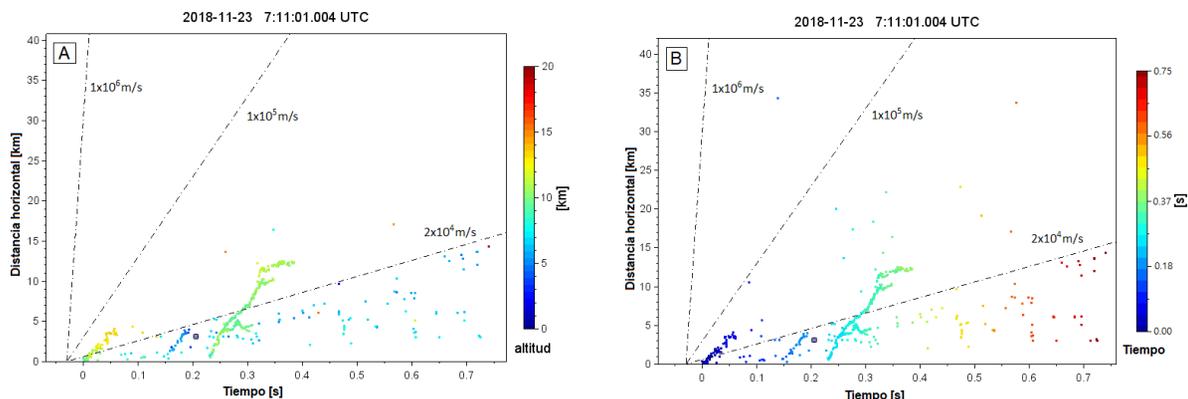


**Figura 6.** Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:11:00.974 y las 7:11:01.753 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo, el círculo negro ubica el inicio de la descarga y el símbolo X corresponde a un impacto nube-tierra negativo (-CG stroke) registrado por la red LINET.

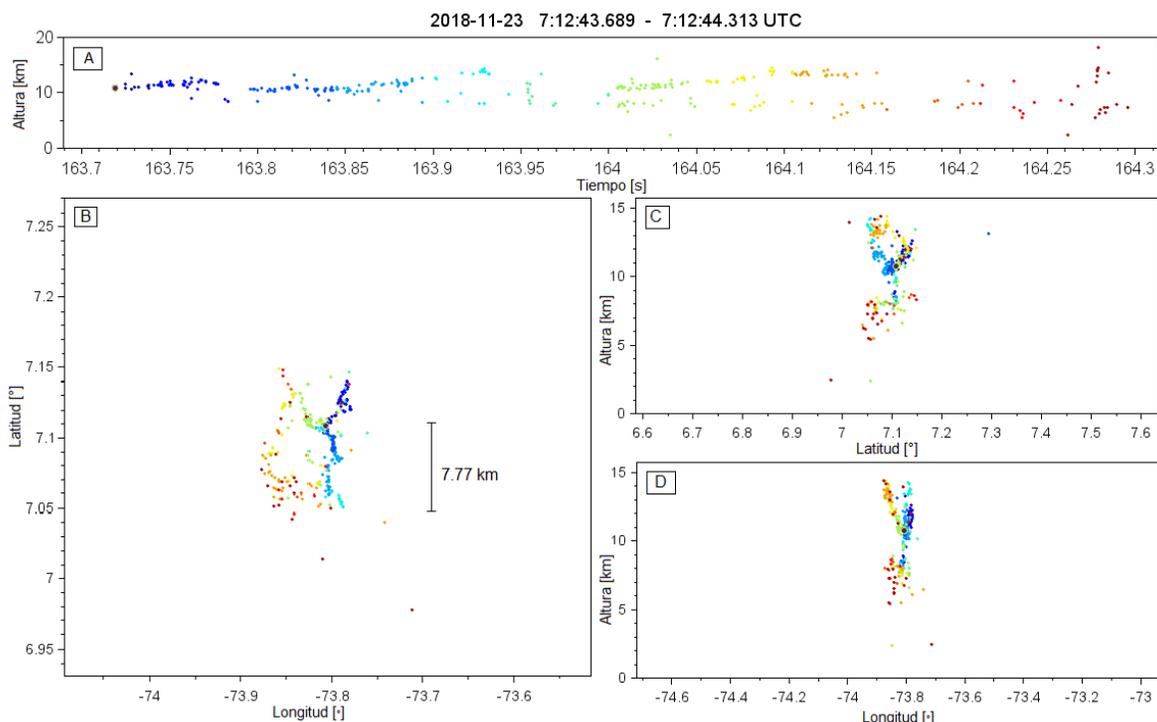
región de carga negativa. A los 0,15 segundos, a una altura de 7 km, un líder negativo descendente (indicado por la segunda pendiente con cambio de coloración azul capri) se propaga sobre la región de carga positiva inferior, cuyas últimas fuentes mapeadas se registran a alturas cercanas a los 3 km; instantes después la red LINET detecta la descarga -CG descrita.

A los 0,23 segundos del origen de la descarga inicia otro líder negativo (tercera pendiente) a alturas que varían entre 9 y 12 km denotada por las fuentes en tonos verde claro, este líder presenta algunas bifurcaciones sobre la región de carga positiva superior debido a los elevados gradientes de potencial generados por la estructura de carga y a la misma presencia del líder. Se observan fuentes emitidas por líderes positivos en los instantes de propagación de este último líder negativo y en instantes posteriores como lo evidencian las fuentes en tono celeste entre 0,35 y 0,7 segundos por debajo de la pendiente de  $2 \times 10^4$  m/s. El panel B muestra la evolución temporal de la descarga en mención y permite evidenciar el desarrollo secuencial de los líderes, lo que resulta en una mejor interpretación de la propagación de líderes en los paneles de la figura anterior.

La Figura 8 muestra una descarga individual ocurrida entre las 7:12:43.689 y las 7:12:44.313 UTC que inicia a alturas cercanas a los 10 km y se propaga en forma casi horizontal como lo evidencian las primeras fuentes en tonalidad azul del panel A. Instantes después se mapean fuentes que ganan altura con el tiempo hasta alcanzar los 15 km (tono celeste en los paneles A, C y D). Las fuentes en tonalidades verde-amarillo-naranja denotan otro líder que se propaga a alturas entre 10 y

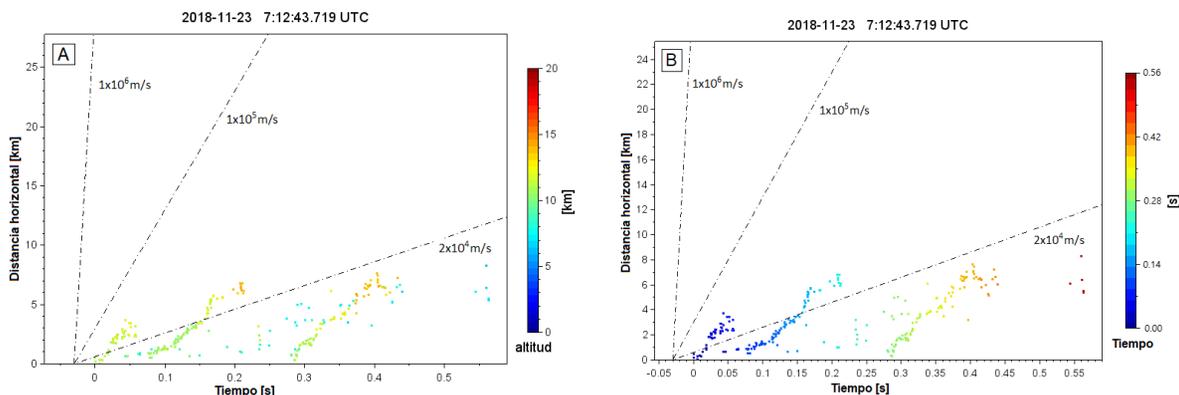


**Figura 7.** Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 6. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada) y el recuadro ubica un impacto negativo detectado por la red LINET. La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos ( $2 \times 10^4$  m/s) y de líderes negativos ( $1 \times 10^5$  m/s y  $1 \times 10^6$  m/s).



**Figura 8.** Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:12:43.689 y las 7:12:44.313 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

14 km, al mismo tiempo se mapean fuentes a alturas inferiores (ver panel A) que se relacionan con líderes de retroceso en la región de carga negativa. La descarga alcanza una extensión horizontal de 7,77 km desde el origen de la descarga evidenciados en el panel B.

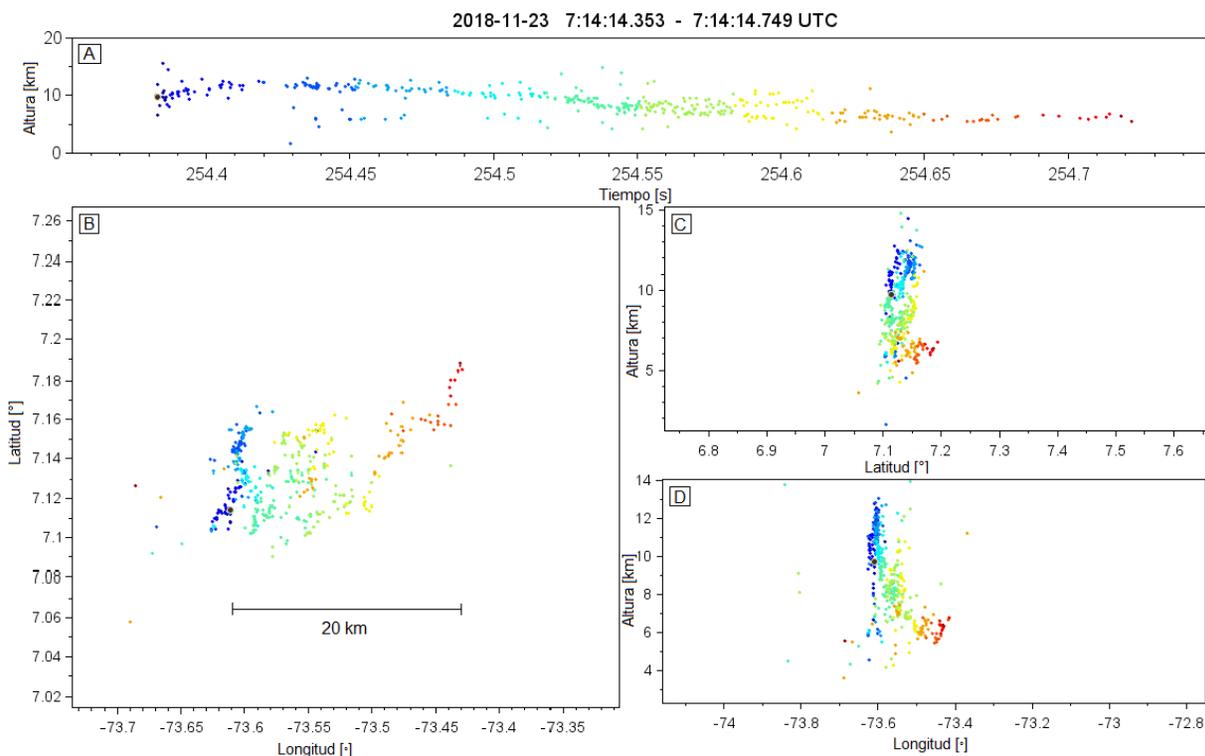


**Figura 9.** Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 8. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada). La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos ( $2 \times 10^4$  m/s) y de líderes negativos ( $1 \times 10^5$  m/s y  $1 \times 10^6$  m/s).

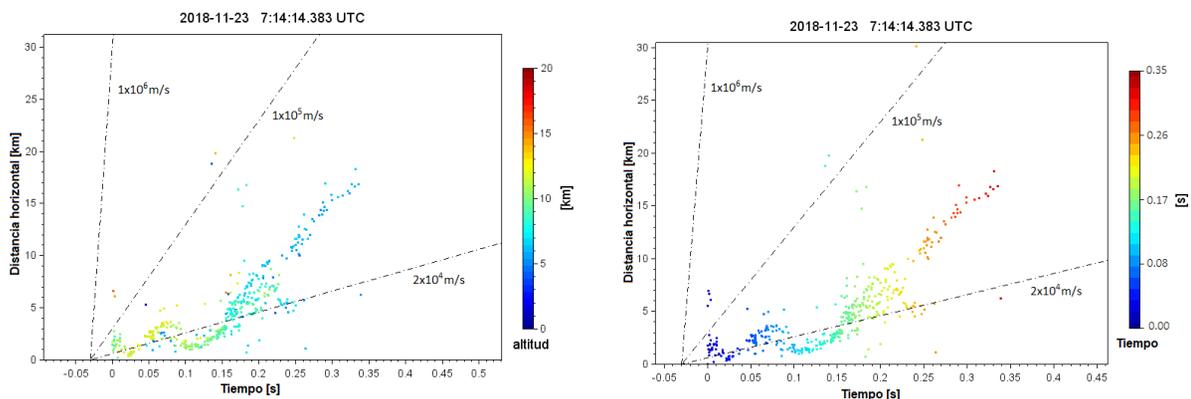
En la Figura 9 se muestran las gráficas tiempo-distancia de la descarga descrita en la Figura 8. En el panel A se observan tres líderes negativos ascendentes (como lo evidencia el cambio de coloración de verde a amarillo-naranja en las pendientes) que se propagan a velocidades cercanas a  $1 \times 10^5$  m/s y delimitan la región de carga positiva superior. El primero inicia a una altura de 10 km y se propaga hasta una altura máxima de 12,5 km, el segundo inicia a los 0,08 segundos del origen de la descarga y se eleva hasta una altura máxima de 14,5 km. El tercero inicia a los 0,29 segundos del origen de la descarga y alcanza una altura máxima de 14 km. De esta manera se define la altura máxima de la región de carga positiva superior en 14,5 km. Así mismo, se observan en color celeste las fuentes emitidas por líderes positivos a alturas en promedio de 8 km al mismo tiempo en que se propagan los líderes negativos. El panel B, cuya coloración denota el tiempo, permite evidenciar fuentes emitidas por líderes positivos, las cuales ocurren en el mismo instante (igual color) que se propagan los líderes negativos ajustados a la pendiente de  $1 \times 10^5$  m/s, pero a alturas inferiores (tono celeste de las fuentes en el panel A).

En la Figura 10, paneles A, C y D, se observa un líder que inicia a 10 km de altura hasta un máximo de 13 km para luego continuar propagándose hasta alturas mínimas cercanas a los 5,5 km. El líder alcanza una extensión horizontal total de 20 km desde el origen de la descarga como lo muestra el panel B, por lo que es probable que haya continuado propagándose horizontalmente fuera de la estructura de carga de la nube de tormenta. Los paneles C y D muestran el desarrollo bidireccional del líder que progresa en direcciones opuestas, el cual se determina dado que hay fuentes que ocurren en el mismo instante (igual tonalidad) pero a alturas sumamente diferentes, y como es de esperarse, el extremo positivo del líder presenta pocas fuentes mapeadas al mismo tiempo del desarrollo del líder negativo pero a alturas mucho menores.

La Figura 11 presenta dos versiones del gráfico de tiempo-distancia de la descarga de la Figura 10. El panel A muestra la variación en altura en donde se evidencia el comportamiento ascendente-descendente de la descarga denotado por el cambio de la coloración de las fuentes entre verde (10 km) amarillo (13 km) y azul capri (5,5 km).



**Figura 10.** Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:14:14.353 y las 7:14:14.749 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.



**Figura 11.** Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 10. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada). La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos ( $2 \times 10^4$  m/s) y de líderes negativos ( $1 \times 10^5$  m/s y  $1 \times 10^6$  m/s).

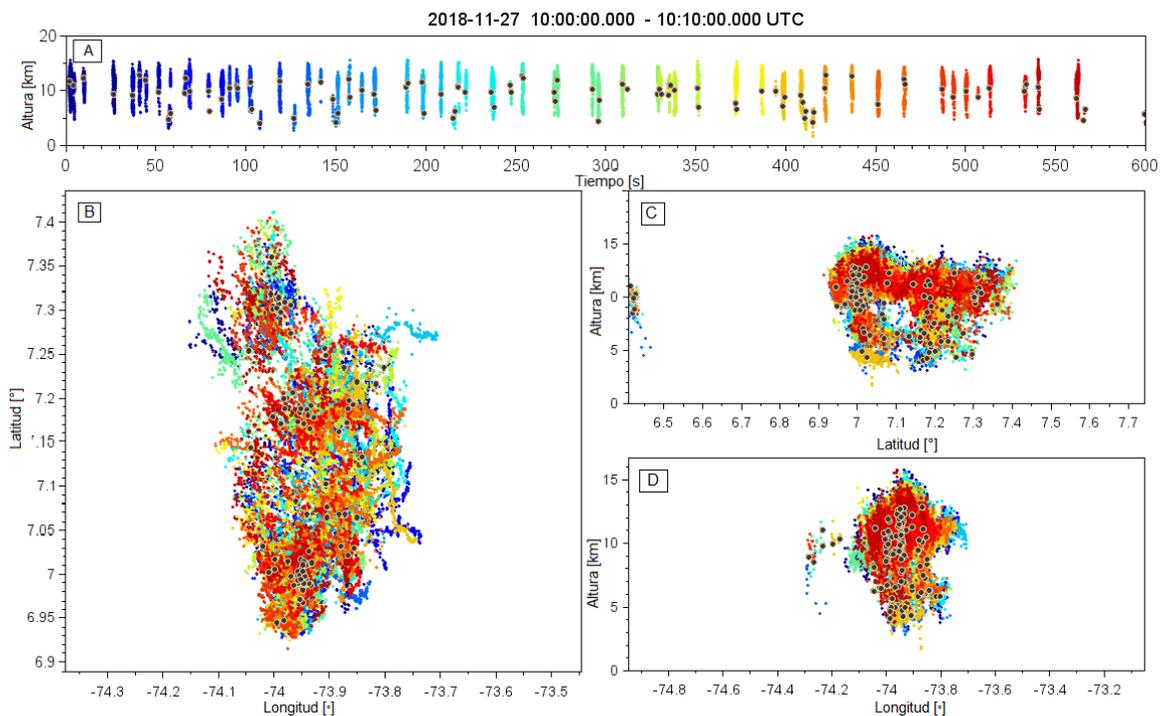
Una vez realizados los análisis de las descargas individuales se concluye que esta tormenta presenta una estructura tripolar en la que la región de carga positiva inferior se ubica entre 5 y 7,5 km, la región de carga negativa central entre 7,5 y 9 km y la región de carga positiva superior entre 9 y 14,5 km.

### 3.2. Tormenta del 27 de noviembre de 2018

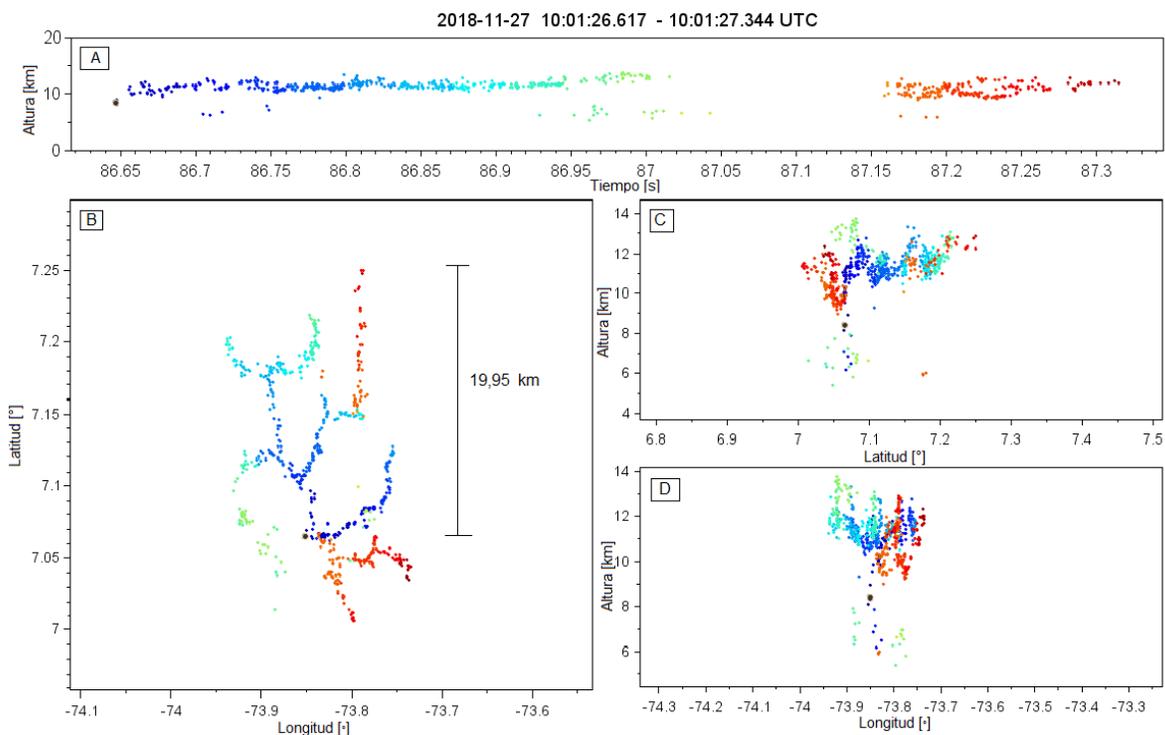
La Figura 12 muestra diez minutos de actividad de una tormenta ocurrida entre las 10:00:00 y 10:10:00 UTC del 27 de noviembre de 2018. El panel A es una distribución temporal de la descarga en altura-tiempo en donde se observan líderes de rayo que se propagan en un rango de altura entre 2,96 y 15,88 km, lo que da una noción de la extensión vertical de la estructura de carga. El panel B es una distribución espacial en latitud-longitud en la que se evidencia el desarrollo horizontal de la tormenta entre 6.93 y 7.40 grados en latitud (aprox. 52,22 km) y entre -73.75 y -74.13 grados en longitud (aprox. 42,22 km). Los paneles C y D son cortes verticales altura-latitud y altura-longitud respectivamente mediante los cuales se verifica el elevado desarrollo vertical de la tormenta.

Como datos generales se mapearon 26.476 fuentes y 100 descargas individuales con una tasa promedio de 10 rayos por minuto. El color de las fuentes para todos los paneles de la figura en mención corresponde al tiempo y los puntos negros señalan el punto de inicio u origen de cada descarga individual. Durante el desarrollo de estos diez minutos de actividad la red LINET registró 57 impactos de rayo (*strokes*) con una mediana de corriente de descarga de retorno de 18,1 kA.

Se presenta el análisis de algunas descargas individuales mostradas en la Figura 12A. La Figura 13 permite ver la disposición espaciotemporal de las fuentes localizadas durante una descarga ocurrida entre las 10:01:26.617 y las 10:01:27.344 UTC que inicia a una altura de 8,5 km (punto negro) y se extiende horizontalmente una distancia máxima de 19,95 km desde el origen de la descarga



**Figura 12.** Diez minutos de actividad de una tormenta mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:00:00 y 10:10:00 UTC. El panel A corresponde a la distribución temporal de las descargas individuales registradas en altura-tiempo, el B representa su distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y los círculos negros ubican el inicio de cada descarga.

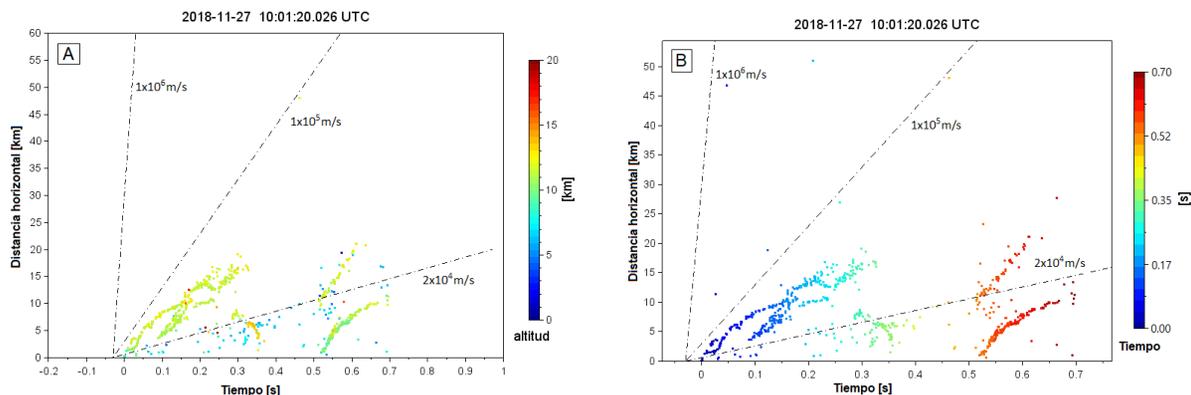


**Figura 13.** Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:01:26.617 y las 10:01:27.344 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

(ver panel B) a alturas entre 6 y 14 km, como lo muestran detalladamente los paneles A, C y D. Al mismo tiempo (igual coloración) se observan fuentes a alturas menores entre 6,6 y 8,5 km, las cuales revelan el desarrollo bidireccional del líder y corresponden a líderes positivos propagándose a través de la región de carga negativa. La polaridad de estos líderes se deduce por la poca densidad de fuentes mapeadas, lo que más adelante se comprueba con las gráficas de tiempo-distancia presentadas.

Con base en la descarga mostrada en la Figura 13, se presentan sus gráficas de tiempo-distancia en la Figura 14. El panel A muestra un líder negativo (primera pendiente) que inicia a alturas cercanas a 8,5 km y se propaga hasta alcanzar un máximo de 13 km de elevación, como lo muestra el cambio de coloración de verde a amarillo. A los 0,1 segundos del origen de la descarga inicia un nuevo líder ascendente (segunda pendiente) a una altura de 10 km y alcanza alturas máximas de hasta 13 km, este último presenta múltiples y largas ramificaciones como es característico en líderes negativos, se propaga horizontalmente una distancia de aproximadamente 16,05 km y permite ubicar la región de carga positiva superior de la nube de tormenta.

En el desarrollo de estos dos líderes descritos se observan fuentes emitidas por líderes positivos en alturas entre 6 y 8,5 km denotadas por las fuentes en coloración celeste en el panel A, lo que revela la altitud de la región de carga negativa central. Además, continuando con el mismo panel, se evidencia un líder negativo con pendiente negativa entre los 0,29 y 0,35 segundos, esto indica

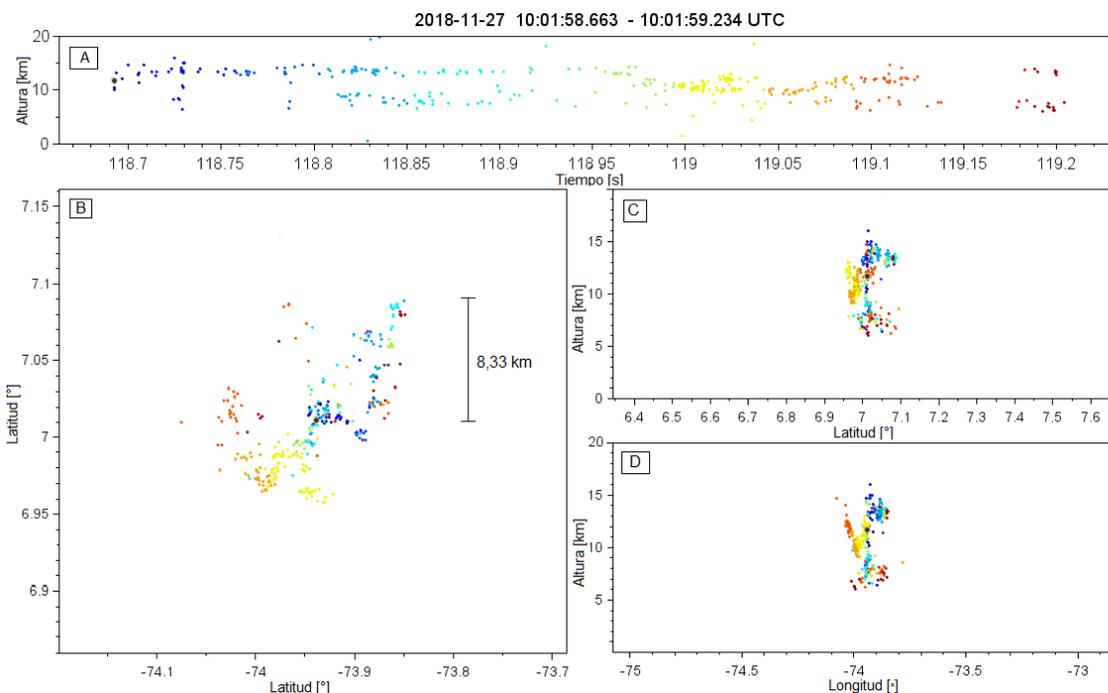


**Figura 14.** Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 13. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada). La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos ( $2 \times 10^4$  m/s) y de líderes negativos ( $1 \times 10^5$  m/s y  $1 \times 10^6$  m/s).

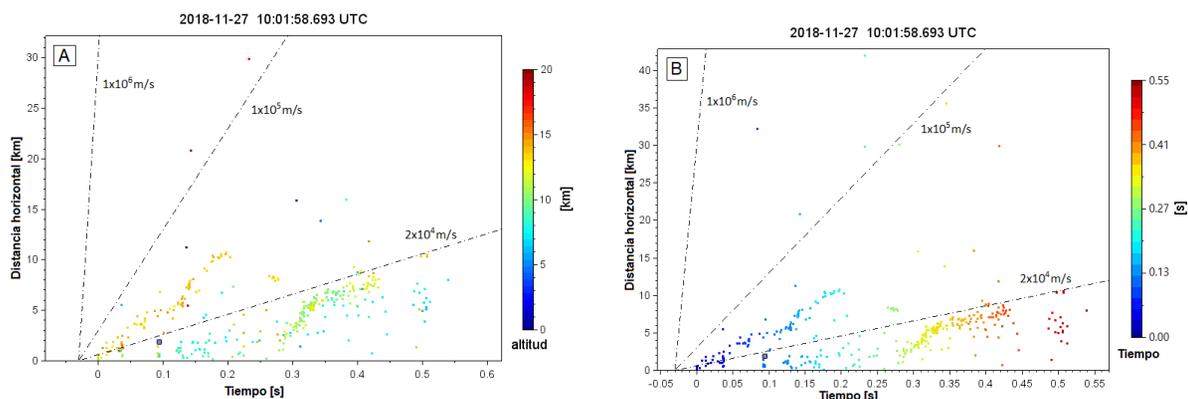
que se está acercando al punto de referencia (origen de la descarga en 0,0) pero ganando altura con respecto a este (como se evidencia en el cambio de coloración en altura de verde a naranja en la tercera pendiente). A los 0,53 segundos del origen de la descarga se inician simultáneamente dos líderes negativos ascendentes a alturas de 9 y 10 km y alcanzan alturas cercanas a los 12 km (cambio de coloración verde a amarillo de las dos últimas pendientes), lo que corrobora la ubicación de la región de carga positiva superior. La simultaneidad de estos dos líderes se observa en el panel B (variación temporal), donde las fuentes que conforman las dos pendientes ubicadas a la derecha aparecen con la misma coloración, lo que significa que ocurrieron entre los mismos instantes de tiempo. Así mismo, en este último panel se evidencian las fuentes de líderes positivos por debajo de la pendiente de  $2 \times 10^4$  m/s al mismo tiempo que se propagan los líderes negativos a velocidades cercanas a  $1 \times 10^5$  m/s.

En la Figura 15 se muestra una descarga mapeada entre las 10:01:58.663 y 10:01:59.234 UTC cuyo punto de iniciación se ubica a una altura de 11,5 km. Los paneles A, C y D permiten ver la altitud de las fuentes mapeadas, de donde se deduce que los líderes se propagaron a alturas entre 6 y 16 km con una extensión horizontal máxima de 8,33 km desde el origen de la descarga (ver panel B).

En la Figura 16 se presentan dos versiones del gráfico de tiempo-distancia de la descarga analizada en la Figura 15. El panel A muestra un líder ascendente negativo que inicia a una altura de 11,5 km (tono amarillo) hasta alcanzar un máximo de 16 km (tono naranja) demarcando la región de carga positiva superior de la estructura de carga que para este caso se ubica entre 8,5 y 16 km. Paralelo al desarrollo de este líder aparecen fuentes emitidas por líderes positivos entre 7 y 8,5 km (tono celeste). Al cabo de los 0,3 segundos del inicio de la descarga se origina un nuevo líder negativo ascendente a una altura de 10 km alcanzando una altura máxima de 12 km, como lo denota el cambio de tonalidad de las fuentes de verde a amarillo. Se observan fuentes de líderes positivos a alturas entre 6 y 8 km (tono celeste) que corresponden a propagaciones muy bajas en la región negativa central, la cual queda delimitada entre 6 y 8,5 km.

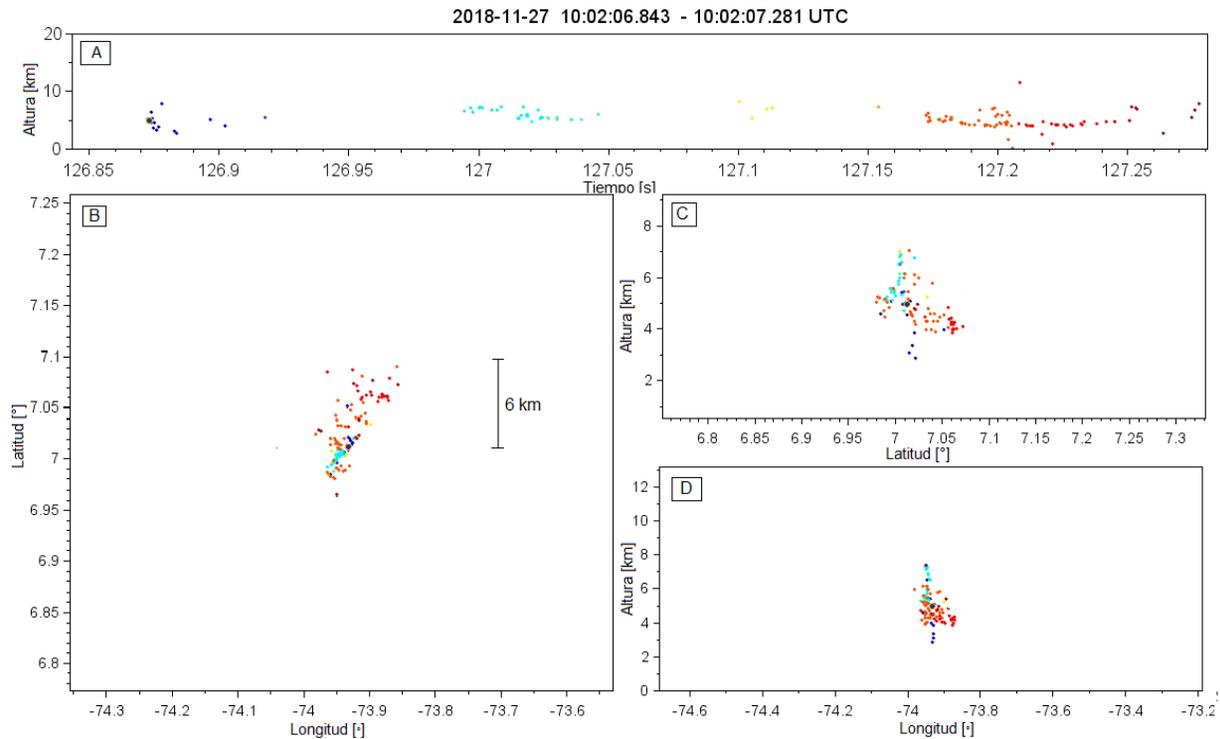


**Figura 15.** Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:01:26.617 y las 10:01:27.344 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.



**Figura 16.** Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 15. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada). La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos ( $2 \times 10^4$  m/s) y de líderes negativos ( $1 \times 10^5$  m/s y  $1 \times 10^6$  m/s).

Para determinar si existe una región de carga positiva inferior se hace necesario analizar una descarga que inicie a alturas menores a 6 km, que es el límite más bajo de la región de carga negativa central. En la Figura 17 se presenta una descarga mapeada entre las 10:02:06.843 y las 10:02:07.281 UTC que se origina a una altura de 5 km y se propaga en el intervalo de 4 y 6 km (ver paneles A, C y D), alcanzando una extensión horizontal máxima de 6 km con respecto al origen de la descarga (ver panel B).

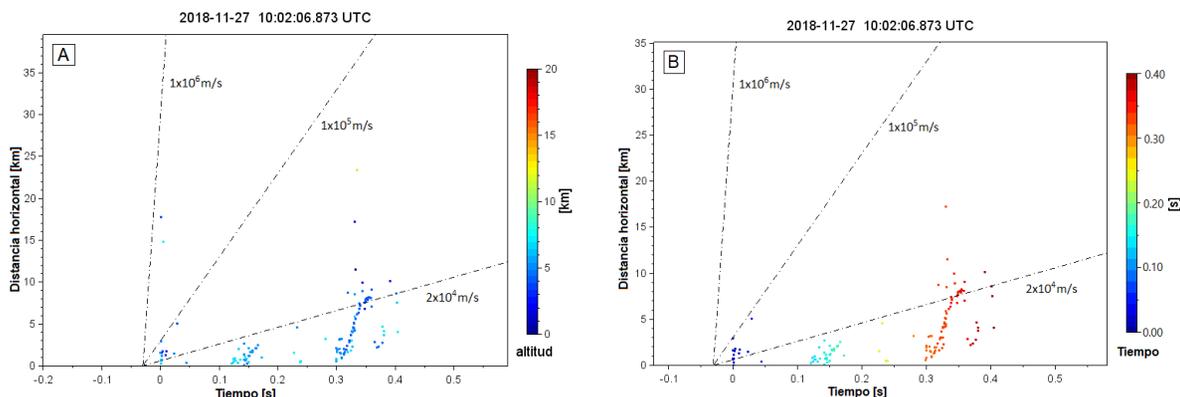


**Figura 17.** Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:02:06.843 y las 10:02:07.281 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

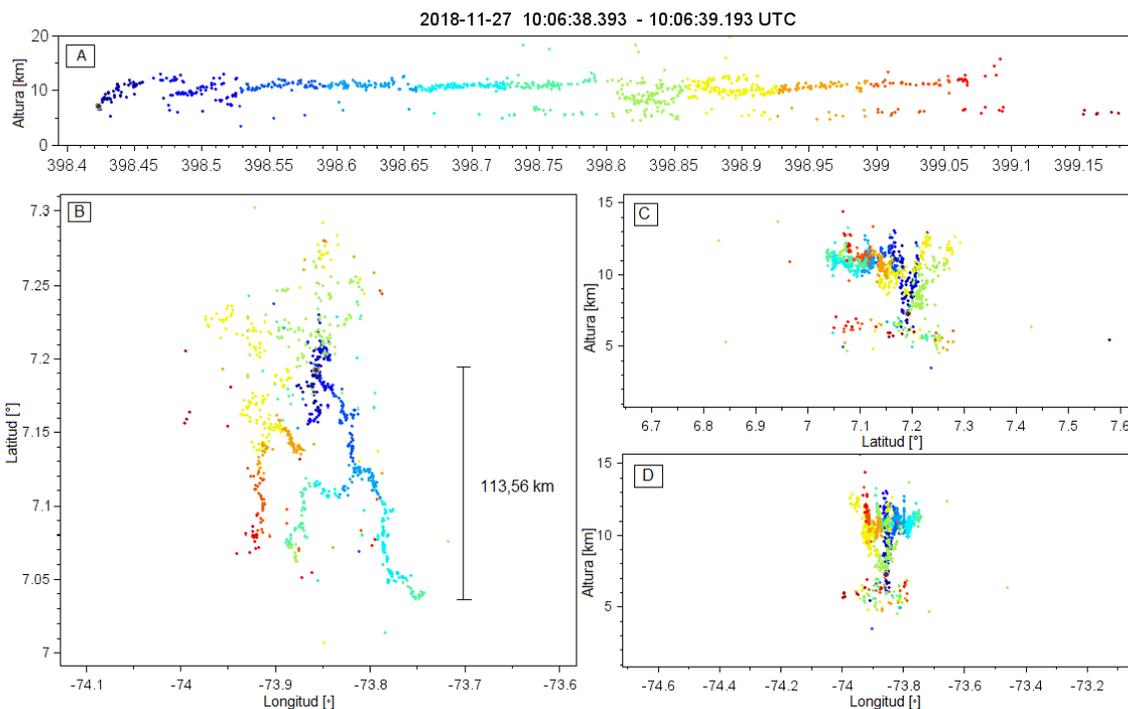
La Figura 18 muestra las gráficas de tiempo-distancia de la descarga en la Figura 17, en donde se mapean tres líderes descendentes negativos a alturas entre 4 y 6 km, lo que se evidencia en el cambio de coloración de celeste a azul capri en las fuentes que forman pendientes cercanas a  $1 \times 10^5$  m/s del panel A. De esta manera se delimita la región de carga positiva inferior entre 4 y 6 km. El panel B corresponde a la variación temporal de las fuentes. Para este caso no se mapearon fuentes emitidas por líderes positivos a alturas mayores.

La descarga que se muestra en la Figura 19 fue registrada entre las 10:06:38.393 y las 10:06:39.193 UTC y evidencia el comportamiento bidireccional de los líderes mapeados, dado que se observan fuentes emitidas en el mismo instante de tiempo (igual tonalidad) pero a diferente altitud (como lo evidencian los paneles A, C y D). Estas últimas pueden estar relacionadas con líderes positivos, lo cual se comprueba más adelante con base en las gráficas de tiempo-distancia. La descarga en mención inicia a una altura cercana a los 8,5 km a un rango de alturas que comprende los 5 y 13 km (paneles A, C y D), alcanzando una extensión horizontal máxima de 113,56 km desde el punto de inicio.

A partir de la descarga de la Figura 19 se construyen los gráficos de tiempo-distancia mostrados en la Figura 20. El panel A permite ver un líder negativo ascendente (primera pendiente desde el punto 0,0) que se propaga durante 0,05 segundos desde 8,5 km hasta alcanzar los 12,5 km de altura (cambio de coloración de celeste a amarillo). A los 0,05 segundos del origen de la descarga y

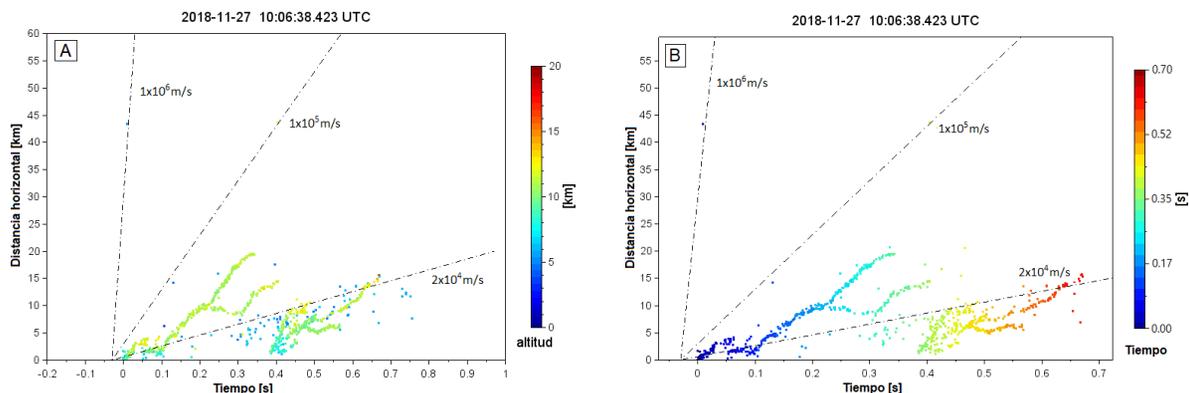


**Figura 18.** Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 17. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada). La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos ( $2 \times 10^4$  m/s) y de líderes negativos ( $1 \times 10^5$  m/s y  $1 \times 10^6$  m/s).



**Figura 19.** Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:06:38.393 y las 10:06:39.193 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

a una altura de 10 km inicia un nuevo líder negativo ascendente que presenta dos ramificaciones pronunciadas (segunda pendiente bifurcada) y se propaga hasta los 0,4 segundos alcanzando altura máxima de 12 km y una extensión horizontal de 17 km. Durante la última fase de propagación de este líder (0,3-0,4 segundos) se observan fuentes emitidas por líderes positivos a alturas de 6 km (fuentes color azul capri por debajo de la pendiente de  $2 \times 10^4$  m/s en el panel A), lo que corrobora



**Figura 20.** Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 19. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. El punto 0,0 es el origen de la descarga o punto de iniciación. La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos ( $2 \times 10^4$  m/s) y de líderes negativos ( $1 \times 10^5$  m/s y  $1 \times 10^6$  m/s).

la ubicación de la región de carga negativa central de la estructura de carga. Este panel también revela el inicio de otro líder negativo ascendente (tercera pendiente con múltiples derivaciones) a una altura de 8,5 km (tono celeste), una vez transcurridos 0,4 segundos del origen de la descarga. El líder se propaga con varias ramificaciones hasta alcanzar una altura máxima de 13 km (tono naranja claro). Durante el desarrollo de este líder también se observan algunas fuentes de líderes positivos (tono azul capri) a alturas correspondientes a la región de carga negativa.

Según los análisis de las descargas individuales, de las cuales se presentaron algunos ejemplos anteriormente, se tiene que esta tormenta presenta una estructura tripolar donde el centro de carga positivo inferior se encuentra entre 4 y 6 km, la carga negativa central entre 6 y 8,5 km y la carga positiva superior entre 8,5 y 16 km de altura.

## 4. Discusión

El desarrollo temporal y espacial de las fuentes mapeadas durante la propagación de líderes de rayo determina que ambas tormentas estudiadas presentan una estructura tripolar cuyas alturas de las regiones de carga son congruentes con las anteriormente halladas en Santa Marta, donde se localizó la región positiva inferior entre 4 y 6 km, la negativa central entre 6 y 9,5 km y la positiva superior entre 10 y 14,5 km [13]. Las alturas de los centros de carga encontradas en este artículo son mayores a las de tormentas estudiadas en North Central Florida, donde la región de carga positiva inferior está entre 3 y 5 km, la positiva central entre 5,3 y 7,5 y la positiva superior entre 7,8 y 9,8 [21].

Se encontró que el 50 % de las descargas inició a alturas entre 6,62 y 11,48 para la tormenta del 23 de noviembre y entre 7,04 y 10,78 para la del 27 de noviembre, como lo indican el primer y cuarto cuartil de la Figura 21A.

Así mismo, las alturas máximas de inicio son 14,49 y 12,91 km respectivamente, las cuales superan a las halladas en Santa Marta, que corresponden a 11 y 14 km. Para el presente caso de estudio,

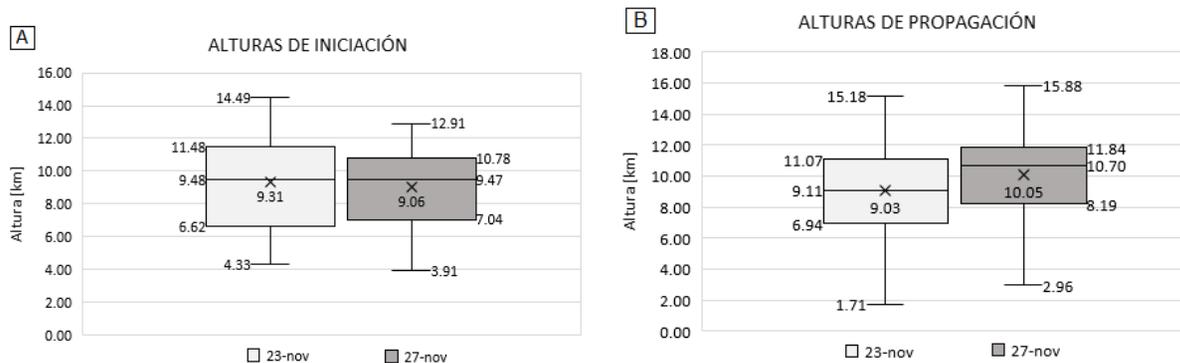
el promedio de alturas de iniciación se situó entre 9,31 y 9,06 km mientras que en las tormentas analizadas en North Central Florida varió entre 7,3 y 8,4, lo anterior debido a que las regiones de carga en esas regiones de Florida se localizaron a alturas menores.

Se determinaron alturas máximas de propagación de líderes de rayo correspondientes a 15,18 km para la primera tormenta y a 15,88 para la segunda como lo indica la Figura 21B, estas alturas son un poco menores a las encontradas en [13]. Para la tormenta del 23 de noviembre se encontró que el 50 % de los líderes mapeados se propagó a alturas mayores a 9,11 km (como lo indica la mediana en la Figura 21B), en donde se encuentra la región positiva superior, mientras que para la tormenta del 27 de noviembre cerca del 75 % de los líderes siguió esta característica (primer cuartil en 8,19 km en la Figura 21B), lo que indica una mayor actividad en la región de carga superior de esta última tormenta en comparación con la primera. Lo anterior puede explicar que en la tormenta del 23 de noviembre hubiese más impactos a tierra CG (ver Tabla I) en comparación con la tormenta del 27 de noviembre, debido a que en la primera se presentó una mayor actividad en las regiones inferiores de la estructura de carga.

Como trabajos futuros se plantea estudiar la interacción de descargas atmosféricas con estructuras elevadas en zonas tropicales con base en mapeos hechos con la red Dabeiba - LMA, y así mismo determinar la influencia de la altura de las regiones de carga en dicha interacción. Se muestra un resumen de resultados en la Tabla I.

**Tabla I.** Resumen de resultados

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Tormenta 23 de nov.</b>	<b>Tormenta 27 de nov.</b>
Fuentes	-	17375	26476
Descargas	flashes	89	100
Impactos CG	strokes	99	57
Tasa de rayos	flashes/min	7	10
Mediana de corriente de descarga de retorno	kA	21,1	18,1
Máxima altura de inicio de descargas	km	14,49	12,91
Promedio de altura de inicio de descargas	km	9,31	9,06
Mediana de propagación de líderes	km	9,11	10,70
Máxima altura de propagación	km	15,18	15,88
Rango de la región de carga positiva superior	km	9 - 14,5	8,5 - 16
Rango de la región de carga negativa central	km	7,5 - 9	6 - 8,5
Rango de la región de carga positiva inferior	km	5 - 7,5	4 - 6



**Figura 21.** Diagramas de cajas y bigotes para las alturas de iniciación y de propagación de los líderes mapeados en las tormentas del 23 y 27 de noviembre de 2018. Los bigotes son los límites inferiores y superiores de los datos. Los límites de la caja indican los valores entre los cuales se encuentra el 50 % de los datos (primer y cuarto cuartil). La línea horizontal dentro de la caja y el símbolo X corresponden a la mediana y media respectivamente.

## 5. Conclusiones

La instalación de la red Dabeiba - LMA en Barrancabermeja (Santander) forma parte de los primeros estudios en Colombia usando un sistema de mapeo de alta resolución que, complementado con otros sistemas de detección total de rayos como la red LINET, permitió concluir que para los casos de estudio presentados:

1. Se lograron identificar estructuras de carga eléctrica con distribuciones típicas tripolares en las dos tormentas estudiadas.
2. Para la tormenta del 23 de noviembre la altura de la región de carga positiva inferior se ubicó entre 5 y 7,5 km, la negativa central entre 7,5 y 9 km y la positiva superior entre 9 y 14,5 km.
3. Para la tormenta del 27 de noviembre la región de carga positiva inferior se encontró entre 4 y 6 km, la negativa central entre 6 y 8,5 km y la positiva superior entre 8,5 y 16 km.
4. En ambas tormentas se logró localizar la región de carga positiva inferior por lo que fue predominante la actividad de descargas nube-tierra.
5. En general las alturas de las regiones de carga para ambas tormentas son similares a las encontradas por la red COLMA ubicada en Santa Marta (Magdalena) y mayores a las de North Central Florida.
6. Se registraron líderes negativos y positivos que se propagaron a velocidades radiales máximas de  $1 \times 10^6$  m/s y  $2 \times 10^4$  m/s respectivamente.
7. Las alturas máximas de inicio para ambas tormentas corresponden a 14,49 y 12,91 km respectivamente, las cuales superan a las halladas en Santa Marta.
8. Se corroboraron líderes de rayos que alcanzaron alturas máximas de propagación de 15,18 y 15,88 km, un poco menores a las reportadas en la región norte de Colombia en Santa Marta.

Las conclusiones anteriores son el resultado del análisis de los dos casos de estudio y no se generalizan a todas las tormentas mapeadas en el área de influencia de la red Dabeiba - LMA.

Estudios posteriores darán indicios de las características generales de estructuras de carga en zonas tropicales en diferentes meses y condiciones meteorológicas.

## 6. Agradecimientos

Se dan especiales agradecimientos a la empresa Keraunos SAS por suministrar la información de rayos LINET de la ciudad de Barrancabermeja. Así mismo al grupo Lightning Research Group de Universidad Politécnica de Cataluña por suministrar los datos de tormentas eléctricas de la red LMA en la misma ciudad.

## Referencias

- [1] C. P. Wang, “Lightning discharges in the tropics: 1. Whole discharges”, *J. Geophys. Res.*, vol. 68, no. 7, pp. 1943-1949, 1963. <https://doi.org/10.1029/JZ068i007p01943> ↑2
- [2] T. Takahashi, “Electrical properties of oceanic tropical clouds at Ponape, Micronesia”, *Mon. Weather Rev.*, vol. 106, no. 11, pp. 1598-1612, 1978. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1978\)106<1598:EPOOTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1978)106<1598:EPOOTC>2.0.CO;2) ↑2
- [3] E. R. Williams, “The tripole structure of thunderstorms”, *J. Geophys. Res.*, vol. 98, no. D11, pp. 13151-13167, 1989. <https://doi.org/10.1029/JD094iD11p13151> ↑2
- [4] W. Rison, R. J. Thomas, P. R. Krehbiel, T. Hamlin, and J. Harlin, “A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 26, no. 23, pp. 3573-3576, 1999. <https://doi.org/10.1029/1999GL010856> ↑2, 5
- [5] R. J. Thomas *et al.*, “Accuracy of the lightning mapping array”, *J. Geophys. Res. D Atmos.*, vol. 109, no. D14, 2004. <https://doi.org/10.1029/2004JD004549> ↑3
- [6] T. C. Marshall *et al.*, “Observed electric fields associated with lightning initiation”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32, no. 3, 2005. <https://doi.org/10.1029/2004GL021802> ↑3
- [7] S. A. Behnke, R. J. Thomas, P. R. Krehbiel, and W. Rison, “Initial leader velocities during intracloud lightning: Possible evidence for a runaway breakdown effect”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 110, no. D10, 2005. <https://doi.org/10.1029/2004JD005312> ↑3
- [8] G. S. Zhang *et al.*, “Using lightning locating system based on time-of-arrival technique to study three-dimensional lightning discharge processes”, *Sci. China Earth Sci.*, vol. 53, no. 4, pp. 591-602, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0116-x> ↑3
- [9] O. A. van der Velde, and J. Montanyà, “Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, no. 24, pp. 13504-13519, 2013. <https://doi.org/10.1002/2013JD020257> ↑3, 4, 6
- [10] B. R. Fuchs, and S. A. Rutledge, “Investigation of lightning flash locations in isolated convection using LMA observations”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 123, no. 11, pp. 6158-6174, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JD027569> ↑3
- [11] L. A. T. Machado *et al.*, “The Chuva project: How does convection vary across Brazil?”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 95, no. 9, 2014. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00084.1> ↑3
- [12] J. A. López *et al.*, “First data of the Colombia lightning mapping array - COLMA”, International Conference on Lightning Protection 2016. <http://hdl.handle.net/2117/99049> ↑3
- [13] J. A. López *et al.*, “Charge structure of two tropical thunderstorms in Colombia”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 124, no. 10, pp. 5503-5515, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JD029188> ↑3, 6, 9, 20, 21
- [14] H. W. Kasemir, “A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge”, *J. Geophys. Res.*, vol. 65, no. 7, pp. 1873-1878, 1960. <https://doi.org/10.1029/JZ065i007p01873> ↑4
- [15] E. R. Williams, “Problems in lightning physics—The role of polarity asymmetry”, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 15, no. 2, 2006. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/15/2/S12> ↑5
- [16] K. C. Wiens, S. A. Rutledge, and S. A. Tessendorf, “The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure”, *J. Atmos. Sci.*, vol. 62, no. 12, 2005. <https://doi.org/10.1175/JAS3615.1> ↑5

- [17] V. Mazur, and L. H. Ruhnke, “Common physical processes in natural and artificially triggered lightning”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 98, no. D7, pp. 12913-12930, 1993. <https://doi.org/10.1029/93JD00626> ↑5
- [18] V. Mazur, “Triggered lightning strikes to aircraft and natural intracloud discharges”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 94, no. D3, pp. 3311-3325, 1989. <https://doi.org/10.1029/JD094iD03p03311> ↑5
- [19] H. D. Aranguren, “Colombian total lightning detection network and early detection of failure risks for power systems”, *Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL*, 7, pp. 1-6, 2013. ↑6
- [20] D. F. Del Río, “Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso colombiano” (Trabajo de grado - Doctorado), 2018, Universidad Nacional de Colombia. [En línea]. <http://bdigital.unal.edu.co/63551/1/93061400.2018.pdf> ↑6
- [21] J. A. Caicedo, M. A. Uman, and J. T. Pilkey, “Lightning evolution in two North Central Florida summer multicell storms and three winter/spring frontal storms”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 123, no. 2, pp. 1155-1178, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JD026536> ↑20

---

### **Brandon Ardila-Murillo**

Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander. Estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Integrante del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL. Correo electrónico: braneste07@hotmail.com

---

### **Edison Soto-Ríos**

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ingeniería - Línea Automática de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Profesor asociado e investigador en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Coordinador Académico del Programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Correo electrónico: easotor@uis.edu.co

---

### **Didier Argüello-Barbosa**

Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander; formó parte del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL. Actualmente desempeña actividades de diseño de subestaciones de media tensión. Correo electrónico: fernandoarguello24@gmail.com

---

### **Heribert Tello-Rodríguez**

Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander; formó parte del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL. Actualmente desempeña actividades de diseño de instalaciones eléctricas. Correo electrónico: heribert.tello17@hotmail.es

---

### **Jesús López-Trujillo**

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Correo electrónico: jesus.alberto.lopez@upc.edu

---

### **Joan Montanyà**

Ingeniero Industrial, MSc. y Ph.D. en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España). Profesor asociado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Cataluña. Realizó varias estancias cortas en la Universidad de Arizona (Tucson, EE.UU.), El Laboratoire d'Aéologie (Toulouse, Francia) y el Instituto Tecnológico de Massachusetts (Cambridge, EE.UU). Correo electrónico: joan.montanya@upc.edu

# Reflexiones en torno a la logística de aprovisionamiento: Antecedentes y tendencias

*Reflections on supply logistics: Background and trends*

**Javier Parra Peña** <sup>\*,1</sup>, **Yeny A. Niño Villamizar** <sup>1</sup>, **Mónica Suárez Serrano** <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia), <sup>2</sup>Universidad de América (Bogotá, Colombia)

\*Correspondence email: [jparrap@udistrital.edu.co](mailto:jparrap@udistrital.edu.co)

Received: 28-09-2021. Modified: 26-10-2021. Accepted: 22-12-2021

## Abstract

**Context:** Procurement is each time more important from the strategic point of view of the organizations. It has generated several tendencies in its management. The academic reflection about its evolution, from a traditional focus, which unique criteria of decision making is the cost, to achieve a level of strategic cooperation, invites to have an integral looked of this function in the supply chain context.

**Method:** From the review of academic documents, we acquired relevant information and classified it in the issues antecedents, current state, and tendencies of the procurement function. These issues orientate the authors' reflections.

**Results:** As two of the results of the reflection are the process transformation and the improvement of relationships with providers, achieving long term alliances needs, digitalization and its influence in the manner in which transactions occur, the validity of the purchasing analysis in maturity models, the integration present in the co-maker ship and the challenges related with sustainability and value recovering.

**Conclusions:** Because of the strategic importance of procurement function to get competitive levels proposed by organizations, from the academic ambit, it should be a reflection and research permanent, especially about digitalization, dynamic supply chain, and sustainability. In this context, this document orientates the analysis related to advances in procurement function and present several of the future research topics in it.

**Keywords:** procurement; purchasing; purchasing and supply management (PSM); logistics integration; supply chain.

**Language:** Spanish.

## Open access



Cite as: Parra Peña J., Niño Villamizar, Y., Suárez Serrano, M.: "Reflexiones en torno a la logística de aprovisionamiento. Antecedentes y tendencias". *Ing.*, vol. 27, no. 2, 2022. e17043.

<https://doi.org/10.14483/23448393.17043>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## Resumen

**Contexto:** El aprovisionamiento es cada vez más importante desde el punto de vista estratégico de las organizaciones, lo que ha generado diferentes tendencias para su gestión. La reflexión académica de su evolución, partiendo de un enfoque tradicional, cuyo único criterio de decisión es el coste, hasta llegar a un nivel de cooperación estratégica, invita a una mirada integral de esta función en el contexto de la gestión de la cadena de suministros.

**Método:** A partir de la revisión de documentos académicos, se recopila información clave catalogándola en los tópicos de antecedentes, estado actual y tendencias de la función de aprovisionamiento, los cuales orientan la reflexión de los autores.

**Resultados:** Entre los hallazgos de esta reflexión están la necesidad de transformación de los procesos y de mejoramiento de las relaciones con los proveedores, proyectando alianzas de largo plazo, la digitalización y su influencia en la forma en que se llevan a cabo las transacciones, la vigencia del análisis de la cartera de compras dentro de los modelos de madurez, la integración manifiesta en la co-fabricación y en los retos de sostenibilidad y de recuperación de valor.

**Conclusiones:** Dada la importancia estratégica de la función de aprovisionamientos para alcanzar los niveles de competitividad propuestos por las organizaciones, desde el ámbito académico debe constituir un tema de reflexión y de investigación permanente, especialmente en lo respecta a la digitalización, la cadena de suministro dinámica y la sostenibilidad. En este contexto, este documento orienta la reflexión sobre los avances en la gestión de esta función y recopila algunas de las posibilidades de investigación futura en el área.

**Palabras clave:** aprovisionamiento, compras, gestión de adquisiciones y suministros (PSM), integración logística, cadena de suministro.

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

La gestión de aprovisionamientos es un área estratégica de la cadena de suministros debido a su impacto en los costes totales y en la atención oportuna de la demanda, incluye todas las actividades requeridas para satisfacer la necesidad de una empresa a través de fuentes externas de suministro, desde que se origina el proceso hasta su cumplimiento. Comprende la planificación y gestión de las compras, el almacenaje de los productos necesarios y la aplicación de técnicas que permitan mantener unas existencias mínimas de cada material, procurando que todo ello se realice en las mejores condiciones y con el menor coste posible [12].

La función de gestión de adquisiciones y suministros (PSM, del inglés *Purchasing and Supply Management*) ha sido definida por *The Chartered Institute of Procurement & Supply* (2020) citado por [28] como “la función de gestión empresarial que garantiza la identificación, el abastecimiento, el acceso y la gestión de los recursos externos que una organización necesita o puede necesitar para cumplir sus objetivos estratégicos”. Además, Tate *et al.* (2016) citados por [28] afirman que PSM es una función central para tomar decisiones y organizar la gestión de procesos y recursos entre funciones internas y proveedores externos.

De esta forma, la logística de aprovisionamientos se encarga principalmente de: anticiparse a las necesidades del usuario, negociar ampliamente con proveedores, garantizar el ciclo de entrega al cliente, interpretar las tendencias de precios y las alzas, localizar y determinar fuentes confiables

de suministro a clientes [6], y la gestión y la toma de decisiones del proceso de compras con un enfoque logístico. El ciclo de compras, como una parte esencial del aprovisionamiento, ocurre en la interfaz cliente-proveedor e incluye todos los procesos necesarios para asegurar que los materiales estén disponibles para que la producción se lleve a cabo de acuerdo con lo programado. Durante el ciclo de compras, el fabricante ordena componentes desde sus proveedores quienes reabastecen los inventarios. La relación es similar a la existente entre un distribuidor y un fabricante, con una diferencia significativa: mientras que en la relación minorista-distribuidor las órdenes son motivadas por una demanda incierta del consumidor, las órdenes de componentes pueden ser determinadas de manera precisa una vez el fabricante ha decidido su programa de producción y son dependientes de este. En consecuencia, es importante que los proveedores se comuniquen directamente con el programa de producción del fabricante. Por supuesto, si los tiempos de proceso de un proveedor son grandes, el proveedor tiene que producir bajo pronóstico porque el programa de producción del fabricante no puede ser establecido con tanta antelación. En la práctica del funcionamiento de la cadena de suministro puede haber varios niveles de proveedores, cada uno produciendo un componente para el nivel siguiente [8].

Esta función de aprovisionamiento ha experimentado cambios significativos, pasando de un enfoque orientado principalmente por el precio de compra, hasta un escenario de alianzas, integración de procesos y de efectos sinérgicos de las relaciones entre la empresa cliente y la empresa proveedora. Así, por ejemplo, los sistemas para la planificación de los materiales han evolucionado acercando cada día más a los diferentes miembros de la cadena de suministros, desde la simple comunicación de necesidades detectadas hasta la interacción y cooperación, empleando tanto sistemas Kanban como sistemas de información integrados.

El entorno competitivo de finales del siglo XX, con respecto al mercado, se caracterizó por su saturación, su globalización y el aumento de la competencia, dando lugar a un consumidor cada vez más exigente en lo que tiene que ver con calidad, rapidez, personalización y servicios. Lo anterior conlleva a que los sistemas de producción en masa se vean relegados por sistemas más flexibles e integrados, capaces de adaptarse a la demanda cambiante y en los que el aprovisionamiento adquiere un rol estratégico.

Estas nuevas exigencias implican una necesidad de transformación de los procesos y de mejoramiento de las relaciones con los proveedores, proyectando alianzas de largo plazo. Se empieza a comprar productos más complejos que constituyen una parte importante del producto final, trasladando las exigencias de los clientes a los proveedores y, en otros escenarios, se presenta una extensión de la filosofía JIT a los aprovisionamientos y se configura la estrategia de cadena de suministros.

Las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones influyen en la forma en que se llevan a cabo las transacciones, la implementación de sistemas de compras electrónicos y automáticos y el aumento del intercambio de datos agilizan las transacciones comerciales con los proveedores.

De esta manera, ante la creciente importancia estratégica de la función de aprovisionamiento, se empieza a pensar en estrategias específicas para la misma, las cuales se consideran independientes y complementarias de la estrategia general de la empresa.

En este contexto, este trabajo tiene como finalidad revisar las nuevas dimensiones que ha adquirido la logística de aprovisionamientos desde una perspectiva estratégica en la cadena de suministros. Para cumplir con este propósito, el documento se estructura en dos apartados: el primero desarrolla las estrategias de organización y de aprovisionamiento, teniendo en cuenta su evolución y su relación con las tendencias del mercado; y el segundo identifica las principales tendencias, evidenciando las oportunidades de investigación en el área.

## 2. Metodología

La metodología empleada para revisión de los documentos académicos, utilizados como referentes teóricos para la recopilación de la información y la definición de los tópicos que delimitaron la reflexión presentada por los autores, se desarrolló en cinco fases.

La primera, orientada a la definición de las palabras clave que identifican el tema de la investigación y sus principales variantes teóricas, siendo estas: compras, gestión de adquisiciones y suministros, integración logística y cadena de suministro.

La segunda fase se centró en la definición de la base de datos utilizada para la recuperación de los documentos objeto de la revisión. Inicialmente se considera a Web of Science (WoS) y Scopus, que de acuerdo con Chadegani *et al.* son las dos principales colecciones de la literatura académica, y se define a WoS como la colección a utilizar, toda vez que tiene una fuerte cobertura que se remonta a 1990 y la mayoría de sus revistas están escritas en inglés, por su parte Scopus cubre un número superior de revistas, pero con menor impacto y limitado a artículos recientes [7].

En la tercera fase se definieron los tópicos incluyentes y excluyentes que orientaron la reflexión de los autores y que hicieron parte de las ecuaciones de búsqueda avanzada junto con las palabras clave, el uso operadores booleanos, las etiquetas de campo y el filtro de exclusión de los artículos no disponibles en texto completo. Los antecedentes, el estado actual y las tendencias de la función de aprovisionamiento fueron definidos por los investigadores como los tópicos incluyentes, y las aplicaciones específicas del proceso de aprovisionamiento como tópico excluyente.

El diseño del instrumento que permitió recoger los metadatos y los principales aportes de los documentos revisados se realizó en la cuarta fase de la investigación. Este instrumento se denominó “Ficha de caracterización- producción académica en logística de aprovisionamiento”, y consta de los siguientes campos: número único del producto para la trazabilidad, título, tipo de artículo, autor(es), año, palabras clave, resumen, objetivo, metodología, método, enfoque de la investigación y principal contribución.

En la quinta y última fase se realizó la lectura de los 34 documentos que fueron seleccionados como resultados de las fases anteriores y de la aplicación de la técnica “bola de nieve”, el diligenciamiento de cada una de las fichas de caracterización y la disertación de los autores sobre los mismos, que concluyó en la reflexión que se documenta en el presente artículo.

### 3. Estrategias de organización y aprovisionamiento

Los modelos de madurez han sido un enfoque ampliamente utilizado para comprender los cambios y avances hacia prácticas cada vez más sofisticadas de compras y gestión del suministro (PSM) [3]. Estos modelos de madurez se basan en el supuesto que la organización puede cambiar de un estado inicial a uno más avanzado en un aspecto específico, que se alcanza al atravesar un número de niveles o estados intermedios [15]. En este contexto, se entiende el desarrollo de PSM como “el proceso de evolución de una función no sofisticada basada en acciones centradas en los costes, a una forma sofisticada en la que las decisiones de compra están directamente vinculadas a la necesidades estratégicas de la firma”, por lo cual la madurez es entendida como “los diferentes niveles de avance de este proceso” [2].

La discusión sobre los modelos madurez de PSM se inicia con los trabajos de Kraljic [21] y Van Weele [34] como se indica en [3]. El primero es un antecesor de la idea de etapas de sofisticación de las prácticas y el segundo de la investigación relacionada con cómo medir el desempeño de la madurez de los procesos de PSM. A partir de estos trabajos se han desarrollado diferentes modelos, muchos de ellos conceptuales, sin validación empírica [3]; en la revisión de literatura [32] se describen 20 modelos que configuran entre tres y diez niveles diferentes de madurez, evidenciando así que esta área es un tema de investigación vigente. El aspecto en el que sí confluyen los modelos es que en una etapa final se espera que una empresa alcance a ser de “clase mundial” [32].

Si bien, el enfoque de los modelos de madurez es ampliamente aceptado en PSM, no es posible analizar el cambio únicamente como una trayectoria predeterminada entre diferentes niveles, sino que se debería tener en cuenta hasta qué punto los procesos de PSM en las organizaciones están sujetos a cambios adaptativos que dependen de la situación y del contexto [3]. Por lo anterior, este documento parte del modelo interpretativo de Merli, basado en cuatro configuraciones que muestran periodos importantes de la historia industrial [23], para destacar los cambios que ha experimentado la función de aprovisionamiento. Este modelo se presenta en la Figura 1, en él, la dimensión vertical muestra dos posibles relaciones con el mercado: la primera es la orientación a las operaciones, que implica mejora o innovaciones del producto o de los procesos de la empresa, supone un resultado acumulado de respuestas ante las tendencias del mercado que genera transformaciones internas; la segunda es la orientación al mercado, tiene que ver con la habilidad para captar y manejar las oportunidades del negocio como la fuerza estratégica primordial.

		Organización interna	
		Dinámica burocrática (orientada al producto)	Dinámica de grupos (orientada al proceso)
Relaciones con el mercado	Orientación a operaciones	A -Burocrática / product out	C -Implicación/ mejora del proceso
	Orientación al mercado	B -Marketing / product in	D -Riesgo/ Marketing in

- (A) Compañía occidental tayloriana de los 50 y 60
- (B) Compañía orientada al marketing de los 60 y 70
- (C) Corporación japonesa de los 70 y 80
- (D) Compañía de clase mundial de los 80 y 90

**Figura 1.** Modelo interpretativo. Fuente: [23]

Por su parte, la dimensión horizontal incluye los aspectos internos de la organización: la dinámica burocrática propia de una organización orientada al producto, en la que se presentan actividades estandarizadas (metódicas e impersonales) y se promueve una actividad lógica y eficiente, y la dinámica de grupos que se caracteriza por tener una orientación a los procesos de negocio y a las unidades de la organización que están a cargo de ellos, propone alto grado de motivación y respuestas autónomas a situaciones en todos los niveles de la organización entre los cuales se comparte información.

En este contexto se detallan los cambios más relevantes que ha tenido la función de aprovisionamiento en las diferentes configuraciones del modelo de Merli y que contextualizan sus tendencias de acuerdo con la estrategia de la organización.

El primer cambio se resume en la tabla I y se relaciona con la estrategia que desarrolla la función de aprovisionamiento para alinearse con la estrategia organizacional. En este sentido, se pueden observar desde relaciones basadas exclusivamente en el coste y en los acuerdos legales, hasta aquellas caracterizadas por la confianza y la cooperación.

**Tabla I.** Estrategias de aprovisionamiento, con base en [23]

(A) Empresa Burocrática / <i>Product out</i>	(B) Empresa Marketing / <i>Product in</i>	(C) Empresa tipo implicación / Mejora del proceso	(D) Empresa tipo riesgo / <i>Marketing in</i>
Aprovisionamiento exterior limitado a materiales comerciales y de fabricación más simple, la tecnología del producto se considera original y debe protegerse del mercado. Comprar al más bajo precio posible y realizar una política de precios basada en la fuerza de las relaciones contractuales.	Descentralización máxima, reduciendo los costes fijos y los riesgos de inversión. Gran número de proveedores alternativos, para supervisar y controlar costes de producción (aprovisionamiento) y la necesidad de flexibilidad para ajustarse a los picos de demanda (amplio número de proveedores compitiendo). Estimular la competencia de precios manteniendo estándares de calidad aceptables.	Elevado grado de integración con los proveedores importantes. Descentralizar el volumen máximo posible de la producción de piezas. Crear lazos exclusivos con un número limitado de proveedores. Investigar las economías de compra a largo plazo. Co-asociación operacional.	Verticalización del negocio, redes logísticas permanentes que integran clientes y proveedores. Asociaciones de negocio que evolucionan desde una lógica de co-asociación operacional hacia una co-gestión del proceso generador del negocio. Unos pocos proveedores de confianza, que se integran en el negocio.

Asociado con la estrategia de aprovisionamiento, existen cambios en las relaciones entre la empresa y sus proveedores como se observa en la Tabla II. Así se muestra una evolución desde la desconfianza, pasando por relaciones de corto plazo hasta llegar a procesos de sincronización, confianza mutua y alianzas de largo plazo.

**Tabla II.** Principios de la relación de aprovisionamiento, con base en [23]

(A) Empresa Burocrática / <i>Product out</i>	(B) Empresa Marketing / <i>Product in</i>	(C) Empresa tipo implicación / Mejora del proceso	(D) Empresa tipo riesgo / <i>Marketing in</i>
Explotar al máximo a cada proveedor. Preferencia por proveedores subordinados. Información hacia los proveedores se limita a fechas de entrega y datos técnicos. No aceptación de acuerdos vinculantes con proveedores. Compra en pedidos particulares cada vez.	Compras con pedidos uno a uno; No garantía de pedidos futuros; Relaciones a corto plazo; Libre competencia referente a precios; Mínima cantidad de información a proveedores.	Las relaciones se establecen sobre bases de largo plazo Se controla y ayuda a los proveedores. Logística y planta del proveedor se consideran parte del sistema. El propósito del elemento suministrado es ampliamente conocido por el proveedor. Responsabilidad global sobre coste, calidad y servicio. Suministros con base en flujo de arrastre sincronizado con la producción del cliente.	Relaciones de largo plazo Empresas abiertas Confianza mutua completa como entre socios del mismo negocio. Uso normal de órdenes abiertas, con suministros sincronizados. Red de información común usada para las operaciones corrientes. Amplio uso de programas de mejora conjuntos.

La gestión de la calidad también sufre cambios importantes como se muestra en la tabla III, pues en una etapa temprana se limita al control de calidad de conformidad y evoluciona hacia la integración con actividades de trabajo conjunto.

**Tabla III.** Aspectos de calidad, con base en [23]

(A) Empresa Burocrática / Product out	(B) Empresa Marketing / Product in	(C) Empresa tipo implicación / Mejora del proceso	(D) Empresa tipo riesgo / Marketing in
Control de calidad de aceptación, con compensación del proveedor cuando hay no conformidades.	Inspecciones y ensayos de aceptación, AQL	Verificar los procesos, desde el proveedor al cliente. Los costes de calidad del sistema total se mejoran constantemente.	Participación de los proveedores en la evaluación de la información. Contribución a la planificación y desarrollo de componentes estratégicos. Uso de técnicas de despliegue de funciones de calidad.

Por último, el departamento de aprovisionamiento operacionaliza en el desarrollo de sus funciones cada uno de los comportamientos descritos, los cuales se adaptan a las estrategias defensivas o cooperativas de la función de aprovisionamiento, tal como se presenta en la tabla IV.

**Tabla IV.** Papel del departamento de aprovisionamientos, con base en [23]

(A) Empresa Burocrática / Product out	(B) Empresa Marketing / Product in	(C) Empresa tipo implicación / Mejora del proceso	(D) Empresa tipo riesgo / Marketing in
Adquirir según los procedimientos al más bajo coste posible	Gestionar y optimizar el presupuesto de compras Investigar el mercado, estableciendo un gran grupo de proveedores Explorar al máximo a los proveedores Evaluar a los proveedores	Gestión de proveedores y estímulo de su crecimiento. Integración en el sistema operacional del cliente. Optimización de las compras desde el punto de vista del coste total y del largo plazo	Alto nivel de marketing de compras. Promover la integración de los proveedores. Análisis evaluación global de las opciones fabricar/comprar.

## 4. Dimensiones de la logística de aprovisionamiento desde una perspectiva estratégica

La gestión de compras y suministros ha pasado de ser una función táctica a una estratégica en muchas organizaciones como consecuencia de la proporción de valor que agrega a la cadena de aprovisionamiento y que ante el auge de la tercerización ya no puede limitarse al mero ahorro de costes [18].

De acuerdo con [5], desde su perspectiva de la firma basada en recursos, las compras y la gestión de la cadena de aprovisionamiento permiten a una compañía alcanzar una ventaja competitiva, si no sostenible por lo menos temporal. Para él, en entornos de competencia perfecta no es suficiente conocer el mercado de los productos con los que compite la compañía, para comprender las fuentes de ventajas competitivas debe conocerse también el mercado de los factores (insumos), dado que este influye directamente sobre el beneficio económico. Además, el autor concluye que ante las imperfecciones del mercado de factores, que se dividen en las expectativas asimétricas sobre el valor futuro de los recursos y la suerte, una empresa que tiene expectativas más precisas sobre el verdadero valor de un recurso puede tener acceso a mejores precios de adquisición y por tanto a un mayor beneficio económico.

Preservar las ventajas competitivas, desde la gestión del aprovisionamiento, implica concentrar los recursos en el desarrollo de capacidades esenciales con las que se pueda aportar un valor único a los clientes y superior al de la competencia, lo que puede incluir subcontratar al exterior el resto de actividades periféricas a la actividad nuclear, en las que la empresa no tiene interés estratégico, ni muestra capacidades específicas que le permitan desarrollarlas mejor que la competencia. La decisión de hacer o comprar conlleva tres posibilidades: integración vertical (hacer), cuasi integración (asociarse) y acudir al mercado (comprar). En lo que respecta a la decisión de comprar, en este documento se presenta el modelo de Kraljic, no solo por ser el más citado en la literatura [3], sino porque se mantiene vigente. En el caso de la cuasi integración se abren las puertas a diversas formas de cooperación con los proveedores y para su ejemplificación se presenta el modelo de co-fabricación, destacando la tendencia de la integración en los diferentes eslabones de la cadena de suministro.

#### 4.1. Acudir al mercado: análisis de la cartera de compras

En vista de que la matriz de portafolio de Kraljic (KMP, por su abreviatura del inglés) fue el primer enfoque exhaustivo de portafolio para compras y gestión de suministros, y de que a pesar de la existencia de modelos de portafolio más recientes ha sido la metodología dominante [25], se presenta una síntesis de sus principales características.

El modelo de Kraljic para analizar la cartera de compras es matricial y tiene en cuenta dos dimensiones: la dimensión externa (complejidad/riesgo del suministro) relacionada con factores asociados a los proveedores y al mercado de suministros, y la dimensión interna (importancia de la compra) relacionada con la valoración del impacto de determinado producto. Tales dimensiones permiten clasificar los productos en cuatro categorías, cada una de las cuales requiere una estrategia de aprovisionamiento diferente; la metodología empleada al posicionar los elementos dentro de la matriz permite identificar candidatos óptimos para comenzar iniciativas de abastecimiento estratégico [21].

- El análisis de riesgo del suministro implica aspectos de la complejidad del mercado fuente como el número de proveedores, la demanda de la competencia, las oportunidades de fabricar o comprar, el riesgo de almacenaje y las posibilidades de sustitución.
- El análisis de impacto en el beneficio considera el volumen comprado, el porcentaje del total de compras y el impacto en la calidad del producto o el crecimiento de la empresa.

Cada dimensión es evaluada respecto a sus variables estableciéndose una clasificación desde el más bajo al más alto, como resultado se tiene una clasificación en cuatro categorías: no crítico, apalancamiento, cuello de botella y estratégico (ver figura 2).

Si bien la metodología KMP ha sido ampliamente usada como una herramienta de diagnóstico y prescriptiva, Montgomery *et al.* en [25] encuentran como su principal debilidad que la clasificación del portafolio resultado de su implementación es cualitativa y la ponderación que se hace de los productos para su ubicación en los respectivos cuadrantes es uno de sus elementos más subjetivos. Por ello proponen un enfoque de análisis de decisiones cuantitativo y objetivo para posicionar los diferentes productos dentro de la KPM.

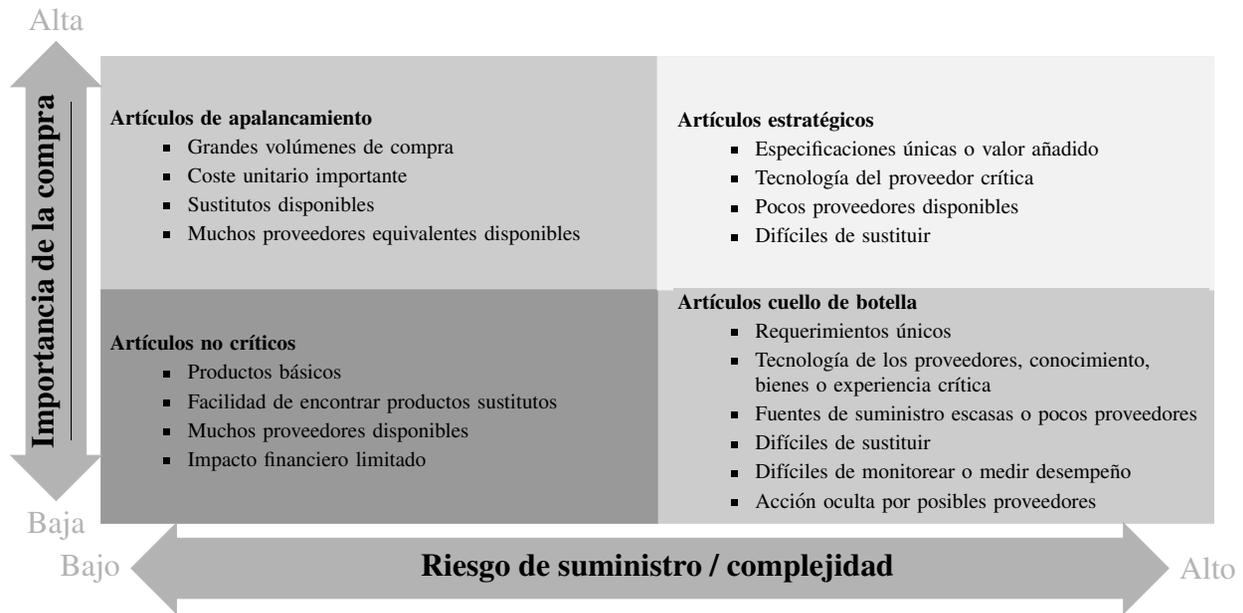


Figura 2. Matriz de Kraljic [21], [25]

La incorporación de análisis de decisiones provee un enfoque sistemático para obtener mejores decisiones, en dos vías: provee un enfoque novedoso para posicionar los productos y servicios objetivamente en la KPM, y provee a los tomadores de decisiones un enfoque para identificar productos y servicios candidatos para empezar iniciativas de aprovisionamiento estratégico [25].

Por lo tanto, para la organización ejemplar, [25] se enfocaron en dos objetivos fundamentales: minimizar la complejidad del mercado de suministro y maximizar el impacto estratégico, implementando el análisis de decisión multiobjetivo (MODA) como un marco para posicionar de manera cuantitativa los productos y servicios dentro de la KPM.

## 4.2. Cuasi integración: co-fabricación

La co-fabricación (co-makership) es la integración entre varias empresas que constituyen diferentes eslabones de la cadena de suministros. Se requiere que varias empresas en una misma cadena colaboren en procesos tales como aprovisionamiento, diseño y desarrollo de nuevos productos, cumplimiento de pedidos, etc.

Al ser la empresa vista como un todo, la estrategia de aprovisionamientos estará estrechamente ligada a la estrategia global. En un ambiente de co-fabricación, la estrategia de aprovisionamientos de largo plazo va más allá de la reducción de proveedores. En una estrategia de co-fabricación deben considerarse tanto las políticas de desarrollo de proveedores como la evolución cultural de la empresa y los proveedores en conjunto [23].

Las políticas de desarrollo son relaciones estables y de largo plazo, usualmente se busca contar con un número limitado de proveedores activos, un sistema de calificación global, una evaluación de proveedores sobre la base del coste total en lugar de considerar únicamente el precio de compra, y una verdadera cooperación con los proveedores para hacer sus procesos más fiables. La evolución

cultural es la adopción del control total de calidad y de un enfoque de cadena de valor, esto es una relación proveedor cliente concebida como una serie de conexiones.

La evolución de la organización en la co-fabricación implica el tránsito de la empresa por diferentes niveles, partiendo del planteamiento convencional que carece de un enfoque holístico y caracterizado por una visión de la empresa como agregación de departamentos.

La co-fabricación surge de conceptos como calidad total y sistemas de producción JIT, lo cual trajo consigo cambios importantes en los aprovisionamientos, requiriendo un sistema de producción flexible y unos acuerdos estables con los proveedores, que le permitieran actuar conjuntamente. El esquema de producción JIT implica un número limitado de proveedores integrados operativamente con el cliente, una conexión estrecha y un número reducido. Se busca reducir los riesgos asociados a cada proveedor individual, en cuanto a la influencia contractual, asignando mayores volúmenes a cada proveedor y haciendo uso de una creciente inteligencia de mercados.

Para Merli [23] existen tres niveles operacionales en función del grado de evolución de la relación de co-fabricación (la tabla V presenta un resumen de los criterios y elementos de referencia en las relaciones con los proveedores en los tres niveles): clase III proveedor convencional, clase II proveedor asociado y clase I proveedor socio.

**Tabla V.** Modelo operacional de relaciones proveedor cliente, con base en [23]

Nivel de proveedores	Clase III: proveedor convencional	Clase II: proveedor asociado	Clase I: proveedor socio
Gestión de la calidad	Proveedor: suministra de acuerdo con especificaciones de calidad. Cliente: hace inspecciones de entradas y en la fuente.	Proveedor: autocertificación. Cliente: paso libre. Programas de mejora de la calidad (proveedor-cliente).	Proveedor: responsable de la conformidad de los componentes para la satisfacción del cliente final. Mejora continua conjunta y co-diseño de requerimientos.
Aspectos de logística	Suministros: pedidos por teléfono con plazos de entrega específicos. Se requieren stocks de reserva.	Contratos a largo plazo. Entregas JIT / sincronizadas directamente con producción (no stocks). Reducción continua de stocks y plazos (ambas partes).	Proveedor integrado en el proceso logístico del cliente (mismos documentos, mismo sistema operativo). Información y sistema de planificación compartidos (red EDI).
Desarrollo de tecnología y de producto	Características de producto y componentes diseñados solo por el cliente. Verificación de primer suministro.	Requerimientos técnicos de componentes y tecnología definidos con el proveedor. Proveedor consultado en avance.	Proveedor proactivo, involucrado en los procesos de desarrollo y planificación del producto, empezando por el concepto de producto.

Con los cambios en las relaciones proveedor-cliente ha evolucionado la evaluación a los proveedores, Merli [23] identifica tres fases de desarrollo conceptual y lógico y seis niveles de evolución asociados, los cuales se sintetizan en la figura 3. Como se observa en la figura, las relaciones con los proveedores evolucionan progresivamente pasando de un nivel de negociación, que incluye una evaluación meramente técnica, hasta un nivel de cofabricante en el cual se presenta una relación estratégica.

La lógica dominante en la producción de bienes se traslada a los servicios, lo que implica que las propiedades de estos últimos son estandarizadas y descritas a modo de especificaciones detalladas. El proveedor y el comprador son distantes en sus relaciones y por tanto los proveedores pueden ser sustituidos fácilmente [22].

Tipo de proveedor y evaluación	Factores de evaluación	Nivel técnico
<p><b>CLASE I:</b>  <b>PROVEEDOR SOCIO</b>                      Evaluación estratégica del proveedor                      (Fase 3)</p>	<p><b>Estrategias de negocio y gestión de la calidad total</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Capacidad de desarrollo tecnológico</li> <li>▪ Compatibilidad con estrategias del cliente</li> <li>▪ Capacidad de negocio</li> <li>▪ Se busca coherencia entre las áreas de desarrollo del proveedor y del cliente, siendo preferible un proveedor menos capaz pero más afín en su perspectiva de desarrollo a uno capaz pero con intereses tecnológicos disímiles, pues se busca un socio de negocios</li> </ul>	<p>Cofabricante</p>
<p><b>CLASE II:</b>  <b>PROVEEDOR ASOCIADO</b>                      Evaluación global de resultados del proveedor                      (Fase 2)</p>	<p><b>Contribución referente a producto u organización</b>                      (integración de productos y procesos)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nivel tecnológico</li> <li>▪ Sistema de gestión</li> <li>▪ Destreza para mejoras y tendencias de resultados</li> </ul> <p><b>Capacidad del proceso</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coste total del producto suministrado (costes de no calidad, de stock, de planificación, etc.)</li> <li>▪ Sistema de aseguramiento de la calidad</li> <li>▪ Nivel de recursos humanos</li> <li>▪ Flexibilidad/Elasticidad</li> </ul>	<p>Cofabricante de primer nivel</p> <p>Integración operacional</p>
<p><b>CLASE III:</b>  <b>PROVEEDOR CONVENCIONAL</b>                      Evaluación técnica del output                      (Fase 1)</p>	<p><b>Elementos claves en el JIT</b>                      La clasificación de los proveedores se basa en la logística operacional y el coste total</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plazo de entrega</li> <li>▪ Fiabilidad de las entregas</li> </ul> <p>Evaluaciones rigurosas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Calidad del producto (especificaciones y resultados)</li> <li>▪ Precio</li> </ul>	<p>Parámetros logísticos</p> <p>Certificación</p> <p>Negociación</p>

**Figura 3.** Evaluación de proveedores y evolución de los sistemas de evaluación.

En una lógica servicio dominante, el proceso de compras requiere que las necesidades se especifiquen conjuntamente, las especificaciones son co-creadas y las relaciones entre compradores y vendedores son cercanas y de largo plazo; una de las desventajas posibles es que el proceso se torna costoso y causa dependencia con el proveedor, por lo cual tiende a ser evitado por muchos compradores.

## 5. Tendencias

De acuerdo con [4], las principales competencias futuras que deben poseer los profesionales del área de PSM y que, de manera más amplia, se constituyen en aspectos de creciente interés en el contexto organizacional, se relacionan principalmente con las agendas de sostenibilidad, integración y digitalización (por ejemplo, tecnología e-procurement, automatización, análisis de Big Data). Estas tendencias también son reconocidas como áreas emergentes en la revisión realizada por [20]. El orden en que se desarrollan las tendencias se basa, de una parte, en los resultados del estudio [4], según el cual las competencias más importantes son las relacionadas con la digitalización, y por otra, se considera que éstas guardan una estrecha relación con la sostenibilidad y la integración.

## 5.1. Sostenibilidad

Ante la tendencia a considerar las implicaciones ambientales, el PSM ecológico, que puede conceptualizarse como “una práctica de compra respetuosa con el medio ambiente que reduce las fuentes de residuos y promueve el reciclaje y la recuperación de los materiales comprados sin afectar negativamente a los requisitos de rendimiento de dichos materiales” [24], cobra especial importancia hoy en día.

El valor residual de un producto es un activo ocioso y la eliminación de un producto (en lo que se conoce como economía circular) implica la necesidad de definir o aclarar dicho valor en un esquema para su reutilización. Para aprovechar tal valor residual, un producto o sus componentes deben diseñarse considerando las opciones de reutilización, remanufactura y actualización futuras [17].

En una situación ideal, el producto tiene un diseño modular apropiado y sus componentes se reutilizan en un producto ascendente u otra familia de productos o se reciclan al final de su vida útil, el diseñador debe considerar la eficiencia de los recursos no solo en la etapa de reutilización sino también en las etapas de producción y adquisición [17]. La colaboración intrafuncional y del personal de compras con otras áreas tiene el objeto de mejorar la disponibilidad del producto, aumentar la velocidad del flujo, disminuir la necesidad de nuevas compras e incrementar la rotación del inventario y la utilización de la modularidad y la comunalidad como ayuda para reducir los efectos de la incertidumbre y facilitar la función de aprovisionamientos son una tarea en desarrollo [13].

En el futuro, la investigación en PSM debe ir más allá de las economías de reciclaje y recuperación, pues en una cadena de suministro interconectada, ya no es suficiente que una empresa sea consciente del medio ambiente, también debe garantizar lo mismo para varios niveles de su base de suministro. Además de garantizar la conciencia medioambiental de los proveedores de primer nivel, también se necesitan la trazabilidad y la transparencia en los proveedores de segundo y tercer nivel [30] citado en [31].

Cada vez es más relevante la inclusión de la sostenibilidad como criterio en las compras tanto públicas como privadas, en [9] se analizan procesos licitatorios en Canadá, encontrándose varios niveles de inclusión de la sostenibilidad en ellos, yendo desde la mera inclusión del término hasta ser un criterio de peso en la evaluación de las propuestas.

La logística inversa (RL, del inglés *reverse logistics*), considerada como el proceso de planeación, implementación y control de los flujos de materias primas, producto en proceso y bienes finales en sentido contrario desde un punto de fabricación, distribución o de uso a un punto de recuperación o de disposición apropiada [10], es una de las áreas que se deben considerar como parte del PSM ecológico.

La logística inversa por incluir actividades de recuperación (como reparación, reacondicionamiento, refabricación, canibalización y reciclaje, que implican flujos adicionales de materiales de entrada y demandas adicionales) es un tema de interés en la función de aprovisionamiento.

La logística inversa se caracteriza por su aleatoriedad tanto en el volumen como en las condiciones de los productos que regresan aguas arriba dentro del proceso productivo [26], la incertidumbre ligada al estado de un producto determina el lugar en el que se reincorporará a la cadena de suministros y si se hará en la misma cadena en la cual se originó el producto o en una diferente.

Herramientas tecnológicas de la industria 4.0, como el internet de las cosas, pueden servir a las empresas para supervisar el uso de productos y sugerir a los usuarios de opciones de ciclo de vida adecuadas [17].

## **5.2. Integración entre las operaciones del aprovisionamiento y la cadena de suministro dinámica**

En la última década, una de las tendencias identificadas en la evolución de la logística de aprovisionamiento es la transición de una gestión de proveedores, orientada a garantizar calidad, capacidad técnica, precio y tiempos de respuestas adecuados [27], a un enfoque en donde se integran políticas internas de abastecimiento con los procesos de la cadena de suministro que son alineados por el comportamiento dinámico de los mercados.

Generar estos procesos de integración se convierte en una estrategia para lograr ventajas competitivas, ya que las organizaciones que reconocieron esta oportunidad y las implementaron, lograron minimizar costes, simplificar sus procesos, reducir en un 15 % sus niveles de inventarios y realizar alianzas estratégicas con sus proveedores y clientes; además de esperar un impacto directo en la competitividad y en la rentabilidad, ya que los fabricantes invierten aproximadamente el 50 % de sus ingresos operacionales en las compras de bienes y servicios necesarios para la obtención del producto final [29].

Sin embargo, algunas organizaciones no han tenido éxito en estos procesos de alineamiento, ya que adoptan en la gestión de aprovisionamiento una visión estática que se centra en la minimización de costes, mientras que la operación de la cadena de suministro se encuentra orientada por las características de un mercado dinámico. En consecuencia, la tendencia descrita propone adoptar un enfoque interfuncional y de colaboración que logre identificar los requisitos de toda la cadena de suministros antes de fijar las condiciones y relaciones con sus proveedores. Algunos de los elementos desde la perspectiva estratégica identificados en la revisión de fuentes secundarias para lograr una gestión dinámica e integrada del aprovisionamiento son: a) sincronización de las actividades de planificación de la demanda en toda la cadena para pronosticar conjuntamente; b) administración colaborativa de los inventarios; c) alineación de los tiempos de entrega; d) involucramiento de todos los socios de la cadena en la gestión del ciclo de vida del producto; e) alineación de la huella de cada proveedor con la estrategia de los clientes de la cadena de suministro; y f) alineación de los planes de capacidad a largo plazo entre proveedores y clientes para mitigar los riesgos de escasez de suministros [11].

Por otro lado, John Gattorna reconoce que estas unidades se encuentran en continua evolución debido a que son gestionadas y accionadas por los deseos cambiantes de sus clientes, por tanto reconocer esta dinámica significará cambiar la forma de administrarlas y de gestionar sus procesos. En [16] también se identifica que el enfoque antiguo de gestionar las cadenas se basaba en pensar

en la logística como una función concentrada en infraestructura y operaciones, lo que se materializó en las organizaciones en una “excelencia operacional”; sin embargo, en el nuevo enfoque la gestión de la cadena de abastecimiento significa estratégicamente mucho más que controlar los bajos costes; se debe entonces, comprender la interacción entre el comportamiento humano, la tecnología de información y la infraestructura con la que cuenta cada uno de los actuantes. Es así como, para los procesos de aprovisionamiento y compra, este autor propone una estrategia de “alineación inversa” en la que los parámetros de integración del aprovisionamiento con la oferta, se establecen en coherencia con las conductas de los clientes y de proveedores, en interacción en una cadena de suministro dinámica (la imagen espejo del lado del cliente).

### 5.3. Digitalización

En [19] se presenta un marco de referencia del aprovisionamiento en la industria 4.0, el cual representa el solapamiento de diferentes desarrollos tecnológicos que mejoran tanto productos como procesos, siendo uno de sus principales conductores la reducción de costes, que liga la digitalización y su contribución a la disminución de uso de material y en consecuencia al aprovisionamiento. El aprovisionamiento es considerado una función primordial por asegurar la funcionalidad del proceso al proveer todo lo necesario que la compañía no puede producir.

En la cuarta revolución industrial, proclamada en 2011, previo a su realización, el aprovisionamiento forma parte importante de ella permitiendo la conexión de la organización con sus proveedores y habilitando la cooperación dinámica por medio de la tecnología.

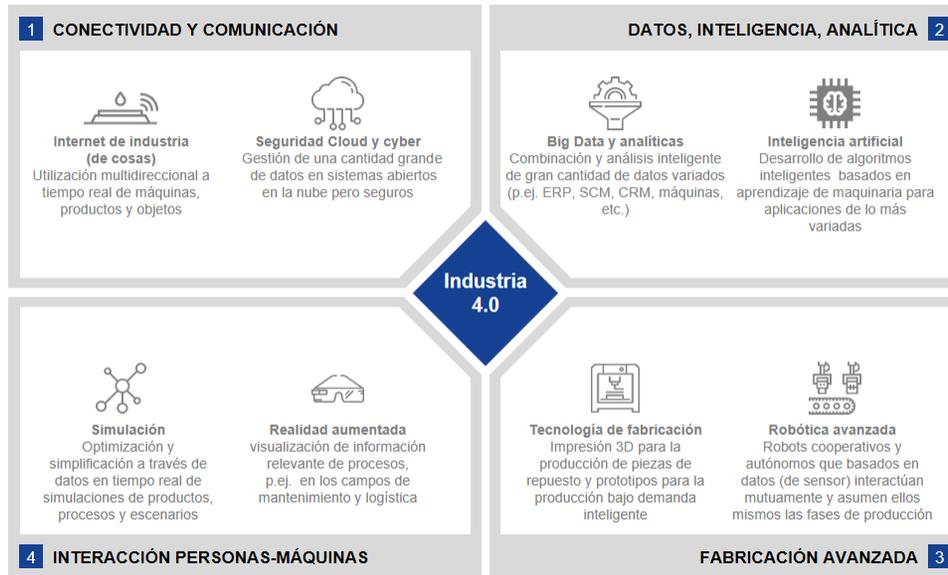
Una revolución industrial se manifiesta a través de cambios en los componentes organizacional y tecnológico, “en el plano organizacional la industria 4.0 se caracteriza por una integración horizontal y vertical de empresas que permiten una producción individualizada, sostenible, flexible y resiliente entre empresas en una cadena de suministro descentralizada y autoorganizada”, a través de la cual se pueden dar progresos en tiempos, costes y calidad; los cambios organizacionales en “los procesos de creación de valor son conducidos tecnológicamente por una red en tiempo real de sistemas ciberfísicos en el internet de las cosas (IoT, del inglés *internet of things*) y en servicios, resultando en compañías inteligentes y autónomas digitalmente integradas” [19]. En la figura 4 se presentan los campos tecnológicos centrales de la industria 4.0 y por lo tanto, del aprovisionamiento 4.0.

En el nivel operativo, el aprovisionamiento 4.0 representa la determinación inteligente de los requisitos y el procesamiento autónomo de las adquisiciones a la vez que promueve la cooperación con los proveedores y la disponibilidad de toda la información relevante a nivel estratégico.

Personalización, reducción del ciclo de vida e innovaciones tecnológicas constituyen el nuevo paradigma de producción de la industria 4.0, en el que se superponen innovaciones debidas al desarrollo tecnológico.

El aprovisionamiento en la industria 4.0 puede ser visto como un proceso de digitalización definida como “la forma en que muchos aspectos de la vida social son reestructurados en torno a las infraestructuras de comunicación digital y de medios” [33], en la tabla VI se presentan a modo

de resumen los efectos de la digitalización en los costes del proceso de aprovisionamiento y las tecnologías asociados.



**Figura 4.** Cuatro campos tecnológicos centrales de la industria 4.0 [1]

**Tabla VI.** Marco de referencia de aprovisionamiento 4.0 [19]

Elemento del coste	Paso del aprovisionamiento	Tecnologías
Costes de análisis de demanda	Estrategia de aprovisionamiento	Big Data, Data Analytics, tecnologías de manufactura
	Planeación de la demanda	Big Data, Data Analytics, tecnologías de manufactura
Costes de selección de proveedores	Requerimiento de ofertas	IoT, Cloud ciberseguridad, Big Data, robótica avanzada
	Evaluación de ofertas	IoT, Cloud ciberseguridad, Big Data
	Negociación de condiciones	Big Data, IoT
	Acuerdos de suministros	IoT, Cloud, ciberseguridad
Costes directos de suministros	Determinación de cantidad de orden	Data Analytics, Robótica avanzada
	Orden de compra	Robótica avanzada, IoT
	Transporte de material	IoT, Big Data, Data Analytics, transporte autónomo
Coste de recuperación de fallas del proveedor	Recepción e inspección de materiales	IoT, realidad virtual, realidad aumentada, robótica avanzada

## 6. Conclusiones

El aporte al conocimiento del trabajo realizado se materializa en ofrecer un referente académico de carácter reflexivo e interpretativo que estudia las nuevas dimensiones que ha adquirido la logística de aprovisionamientos desde una perspectiva estratégica en la cadena de suministros, en el que se reconoce que la función de aprovisionamientos tiene un impacto creciente en la estrategia de la compañía, principalmente en lo que respecta al coste total y a la satisfacción oportuna de las necesidades del cliente. La evolución, desde una lógica del precio más bajo hacia una lógica del coste total más bajo, implica la consideración de los proveedores como actores claves en el proceso de aprovisionamientos y en la estrategia de la empresa [14]. Así, hay una tendencia de pasar a un

número reducido de proveedores y vincularlos al desarrollo conjunto de productos o procesos, en el cual se eliminan ineficiencias que no son visibles fácilmente si se tiene en cuenta la lógica del precio más bajo.

Esta nueva lógica lleva a una mayor integración intra e inter empresarial, debido a la necesidad de reducir los despilfarros asociados a la adquisición de materiales. Asimismo, una integración con los proveedores en un ambiente de co-fabricación permite delegar en ellos etapas del proceso de fabricación que antes era imposible y produce, por tanto, una transformación de toda la cadena de suministros. Un sistema integrado permite a las compañías beneficiarse de reducción de inventarios, reducción de costes, incremento en el valor agregado de bienes y servicios para el consumidor final y relaciones más cercanas con los socios. La gestión de la cadena de suministros debe direccionar entonces interdependencias complejas, creando así una empresa extendida.

Ante el auge de la sostenibilidad de la cadena de suministro, la tarea de aprovisionamiento (productos o servicios) debe demostrar cómo puede afectar la línea estratégica de la empresa, contribuyendo al crecimiento de las ventas y de la participación en el mercado a través de su relación con la calidad y la innovación de los productos, pero también sobre su impacto en las características ambientales del producto y los procesos responsables de producción. Esto hace que la gestión de aprovisionamientos sea cada día más compleja, pues la consideración de las tendencias como la logística inversa conlleva un aumento en las fuentes de recursos y unas variaciones en la demanda que presentan una aleatoriedad mucho mayor que la que se identifica en la logística de aprovisionamientos tradicional.

Como futuras áreas de investigación es importante evaluar la influencia de las diferentes formas de recuperación que implican las actividades de logística inversa, en el abastecimiento de recursos y en la cuantificación de la demanda en los diferentes eslabones de la cadena de suministros, incluyendo proveedores. El enfoque de cooperación con su implícita utilización de herramientas tecnológicas basadas primero en la comunicación punto a punto y luego a través de redes de información, como estrategia de integración entre las empresas cliente y proveedor, y la digitalización que implica cada día un mayor número de aplicaciones de tipo tecnológico como soporte de la función de aprovisionamiento. Asimismo, la investigación en PSM debe tener en cuenta que esta ya no es una función que se limita exclusivamente a la compra de productos o servicios, y que por tanto debe centrarse en comprender el suministro de conocimientos, capacidades e innovación que se traducen en un mejor rendimiento y nuevas oportunidades comerciales [31].

En lo que respecta a la sostenibilidad, se sugiere investigar el impacto que esta tiene, en sus dimensiones social, ambiental y económica, en las decisiones de PSM. Lo anterior implica definir los criterios de sostenibilidad en PSM (p. ej. evaluación de proveedores basada en métricas de sostenibilidad, análisis de costos del ciclo de vida en la gestión de suministros), su enfoque de implementación y la evaluación de su impacto (p. ej. impacto en la imagen de marca, compensaciones de innovación e impacto financiero) [31]. Asimismo, caracterizar las prácticas de PSM ecológicas en sectores industriales específicos, abarcando la trazabilidad no sólo para los proveedores de primer nivel sino para la cadena de suministros extendida, es considerado un trabajo pendiente en el ámbito académico con alto valor para la toma de decisiones de las empresas.

Finalmente, los autores reconocen que es posible complementar los hallazgos con análisis bibliométricos que den cuenta de la dinámica del dominio de conocimiento de PSM, lo que se configura como una vía de investigación futura.

## Referencias

- [1] Fostec & Company, “Industria 4.0.” [En línea]. <https://www.fostec.com/es/competencias/estrategia-de-digitalizacion/industria-4-0/> ↑ 15
- [2] J. Adams, R. G. Kauffman, F. M. Khoja, y S. Coy, “Looking at Purchasing Development through the Lens of Small Business,” *Journal of Managerial Issues*, vol. 28, no. 3/4, pp. 145–170, 2016. [En línea]. <http://www.jstor.org/stable/44113702> ↑ 5
- [3] P. H. Andreasen y B. Gammelgaard, “Change within purchasing and supply management organisations – Assessing the claims from maturity models,” *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 24, no. 2, pp. 151–163, Mar. 2018. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2017.11.005> ↑ 5, 8
- [4] L. Bals, H. Schulze, S. Kelly, y K. Stek, “Purchasing and supply management (PSM) competencies: Current and future requirements,” *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 25, no. 5, p. 100572, Dec. 2019. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2019.100572> ↑ 11
- [5] J. B. Barney, “Purchasing, Supply Chain Management and Sustained Competitive Advantage: The Relevance of Resource-based Theory,” *Journal of Supply Chain Management*, vol. 48, no. 2, pp. 3–6, Mar. 2012. [En línea]. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2012.03265.x> ↑ 7
- [6] J. M. Castán Farrero, C. Cabañero Pisa, y A. Núñez Carballosa, *La logística en la empresa : fundamentos y tecnologías de la información y de la comunicación*. Madrid: Ediciones Pirámide, 2003. ↑ 3
- [7] A. A. Chadegani, H. Salehi, M. M. Yunus, H. Farhadi, M. Fooladi, M. Farhadi, y N. A. Ebrahim, “A Comparison between Two Main Academic Literature Collections: Web of Science and Scopus Databases,” *Asian Social Science*, vol. 9, no. 5, p. p18, Apr. 2013, number: 5. [En línea]. <https://doi.org/10.5539/ass.v9n5p18> ↑ 4
- [8] S. Chopra y P. Meindl, *Supply chain management : strategy, planning, and operation*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001. ↑ 3
- [9] M. Da Ponte, M. Foley, y C. H. Cho, “Assessing the degree of sustainability integration in canadian public sector procurement,” *Sustainability*, vol. 12, no. 14, 2020. [En línea]. <https://doi.org/10.3390/su12145550> ↑ 12
- [10] M. P. De Brito, “Managing Reverse Logistics or Reversing Logistics Management?” Ph.D. dissertation, Erasmus University Rotterdam, Erasmus Research Institute of Management (ERIM), 2003. ↑ 12
- [11] A. Dekhne, Xin Huang, y Apratim Sarkar, “Bridging the Procurement- Supply Chain Divide.” *Supply Chain Management Review*, vol. 16, no. 5, pp. 36–42, Oct. 2012. ↑ 13
- [12] M. J. Escudero Serrano, *Gestión de aprovisionamiento: administración y finanzas*. Madrid: Paraninfo, 2011. ↑ 2
- [13] I. Fernández y N. García, “Efectos de la implicación en actividades de recuperación de valor sobre la función de aprovisionamientos,” *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa [en línea]*, vol. 31, pp. 97–118, 2007. [En línea]. [https://doi.org/10.1016/S1138-5758\(07\)70084-1](https://doi.org/10.1016/S1138-5758(07)70084-1) ↑ 12
- [14] K. Foerstl, M. C. Schleper, y M. Henke, “Purchasing and supply management: From efficiency to effectiveness in an integrated supply chain,” *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 23, no. 4, pp. 223–228, Oct. 2017. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2017.08.004> ↑ 15
- [15] P. Fraser, J. Moultrie, y M. Gregory, “The use of maturity models/grids as a tool in assessing product development capability,” *IEEE International Engineering Management Conference*, 2002. [En línea]. <https://doi.org/10.1109/IEMC.2002.1038431> ↑ 5
- [16] J. Gattorna y A. Efron, *Cadenas de abastecimiento dinámicas (living supply chains): cómo movilizar la empresa alrededor de lo que los clientes quieren*. Bogotá: ECOE Ediciones, 2009. ↑ 13
- [17] M. Inoue, S. Yamada, S. Miyajima, K. Ishii, R. Hasebe, K. Aoyama, T. Yamada, y S. Bracke, “A modular design strategy considering sustainability and supplier selection,” *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 14, no. 2, pp. JAMDSM0023–JAMDSM0023, 2020. [En línea]. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2020jamdsm0023> ↑ 12, 13
- [18] T. E. Johnsen, “Purchasing and supply management in an industrial marketing perspective,” *Industrial Marketing Management*, vol. 69, pp. 91–97, Feb. 2018. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2018.01.017> ↑ 7

- [19] T. Klünder, J. N. Dörseln, y M. Steven, “Procurement 4.0: How the digital disruption supports cost-reduction in procurement,” *Production*, vol. 29, p. e20180104, 2019. [En línea]. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20180104> ↑ 14, 15
- [20] L. Knight, J. Meehan, E. Tapinos, L. Menzies, y A. Pfeiffer, “Researching the future of purchasing and supply management: The purpose and potential of scenarios,” *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 26, no. 3, p. 100624, jun 2020. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2020.100624> ↑ 11
- [21] P. Kraljic, “Purchasing Must Become Supply Management,” oct 1983. [En línea]. <https://hbr.org/1983/09/purchasing-must-become-supply-management> ↑ 5, 8, 9
- [22] N. Lindberg y F. Nordin, “From products to services and back again: Towards a new service procurement logic,” *Industrial Marketing Management*, vol. 37, no. 3, pp. 292–300, May 2008. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2007.07.006> ↑ 10
- [23] G. Merli, *Gestión de proveedores : nuevas estrategias de aprovisionamientos para fabricantes*. Madrid: TGP Hoshin, 2001. ↑ 5, 6, 7, 9, 10
- [24] H. Min y W. P. Galle, “Green purchasing practices of US firms,” *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 21, no. 9, pp. 1222–1238, Jan. 2001, publisher: MCB UP Ltd. [En línea]. <https://doi.org/10.1108/EUM000000005923> ↑ 12
- [25] R. T. Montgomery, J. A. Ogden, y B. C. Boehmke, “A quantified Kraljic Portfolio Matrix: Using decision analysis for strategic purchasing,” *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 24, no. 3, pp. 192–203, June 2018. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2017.10.002> ↑ 8, 9
- [26] S. K. Mukhopadhyay y H. Ma, “Joint procurement and production decisions in remanufacturing under quality and demand uncertainty,” *Special Issue on Operations Strategy and Supply Chains Management*, vol. 120, no. 1, pp. 5–17, July 2009. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.07.032> ↑ 13
- [27] R. Mwikali y S. Kavale, “Factors affecting the selection of optimal suppliers in procurement management,” *International Journal of Humanities and Social Science*, vol. 2, no. 14, pp. 189–193, 2012. [En línea]. [http://www.ijhssnet.com/journals/Vol\\_2\\_No\\_14\\_Special\\_Issue\\_July\\_2012/23.pdf](http://www.ijhssnet.com/journals/Vol_2_No_14_Special_Issue_July_2012/23.pdf) ↑ 13
- [28] C. R. Pereira, A. Lago da Silva, W. L. Tate, y M. Christopher, “Purchasing and supply management (PSM) contribution to supply-side resilience,” *International Journal of Production Economics*, vol. 228, p. 107740, Oct. 2020. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107740> ↑ 2
- [29] W. D. Presutti, “Supply management and e-procurement: creating value added in the supply chain,” *Industrial Marketing Management*, vol. 32, no. 3, pp. 219–226, Apr. 2003. [En línea]. [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(02\)00265-1](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(02)00265-1) ↑ 13
- [30] C. Reuter, K. Foerstl, E. Hartmann, y C. Blome, “Sustainable Global Supplier Management: The Role of Dynamic Capabilities in Achieving Competitive Advantage,” *Journal of Supply Chain Management*, vol. 46, no. 2, pp. 45–63, 2010. [En línea]. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2010.03189.x> ↑ 12
- [31] T. Schoenherr, S. B. Modi, W. Benton, C. R. Carter, T. Y. Choi, P. D. Larson, M. R. Leenders, V. A. Mabert, R. Narasimhan, y S. M. Wagner, “Research opportunities in purchasing and supply management,” *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 16, pp. 4556–4579, Aug. 2012. [En línea]. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.613870> ↑ 12, 16
- [32] J. Schweiger, “Development of a Purchasing and Supply Management Maturity Framework,” *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, pp. 11–21, May 2015. [En línea]. <http://doi.org/10.31387/oscm0190142> ↑ 5
- [33] J. S. Srari y H. Lorentz, “Developing design principles for the digitalisation of purchasing and supply management,” *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 25, no. 1, pp. 78–98, Jan. 2019. [En línea]. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2018.07.001> ↑ 14
- [34] A. A. V. Weele, “Purchasing control : performance measurement and evaluation of the industrial purchasing function,” 1984, publisher: Wolters-Noordhoff. [En línea]. <https://doi.org/10.6100/IR126241> ↑ 5

---

### **Javier Parra Peña**

Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia; Magíster en Ingeniería Industrial de la Universidad de Los Andes, Colombia; Doctor en Ingeniería y Producción Industrial de la Universitat Politècnica de València, España. Profesor de tiempo completo en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, y director del grupo de investigación en logística y cadena de aprovisionamiento -Log&CA UD- de la misma universidad. Correo electrónico: jparrap@udistrital.edu.co

---

### **Yeny Andrea Niño Villamizar**

Ingeniera Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia; Magíster en Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional, Colombia. Actualmente es estudiante del Doctorado en Gestión de la Universidad EAN, Colombia. Profesora de tiempo completo en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, y miembro del grupo de investigación en logística y cadena de aprovisionamiento -Log&CA UD- de la misma universidad. Correo electrónico: yaninov@udistrital.edu.co

---

### **Mónica Yinette Suárez Serrano**

Ingeniera Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia; Especialista y Magíster en Gestión de Redes de Valor y Logística de la Universidad Piloto de Colombia, Colombia. Docente investigadora asociada de la Fundación Universidad de América, Directora del Centro de Investigación y Desarrollo Empresarial -CINDE América- de la misma institución. Correo electrónico: monica.suarez@investigadores.uamerica.edu.co

# Social Relations and Communities in a Virtual Platform for Computer Programming Courses

*Relaciones sociales y comunidades en una plataforma virtual para cursos de programación de computadores*

**GINNA VIVIANA LEYTON YELA**<sup>ID</sup>\*<sup>1</sup>, **ASTRID JOHANA VALENCIA MOSQUERA**<sup>ID</sup><sup>1</sup>,  
**VÍCTOR ANDRÉS BUCHELI GUERRERO**<sup>ID</sup><sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad del Valle (Cali, Colombia), <sup>2</sup>Grupo GUIA, Universidad del Valle (Cali, Colombia).

\*Correspondence e-mail: [ginna.leyton@correounivalle.edu.co](mailto:ginna.leyton@correounivalle.edu.co)

Recibido: 23/02/2021. Modificado: 19/10/2021. Aceptado: 17/11/2021.

## Abstract

**Context:** To identify the relationship between the students' academic performance and the metrics of the graphs obtained corresponding to the interactions of the users in the Piazza platform.

**Method:** The results obtained corresponding to the interactions between students and teachers in the Piazza platform are studied, carrying out a practical case of social network analysis through computational tools and definition of metrics.

**Results:** The resulting information is a valuable support for the implementation of strategies in the content of a course assisted with virtual platforms, since the social structures that result from the different forms of relationship are identified, which allows mapping or analyzing the relationships between people, cooperation between actors, groups, or communities, among others.

**Conclusions:** The metrics established to evaluate the social networks obtained from the platform allow teachers to determine the participation and interaction between students, identifying different patterns of interaction that define a relationship between the construction of social ties with the students' academic performance.

**Keywords:** Social network analysis, Piazza, graphs, metrics, notes.

**Language:** Spanish

Open access



Cite as: G. Leytón-Yela, A. J. Valencia M., V. Bucheli-Guerrero. "Relaciones sociales y comunidades en una plataforma virtual para cursos de programación de computadores". *Ing*, vol. 27, no. 2, 2022. e17797. <https://doi.org/10.14483/23448393.17797>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

### Resumen

**Contexto:** Identificar la relación entre el desempeño académico de los estudiantes y las métricas de los grafos obtenidos correspondientes a las interacciones de los usuarios en la plataforma Piazza.

**Método:** Se estudian los resultados obtenidos correspondientes a las interacciones entre estudiantes y docentes en la plataforma Piazza, realizando un caso práctico de análisis de redes sociales a través de herramientas computacionales y definición de métricas.

**Resultados:** La información resultante es un valioso apoyo para la implementación de estrategias en los contenidos de un curso asistido con plataformas virtuales, puesto que se identifican las estructuras sociales que resultan de las diferentes formas de relación, lo que permite mapear o analizar relaciones entre personas y cooperación entre actores, grupos o comunidades, entre otras.

**Conclusiones:** Las métricas establecidas para evaluar las redes sociales obtenidas de la plataforma permiten a los docentes determinar la participación y la interacción entre los estudiantes, identificando diferentes patrones de interacción que determinan una relación en la construcción de los vínculos sociales con el desempeño académico de los estudiantes.

**Palabras clave:** análisis de redes sociales, Piazza, grafos, métricas, notas

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

En los últimos años el desarrollo de diferentes tecnologías ha facilitado la interacción y la colaboración entre individuos en la web, se han creado plataformas para redes sociales que permiten al usuario comunicarse y generar relaciones con otros usuarios. Estas plataformas se han enfocado en dar soporte para producir y compartir contenido académico en el caso de Moodle, Piazza, Google Classroom, entre otros, o de esparcimiento en el caso de Facebook y Twitter. Piazza es una plataforma en línea que facilita la interacción entre estudiantes y docentes, los estudiantes pueden apoyarse en el desarrollo de una tarea mediante la resolución de dudas por parte de sus compañeros, docentes o asistentes de clase [1]. Para todos los casos anteriormente mencionados las redes se componen de actores denominados en el análisis de redes sociales como nodos o vértices y de relaciones como aristas o arcos [2]. La relación entre actores sociales se realiza mediante un grafo, que corresponde a la representación de una agrupación de elementos conectados mediante relaciones entre ellos. Los arcos se usan para interpretar los comportamientos sociales de las personas implicadas o la contextualización de fenómenos sociales, lo que permite a la academia realizar diferentes análisis de estas interacciones mediante los nuevos modos de socialización [3].

Para la evaluación de este tipo de redes, se recurre a un método denominado análisis de redes sociales (ARS), el cual estudia la estructura social a partir de un patrón de relación o la interpretación de patrones sociales. Los datos de las relaciones o interacciones se obtienen por variables explicativas del comportamiento social sobre conductas, opiniones o roles de las personas implicadas; luego se procesan mediante procedimientos formales como la teoría de grafos o teoría de matrices. Frente a esto, se encuentran herramientas que permiten extraer los datos de la red a través de diferentes técnicas o métodos [4] con el apoyo de diversas aplicaciones desarrolladas para tal fin como Mathematica o Gephi, entre otras. Estas son usadas para comprender y analizar métricas que permiten visualizar el análisis de la dinámica de comunicación, detectar los patrones de interacción en línea y sacar conclusiones de estos [5].

Las técnicas, métricas o medidas permiten determinar los nodos que constituyen la red y las relaciones que se generan entre ellos, además de procesar diferentes datos, realizar cálculos de métricas de manera simple y ordenada, crear imágenes visuales que facilitan la organización y análisis de datos. Existen muchas reglas para entender las redes y los actores. Las más usadas se clasifican en métricas de centralidad, grado y grupo. A través de las métricas los datos pueden ser organizados y analizados.

La motivación para la realización de la presente investigación se encuentra enmarcada en el análisis de las redes sociales, para entender las estructuras en las relaciones de un sistema complejo, identificar competencias de liderazgo y la importancia de los vínculos generados en un contexto educativo. El análisis del funcionamiento de la red a través de las relaciones entre actores permite generar oportunidades o limitaciones que se presenten en la red y en cada uno de sus actores, visualizando su posición, para posteriormente diseñar estrategias de crecimiento y desarrollo.

En este artículo, mediante tres estudios de caso se desea dar a conocer cómo un foro Piazza impacta en la construcción de vínculos sociales y en el desempeño académico, es decir, la relación entre la participación de los estudiantes en los foros y la calificación obtenida al final del curso. Los estudios de caso se llevaron a cabo en tres cursos de programación de computadores, impartidos en los programas profesionales de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad Cesmag, a través del análisis de redes sociales. Los cursos son obligatorios y se impartieron de manera presencial, apoyados en la plataforma Piazza. Los estudiantes mediante los foros debían coordinar su participación para resolver diferentes temáticas y discutir sobre ellas, fomentando la interacción y el trabajo grupal entre compañeros.

Este análisis permite la extracción de conocimiento de una red, por medio de la herramienta Mathematica y la aplicación de una serie de métricas, para entender a las redes y sus actores. Las métricas establecidas en el análisis son centralidad de intermediación, grado de centralidad y comunidades o grupos conformados. En el caso de las métricas establecidas, se hace referencia a las habilidades de liderazgo e interacción social, las cuales son importantes en los estudiantes. Estas habilidades son importantes en el entorno laboral, de gran demanda para la gestión de proyectos y el trabajo en equipo a nivel profesional.

Es importante establecer en el documento algunos conceptos clave para el análisis de redes sociales, dado que será de utilidad para el entendimiento del artículo, además de describir el proceso metodológico para seleccionar la fuente, procesar los datos, generar los grafos, realizar el análisis de las métricas y mostrar la discusión de los resultados obtenidos, las conclusiones y el trabajo futuro.

## 2. Método

A continuación, se presenta de forma organizada la metodología empleada para la presente investigación, así mismo se presenta la figura 1, en la cual se establece de forma ordenada una representación gráfica del método o proceso descrito. Se realizan tres estudios de caso, en los cuales se discute la influencia de algunos actores de la red y las comunidades que se conforman a partir de las

interacciones. El curso duro 16 semanas, se contó con 110 estudiantes participantes, dos docentes titulares de las materias y cuatro docentes asistentes.

## 2.1. Selección de la fuente de datos Piazza

Si bien es cierto que existen diferentes plataformas que pueden ofrecer datos útiles para una investigación y considerarse una fuente fiable, también es cierto que seleccionar la fuente adecuada para el trabajo que se desea realizar es una parte importante del proceso de investigación.

Existen diferentes criterios para considerar una fuente de datos como apta para el trabajo que se desea realizar, entre los que se encuentran [6]:

1. su relevancia para el tema de trabajo
2. la naturaleza de sus contenidos
3. la autoridad en la materia de quienes elaboran la información
4. la actualización de sus contenidos
5. su nivel de especialización
6. su autenticidad, si se puede identificar quiénes la producen y la editan
7. su propósito, que puede estar orientado al mundo académico, ser informativo o divulgativo
8. el formato: textual, multimedia, sonoro, gráfico, etc.
9. el idioma
10. su origen: si es personal, institucional
11. su accesibilidad

Teniendo en cuenta varios de los criterios mencionados, se selecciona Piazza como la plataforma educativa que permitirá obtener todos los datos necesarios para realizar el análisis de redes y sus métricas, en el marco del trabajo que se pretende abordar en este artículo. A continuación, se mencionan algunos de los puntos que dieron mayor fuerza en la selección de esta plataforma.

Piazza es una plataforma de gran aceptación entre profesores y estudiantes, diseñada para que los instructores administren eficientemente preguntas y respuestas de la clase, simulando una discusión en clase real, relevante para el tema de trabajo y generando un ambiente de interacción entre los agentes de propósito académico, cumpliendo los criterios 1 y 7.

En Piazza los estudiantes pueden publicar preguntas y colaborar para editar las respuestas a estas preguntas. Los instructores también pueden responder preguntas, respaldar las respuestas de los estudiantes y editar o eliminar cualquier contenido publicado. Se puede asumir así que los datos son confiables, al representar de manera textual la interacción del actor, escrita por él mismo; la

edición de los datos no es responsabilidad ajena de los actores, así que esto refina la interacción, haciéndola más rica en contenido; con esto cumple los criterios 4 y 6.

Aunque existen diferentes tipos de plataformas educativas, Piazza es una herramienta de fácil acceso para el presente trabajo, pues se cuenta con la colaboración de instructores de programación para extraer los datos requeridos para los análisis, lo que da un valor agregado al presente estudio. La naturaleza del contenido relacionada con cursos de lógica de programación y la formación de las autoras de este artículo hacen que el idioma usado sea entendido y facilita el análisis de las métricas, cumpliendo así los criterios 2, 3, 9 y 11.

Como punto final, Piazza cuenta con una serie de utilidades relacionadas con la visualización, la generación de estadísticas y la exportación de los datos en diferentes formatos, cumpliendo el criterio 8. Siendo este aspecto un punto diferenciador, ya que con la extracción de los datos es posible procesarlos, procesarlos y analizarlos.

## 2.2. Extracción de los datos a partir de las interacciones

Teniendo en cuenta la facilidad de acceso a la plataforma, se obtienen los datos de tres cursos de asignaturas relacionadas con la programación:

- Dos cursos de la Universidad Nacional correspondientes a la materia de Programación de computadores, cohortes 2019-1 y 2019-2, clase grupo 8.
- Un curso de la Universidad Cesmag correspondiente a la materia Programación de computadores, cohorte 2020-I, grupos jornadas mañana y tarde.

Aunque la plataforma Piazza permite generar estadísticas correspondientes a los usuarios registrados en la plataforma y los contenidos de clases, es decir, las publicaciones realizadas en los foros o cuestionarios, se busca una visualización más clara sobre las métricas a construir y analizar, y, por lo tanto, se decide realizar el estudio con la herramienta de análisis de redes (Wolfram Mathematica 12.1).

Por tanto, se hace necesario el uso de la utilidad de extracción que posee Piazza para obtener los datos de los usuarios y sus interacciones en archivos formateados en .csv y .json, para posteriormente cargarlos en la base de datos seleccionada. La estructura general de Piazza es igual para los cursos que se crean en la plataforma, independiente del contexto o la temática, los archivos generados serán iguales para todos los cursos analizados, lo único que cambia será el contenido de cada uno. Las estructuras extraídas corresponden a: usuarios, contenido de la clase y contribuciones (users, class content and contributions).

## 2.3. Carga de los datos en la base de datos MongoDB

Una vez se tienen los archivos planos .json y .csv, se procede a importarlos a la base de datos, en nuestro caso se seleccionó MongoDB, dado que es un motor basado en documentos que almacena los datos en estructuras parecidas a los documentos .json, haciendo más fácil la interpretación

de los datos y casi transparente la carga de los mismos. Además, tiene como característica principal la flexibilidad al permitir que la base de datos crezca sin tener que alterar la estructura de los documentos que ya se encuentran almacenados en la base [7], pues los documentos dentro de la colección pueden no tener exactamente los mismos campos, además de la capacidad para proveer modularidad y alta disponibilidad.

En el momento en que se cargan los archivo .json usuarios, contenido de la clase y contribuciones a la base de datos, de inmediato se crean las colecciones con los mismos nombres y se llenan con todos los datos que trae el archivo. Una vez se validan los campos de cada una de las colecciones, se construyen las consultas para proyectar los datos de los usuarios estudiantes como “nodos” de la red y las relaciones generadas por las interacciones de los actores en la plataforma como “arcos”.

Para la colección “usuarios” se hace necesario crear un campo autoincremental que identifique con unicidad al estudiante y que sea de tipo numérico, y un campo que contenga la información de las notas finales, para luego generar a través de las consultas las relaciones de los actores mediante este identificador y los análisis basados en la relación entre las métricas y el desempeño académico. Una vez realizadas las pruebas de las consultas definidas para obtener la información requerida, se procede a buscar el mecanismo para la extracción de datos ya depurados a la herramienta de análisis de redes, para esto es necesario generar un archivo plano en formato .net, que corresponde al formato aceptado por Mathematica. El archivo se genera con un programa desarrollado en Python, que se explica en detalle en la siguiente etapa.

## **2.4. Generación del archivo plano con los datos para analizar Python**

Teniendo como objetivo la generación de un archivo plano en formato .net, se crea una aplicación en Python en la que se establece una conexión con la base de datos de MongoDB y se ejecuten las consultas construidas previamente. Primero se obtienen los resultados de la consulta “nodos”, al traer la información del autonumérico correspondiente al usuario con su respectivo nombre, las notas de cada uno y la cantidad de nodos existentes en el archivo.

Posteriormente, se obtienen los resultados de la consulta “arcos”, al traer la información de la relación entre los nodos con una pareja de valores que representan los autonuméricos de los usuarios (nodos) y si existe interacción a través de alguna pregunta, respuesta, edición o replica en la plataforma Piazza.

Finalmente, con el archivo .net generado se culmina el proceso operativo, cargando los archivos de cada curso a la herramienta Wolfram Mathematica 12.1, la cual permite construir los grafos, representando las interacciones entre nodos y arcos, y a partir de ellos realizar el análisis de las métricas seleccionadas.

## **2.5. Análisis de las métricas a partir de los grafos en Mathematica**

Tomando como base un estudio previo que ahonda en el análisis de redes sociales y la implicación de estas para la valoración del clima en el aula [8], las métricas que se propone extraer son:

- Centralidad de intermediación: que corresponde a los estudiantes o docentes que ocupan una posición intermedia en las comunicaciones informales entre el resto de los estudiantes.
- Grado de centralidad: se refiere al análisis de rango coercible para determinar cuáles estudiantes tienen la mayor cantidad de relaciones e influencias dentro del grupo.
- Estructura de comunidades o grupos: se determina en la actitud y el comportamiento de sí mismos con otros actores.

### 3. Estado del arte

Las redes son un conjunto particular de interrelaciones entre un conjunto de individuos. A través de la teoría de grafos, la red se compone por nodos o vértices que serían los actores, y las aristas o arcos sus relaciones. La relación entre actores sociales se realiza mediante un grafo, que corresponde a la representación de una agrupación de elementos conectados mediante relaciones entre ellos. Los lazos se usan para interpretar los comportamientos sociales de las personas implicadas.

Estas redes son evaluadas por métodos denominados análisis de redes sociales (ARS), que estudian las relaciones existentes entre los actores que conforman un sistema, estos se identifican como nodos que cuentan con atributos como los vínculos con otros actores, componiendo una estructura social. A partir del análisis de las interacciones, se producen comportamientos sociales de las conductas y relaciones establecidas en la participación de una red social. Para el análisis, se utilizan herramientas para procesar matrices o grafos, extrayendo datos de la red mediante métricas, que determinan los nodos y las relaciones que componen la red utilizando diferentes medidas, de manera simple, se representan los datos para el análisis de datos.

En [9] se precisa como el análisis de innovación en ARS ha sido inspirado por los trabajos de los sociólogos, quienes centran su trabajo en el potencial innovador de los lazos débiles y agujeros estructurales que se presenten en una red. Esto se entiende como una brecha en las redes sociales en diferentes dimensiones: geográficos, cognitivos, comunicativos, culturales, sociales, entre otros. Las brechas que se pueden presentar en este tipo de estudios dificultan la innovación, justificando la existencia de vínculos que puedan cerrar estas brechas mediante el grado de centralidad y lazos fuertes que posean algunos nodos de la red, facilitando el proceso de transferencia tecnológica entre participantes.

Por otro lado, existen estudios que han aplicado este enfoque a la evaluación de competencias de aprendizaje en línea, mediante el análisis de interacción de los estudiantes en Moodle LMS, para estudios de caso realizados en cursos de ciencias de la computación e ingeniería. Los resultados evidencian el desempeño de los estudiantes en competencias como liderazgo y habilidades interpersonales. Estas habilidades son importantes en ingeniería, puesto que muchas empresas enumeran el liderazgo como una competencia crucial para satisfacer las necesidades de la sociedad actual [10].

Otra implementación del análisis de redes sociales en LMS están en [11] y [12]. En el primero se realiza un análisis de ventajas, desventajas e idoneidad de herramientas para la generación de



Figura 1. Visualización de la metodología

grafos de las interacciones en redes sociales, es decir, el análisis efectivo del aprendizaje social, utilizando la combinación de dos herramientas como GraphFES y LMS. El GraphFES es un servicio web para la extracción de datos del foro en Moodle, generando un archivo con el formato específico para ser procesado en Gephi, a partir del cual se realiza el análisis. En el segundo se investigó el modo en que herramientas como SNapp, Vela, GISMO y GraphFES pueden aplicarse al análisis de cursos, mediante el análisis de datos provenientes de foros, wikis, videos, entre otros recursos. Se evalúan las fortalezas y deficiencias de las herramientas, cada una abordando problemas específicos como analítica de aprendizaje, seguimiento del progreso de estudiantes y detección de estudiantes en riesgo.

Las técnicas de analítica de aprendizaje también se han incorporado en el análisis de foros de discusión, como es en el caso de [13], donde mediante el uso de foros en MOOC se busca evaluar la importancia del uso de análisis de aprendizaje visual para mejorar la interacción en ecosistemas de aprendizaje, evaluando las alertas tempranas o la participación baja que se presente en los patrones. Por otro lado, en otra investigación correspondiente a las redes etnográficas en la comunidad Tehuelche del Chaliá [14] se evidencia el resultado de una red heterogénea, puesto que se muestran las relaciones entre actores de dos unidades domésticas A y B, teniendo en cuenta relaciones por lazos de sangre, compadrazgo o cooperación económica o laboral.

Otros estudios de redes sociales [9], [14]–[18] muestran un consenso similar, como el análisis de estudios etnográficos, el análisis de las redes de amistades entre personas, la red de internet y la construcción de saberes en la web. Por lo tanto, los datos obtenidos en el estudio a través del análisis de las métricas son de gran interés, dado que existen varios cursos impartidos en universidades que son asistidos con plataformas virtuales y que podrían apoyarse en las métricas aplicadas en la investigación para determinar si las características evidenciadas en este tipo de redes constituyen un regla general de dichos cursos, precisando la existencia de una correlación entre el desempeño académico y la estructura de la red.

Para el caso específico de esta investigación, encontramos dos artículos [19], [20] en los que se presentan dos casos de estudio con un enfoque para usar sistemas de discusión en línea para introducción a la programación, con el fin de motivar a los estudiantes a apoyarse entre sí, aumentando las comunicaciones colaborativas del curso. El primer caso de estudio fue un éxito porque se encontraron elementos importantes para la colaboración en línea y apoyo entre estudiantes del curso. En el segundo caso se fomenta la colaboración mediante el trabajo en grupo y el análisis de la similitud de códigos realizados por cada estudiante, el análisis sobre similitud fue de carácter cuantitativo, pero el análisis de redes sociales se realizó para determinar si la creación de grupos y las interacciones establecidas por los estudiantes influían en la similitud.

## 4. Análisis y discusión de resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la ejecución de la metodología expuesta en el ítem anterior, evidenciando los análisis generados a partir de las métricas construidas de manera visual, a través de grafos, y las inferencias a las que se llegó con la información analizada. Según [8], las métricas seleccionadas para el análisis brindan información útil que puede llevar a

un docente a tomar decisiones importantes sobre cómo abordar ciertos temas del curso o cómo dinamizar una clase, entre otras cosas. Algunas de las actividades establecidas para la participación en la plataforma son obligatorias y otras voluntarias, y se desarrollan en casa de manera individual. Las calificaciones están sujetas a un rango establecido de 0 a 5.

Se creó el espacio en Piazza con el fin de aumentar la comunicación colaborativa dentro del curso, además de mostrar la relación entre la construcción de vínculos sociales de los actores y el desempeño académico, determinado si existe correlación entre las calificaciones del curso y las métricas establecidas para el análisis. La participación en los foros se registra como tuplas (lista de elementos de forma ordenada), que contienen información como autor, hora, fecha, quiénes respondieron, entre otros y de ellas se pueden obtener medidas de red social globales, individuales (grado de vértice y centralidad) e intermedias. Dentro de dichas medidas está el grado del vértice que corresponde al número de conexiones que un individuo tiene y que pueden ser direccionadas, el intercambio de ideas y conocimientos de manera grupal a través de las comunidades y la fuerza de los vínculos, que es una combinación de tiempo, intensidad emocional, confianza mutua y servicios recíprocos [8].

Para el curso de Programación de computadores llevado a cabo en el periodo académico 2019-1, se encontró en la colección de usuarios de la base de datos un total de 35 participantes, entre estudiantes y docentes, de los cuales se obtuvieron 43 interacciones entre los mismos, como se muestra en el grafo de la figura 2. Esto se traduce en el análisis a 35 vértices y 43 arcos de la red, dando como resultado que solo el 31 % de los vértices se encuentran relacionados mediante arcos o conexiones, es decir que han interactuado en algún foro, ya sea como editor o creador de preguntas o respuestas.

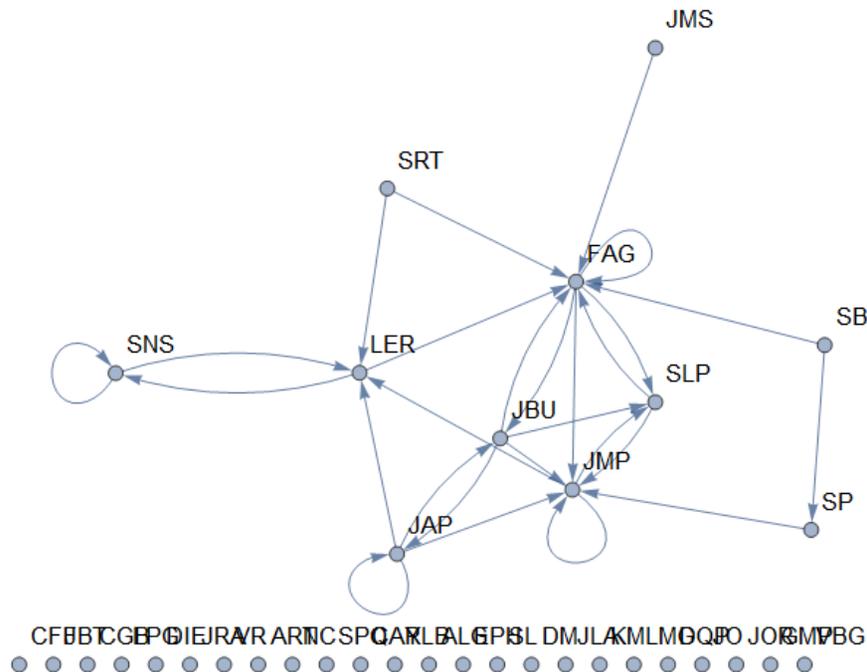


Figura 2. Grafo Curso Programación 1





**Tabla I.** Centralidad de intermediación curso 1: Programación de computadores cohorte 2019-1

Identificación vértice	Nombre vértice (estudiante/docente/ asistente de docencia)	Centralidad de intermediación	Nota final
34	FAG	28,5	NA
11	LER	17,5	NA
33	JMP	15,5	4,3
24	JBU	10	5
9	SLP	3	4,4
18	SP	1,5	1,4

**Tabla II.** Centralidad de intermediación curso 2: Programación de computadores cohorte 2019-2

Identificación vértice	Nombre vértice (estudiante/docente/ asistente de docencia)	Centralidad de intermediación	Nota final
36	AC	218,929	NA
33	JGM	100,143	3
15	JOG	62,2857	4,8
23	DG	56,4524	4,7
17	OGG	40	4,6
22	CCG	18,5	5

gramación de computadores, cohorte 2019-1, Universidad Nacional) se obtienen siete vértices, de los cuales dos son el docente principal y el asistente de docencia (ver tabla I). Para el curso 2 (Programación de computadores, cohorte 2019-2, Universidad Nacional) se obtienen 12 vértices, incluyendo el docente principal y el asistente de docencia (ver tabla II). Para el curso 3 (Programación de computadores, cohorte 2020-1, Universidad Cesmag) se obtienen seis vértices con un nodo correspondiente al docente principal (ver tabla III).

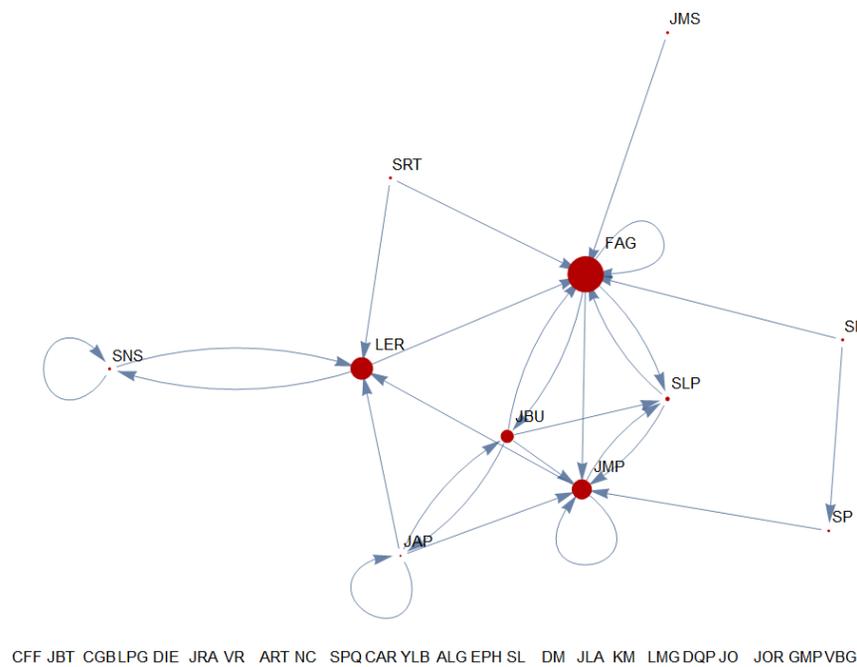
A cada nodo obtenido se anonimiza su nombre y se establece con un nombre representativo mediante las iniciales de sus nombres y apellidos. Se le adiciona la nota final, para observar la correlación entre la centralidad de intermediación y la nota final del curso. En el caso de los nodos docente la nota es NA para no sesgar los resultados.

Realizando la comparación de la centralidad de intermediación y las calificaciones obtenidas, no se evidencia una relación directa entre ellas, puesto que se presenta bastante heterogeneidad. Se encuentran nodos que han obtenido notas menores a 4.0, por ejemplo, el nodo JGM con nota de 3.0 y con el mayor grado de intermediación para el curso 2 y SP con nota de 1.4 en el curso 1. Se debe recordar que para medir la centralidad de intermediación se tienen en cuenta los nodos que sirven como puente para conectar extremos aislados dentro de un grafo, más no los nodos con mayor número de interacciones en la red. Sin embargo, se continúa analizando las métricas para determinar si en conjunto con las demás existe alguna relación con el desempeño académico.

**Tabla III.** Centralidad de intermediación curso 3: Programación de computadores cohorte 2020-1

Identificación vértice	Nombre vértice (estudiante/docente/ asistente de docencia)	Centralidad de intermediación	Nota final
39	GLY	1109,67	NA
22	CD	80,66	4,1
33	GBO	13,83	4,1
28	JC	2,83	4,3
26	DMM	1,5	4,6
1	JS	0,5	3,6

También se muestra gráficamente el resultado de la centralidad de intermediación de los tres cursos, cohorte 2019-1 en la figura 5, cohorte 2019-2 en la figura 6 y cohorte 2020-1 en la figura 7, en estas se pueden apreciar los puntos rojos correspondientes a los vértices que poseen mayor poder de intermediación. En el caso del curso 1, se presenta el docente identificado con el vértice 34, puesto que cuenta con la centralidad de intermediación mayor del grupo (28.5) observada en figura 5.



**Figura 5.** Grafo Centralidad intermedia Curso Programación 1

Para el curso 2 se presenta el asistente de docencia identificado con el vértice 36, puesto que cuenta con la centralidad de intermediación mayor del grupo (218.929) observada en figura 6.

Para el curso 3 se presenta al docente principal identificado con el vértice 39, puesto que cuenta con la centralidad de intermediación mayor del grupo (1109.67) observada en figura 7.



ver las inquietudes presentes en las actividades. Por otro lado, en el curso 2 quien posee el liderazgo es el asistente de docencia no el docente principal, ya que es quien ha permitido la conexión en los nodos de extremos de la red. No existen estudiantes predominantes o que realicen intervenciones que involucren a la mayoría de los estudiantes, por lo que se pueden considerar grupos que requieren siempre de la guía del docente principal o el asistente de docencia; tampoco se evidencia una relación directa entre la intermediación y el buen desempeño académico.

En caso de que se elimine el nodo con mayor grado de intermediación correspondiente al docente principal o asistente de docencia, se podría designar a los estudiantes con la segunda mayor centralidad de intermediación como monitores o asistentes del docente y, aunque la información fluiría a la mayor parte del grupo, no se garantizaría que llegue a todos, de hecho se evidencia la desconexión o desaparición de ciertos nodos que solo se conectaban con el docente; sin embargo, los nodos que han intervenido con otros nodos aparte del docente podrían reafirmar o incluso aumentar el nivel de centralidad de intermediación. Este comportamiento confirma que las topologías de estrella suelen tener implicaciones en la red cuando el *hub* o nodo conector tiene problemas, en realidad no es una red de fácil recuperación y los nodos que no tienen conexión adicional con otros nodos no centrales tienden a desaparecer o desconectarse totalmente; en lo que respecta al desempeño académico, la intermediación sin el nodo principal no se afecta y continúa sin tener una relación directa con las notas.

## 4.2. Métrica 2: grado de centralidad

Con el grado de centralidad se pueden identificar aquellos actores con mayor cantidad de interacciones en el grupo y que tienen influencia en el mismo. Para realizar el análisis se utilizaron diferentes funciones, entre ellas `Part` —una función que proporciona una parte indexada de una expresión—, `VertexList` —devuelve la lista de vértices o nodos—, `Ordering` —ordena la posición en la que todos los elementos de la lista aparecen—, `Greater` —señala desigualdad fuerte o estricta, utilizando aproximaciones numéricas para establecer un orden numérico.

Conjuntamente estas funciones confirman el algoritmo `&Part[VertexList[datos], Ordering [DegreeCentrality[datos], All, Greater]]` [22], que obtiene los vértices con su respectiva centralidad de grado en la red organizada de mayor a menor índice de centralidad, se excluyen los que no presentan este índice, ya que no aportan al análisis. Se muestran los resultados obtenidos para cada curso en las tablas **IV**, **V** y **VI**; como en la anterior métrica, se relaciona la nota definitiva obtenida por los estudiantes en el curso.

A continuación se muestra gráficamente la centralidad de grado de cada curso: para el curso 1 figura 8, para el curso 2 figura 9 y para el curso 3 figura 10, donde los puntos rojos con mayor tamaño corresponden a los vértices que poseen mayor cantidad de conexiones, cabe mencionar que los nodos que no tienen relación o no han tenido intervención dentro de la plataforma fueron eliminados para evitar ruido en los datos analizados.

En comparación con el grupo del curso 1, se puede inferir que los cursos 2 y 3 cuentan con gran número de vértices que participan con mayor frecuencia, a través de las diferentes formas de intervención existentes en la plataforma, mientras que el curso 1 tiene menos participación. En cuanto

**Tabla IV.** Grado de centralidad curso 1: Programación de computadores cohorte 2019-1

<b>Identificación vértice</b>	<b>Nombre vértice (estudiante)</b>	<b>Grado de centralidad</b>	<b>Nota final</b>
34	FAG	9	NA
33	JMP	7	4,3
24	JBU	6	5
11	LER	6	NA
9	SLP	5	4,4
25	JAP	4	4,8

**Tabla V.** Grado de centralidad curso 2: Programación de computadores cohorte 2019-2

<b>Identificación vértice</b>	<b>Nombre vértice (estudiante)</b>	<b>Grado de centralidad</b>	<b>Nota final</b>
36	AC	31	NA
17	OGG	12	4,6
4	JDV	11	NA
15	JOG	9	4,8
43	FAG	8	NA
33	JGM	8	3

**Tabla VI.** Grado de centralidad curso 3: Programación de computadores cohorte 2020-1

<b>Identificación vértice</b>	<b>Nombre vértice (estudiante)</b>	<b>Grado de centralidad</b>	<b>Nota final</b>
39	GLY	66	NA
22	CD	11	4,1
30	MCR	6	4,2
28	JC	6	4,3
26	DMM	6	4,6
23	JDB	6	2,4

al desempeño académico de los actores con mayor grado de centralidad en cada una de las redes, se evidencia para los tres cursos que los dos primeros actores obtienen notas superiores a 4. Para el curso 1 están: JMP y JBU con notas de 4,3 y 5, en el curso 2 están: OGG y JOG con notas de 4,6 y 4,8, y en el curso 3 están: CD y MCR con notas de 4,1 y 4,2 respectivamente.

Esta correlación entre centralidad y desempeño académico puede presentarse cuando un actor interviene más en el flujo de la información, puesto que puede enriquecer su experiencia y conocimiento al tener más oportunidad de resolver inquietudes, proponer alternativas de solución, sentirse influyente, mediático y participativo en el grupo, además de empoderarlo en su proceso de aprendizaje; como se evidencia en el estudio realizado por Antti Knutas [19], en el que se realizó un sistema de discusión para la colaboración comunicativa entre compañeros. Se concluye que las personas que consiguieron mayores interacciones en el sistema fueron los que tenían mayor probabilidad de obtener una calificación alta en el curso. Con el grado de centralidad se pueden

identificar aquellos actores con mayor cantidad de interacciones en el grupo y que tienen influencia en el mismo.

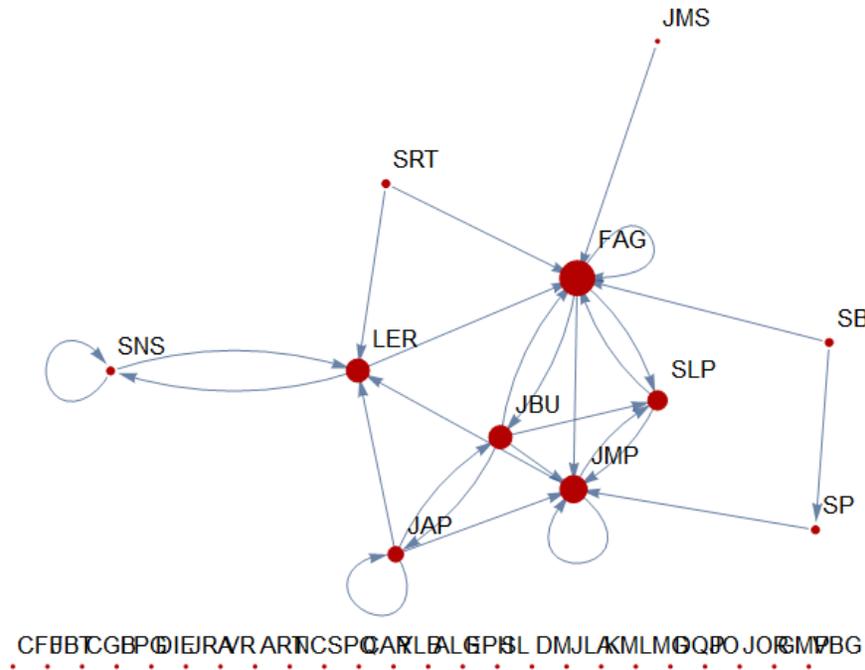


Figura 8. Grado de centralidad Curso 1

### 4.3. Métrica 3: estructura de comunidades o grupos

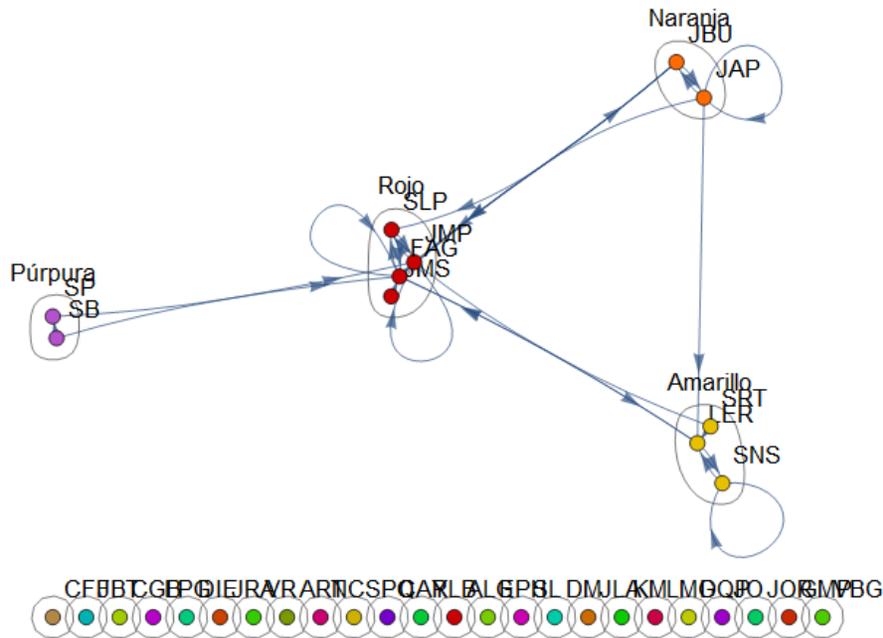
Se dice que una red tiene estructura de comunidades si los nodos de la red pueden ser fácilmente agrupados en nodos, la red se divide de forma natural en grupos de nodos densamente conectados internamente y con pocas conexiones entre estos. La definición general está basada en el principio de que un par de nodos tiene mayor probabilidad de estar conectado si ambos son miembros de la(s) misma(s) comunidad(es), y menor probabilidad de estar conectado si no comparten comunidades. En este caso se determinan las comunidades mediante una función en Mathematica, que realiza un agrupamiento según los nodos que han tenido mayores interacciones entre ellos.

La detección de comunidades tiene como objetivo la identificación de los módulos o grupos con alguna o varias propiedades en común, basándose únicamente en la información codificada en la topología del grafo [23]. Para este caso se utiliza la función CommunityGraphPlot[datos] y el método Modularity de la herramienta para el análisis de las redes seleccionadas. La función anteriormente mencionada, permite encontrar los agrupamientos naturales de cada curso y realizarlos en base a la modularidad de cada una de las comunidades. Estas son identificadas con bordes que unen vértices de la misma comunidad.

Para mejorar la visualización del análisis se identificó a cada grupo con una etiqueta de diferente color y se correlacionó con la nota promedio de la comunidad para sustentar la propiedad que interesaba asociar con la métrica correspondiente al desempeño académico.



que cuenta con tres vértices asociados, con “púrpura” y “naranja” que cuentan solo con dos vértices asociados cada uno. Los estudiantes que no realizaron ninguna interacción no se encuentran incluidos en ningún grupo.



**Figura 11.** Grafo Grupos o comunidades Curso 1

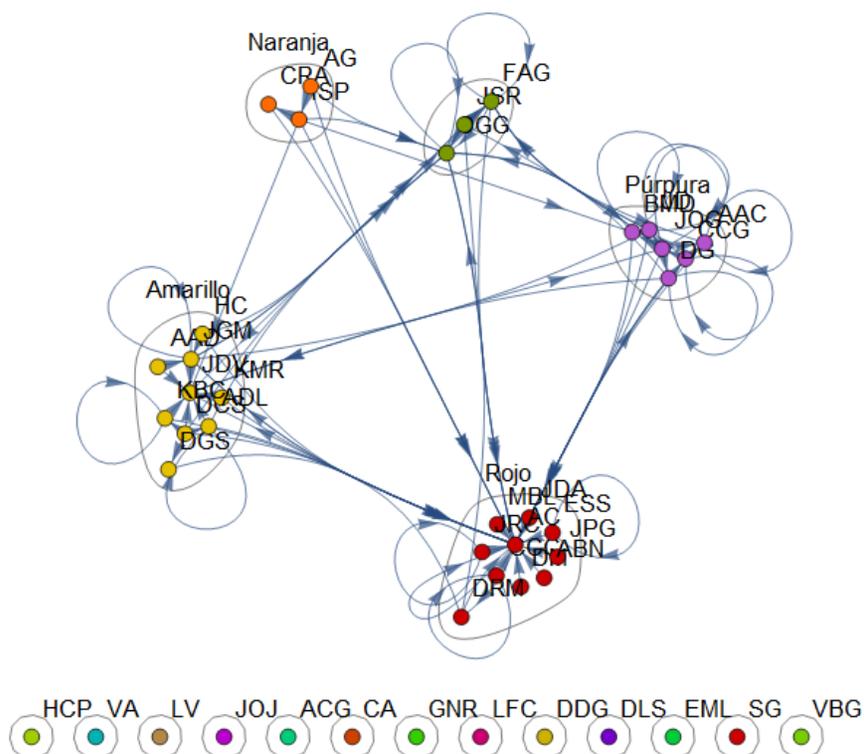
Para cada una de las comunidades asociadas, se realiza un promedio correspondiente a los integrantes de cada grupo, esto con el fin de contrastar la información con los actores que se encuentran dentro de las comunidades y la influencia que tienen. Se tienen en cuenta las métricas anteriores para determinar si en las comunidades obtenidas se encuentran los nodos con mayor grado de centralidad e intermediación, con el fin de determinar si esto influye en el desempeño académico de los actores que conforman cada comunidad.

Los vértices correspondientes a la comunidad “rojo” son quienes han tenido intervenciones o conexiones directamente con el nodo con mayor grado de centralidad e intermediación en las métricas antes descritas, los estudiantes pertenecientes a esta comunidad cuentan con un buen promedio (4,5), poseen cuatro nodos conformando la agrupación. La comunidad “naranja” tiene el mejor promedio de toda la red (4,9) y solo posee dos nodos, estos nodos, aunque tienen homogeneidad en la calificación y grado de centralidad, son totalmente heterogéneos.

Para las comunidades “amarilla” y “púrpura” la relación con las notas obtenidas para ambos casos en el promedio de calificación es de 3,6 y 3,2 respectivamente, además se encuentran notas bastante heterogéneas en estas comunidades. Por lo tanto, se podría concluir que cada comunidad establecida tiene una relación indirecta con el desempeño académico para el caso de este curso, aunque si es importante resaltar que la comunidad “rojo”, conformada por estudiantes y el docente principal, cuenta con notas en el rango de 4,3 a 4,9. Al ser pocos nodos cuentan con una relación más estrecha y bidireccional con el docente.

En general, se podría determinar que el curso cuenta con pocos estudiantes con buen desempeño, pero el desempeño académico global no es sobresaliente, esto se puede evidenciar en la poca participación de los estudiantes en el curso.

Curso 2: Programación de computadores 2019-2. Como se aprecia en la figura 12, existen cinco comunidades establecidas, las cuales han sido identificadas como: “rojo” que cuenta con diez vértices asociados, “amarillo” que cuenta con nueve vértices asociados, “púrpura” que cuenta con seis vértices asociados, “naranja” que cuenta con tres vértices asociados y “verde” que cuenta con tres vértices asociados, en esa última incluido el docente del curso. Los estudiantes que no realizaron ninguna interacción no se encuentran incluidos en ningún grupo.



**Figura 12.** Grafo Grupos o comunidades Curso 2

Los vértices correspondientes al grupo “verde”, en el que se encuentra el docente, obtuvieron notas en promedio de 4,5 y corresponden al grupo más pequeño conformado por solo tres nodos.

El grupo “naranja” obtuvo notas en promedio de 3,9 también con tres nodos. En el grupo “rojo” obtuvieron notas aleatorias, pero ninguno perdió el curso, en este grupo se encuentra incluido el asistente de docencia.

En el grupo “amarillo” el 40 % del grupo perdió el curso, aunque el promedio obtenido fue de 3,2. Y finalmente, en el grupo “púrpura” un 83 % tiene notas superiores a 4,7, convirtiéndose en el grupo con mejor rendimiento académico, según el promedio obtenido por las calificaciones de los actores que conforman cada comunidad.

Curso 3: Programación de computadores 2020-1. Como se aprecia en la figura 13, existen cuatro comunidades establecidas, las cuales han sido identificadas como “rojo” con la mayor cantidad de nodos para un total de 24, “amarillo” que cuenta con siete vértices asociados, “púrpura” que cuenta con seis vértices asociados y “naranja” que cuenta con dos vértices asociados.

Los vértices correspondientes al grupo “rojo”, en el que se encuentra el docente, obtuvieron notas heterogéneas, puesto que se encuentran en el rango de 1,8 a 5; también se debe considerar que el grupo cuenta con un promedio de 4,1 y que corresponde a la comunidad más grande, con 62 % de actores de la red; además, se puede inferir que esta comunidad tiene un desempeño académico sobresaliente, lo que puede mejorar no solo la dinámica del curso sino incentivar a la mejora en el desempeño académico en general al ser mayoría.

La comunidad “amarillo” cuenta con siete nodos con un promedio de 3,9, en los cuales se encuentra el nodo 18 correspondiente al estudiante DGN, quien obtuvo el mejor desempeño académico al obtener 5 como nota definitiva del curso y mayor nota en esta comunidad, cabe resaltar que el estudiante realizó varias intervenciones en la plataforma virtual. Se podría inferir que el estudiante cuenta con participación y posee liderazgo dentro del grupo, dado que en el transcurso de la carrera ha sido la representante estudiantil del semestre.

Para la comunidad “naranja” se cuenta con solo dos nodos con un promedio de 3,7, es importante resaltar que en esta comunidad se encuentra el nodo 28 correspondiente al estudiante JC, quien cuenta con una participación aceptable dentro de la plataforma, además de destacar que cuenta con un desempeño académico de 4,3, en este caso para los estudiantes mencionados se encuentra correlación entre el desempeño académico y su participación, así como también su liderazgo en la plataforma.

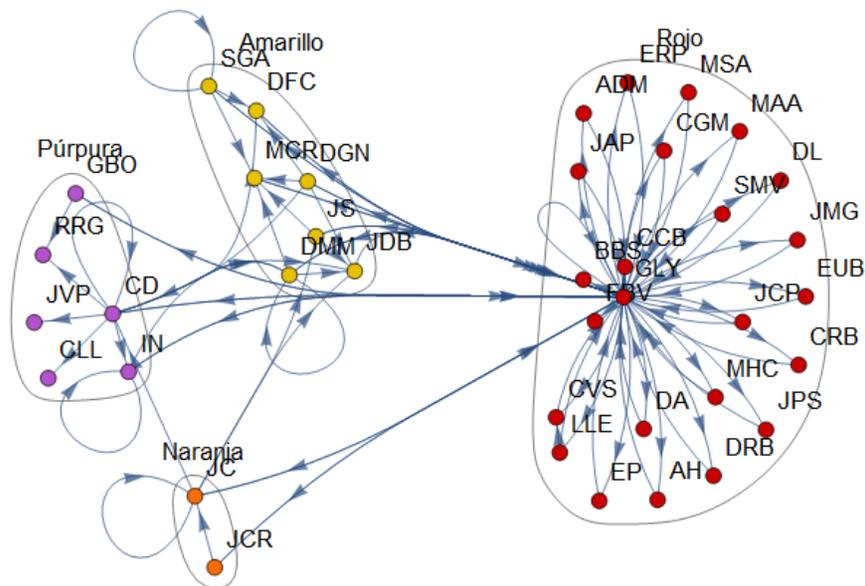


Figura 13. Grafo Grupos o comunidades Curso 3

Por último, para la comunidad “púrpura” se cuenta con seis nodos con un promedio de 4,4, el cual sería el mayor promedio de todas las comunidades. En esta comunidad se encuentra el nodo 22 correspondiente al estudiante CD, quien no obtiene el mejor desempeño académico de la comunidad, pero presenta el mayor número de intervenciones dentro de la red. Se puede afirmar que el estudiante cuenta con credibilidad, participación y podría sin lugar a duda apoyar al docente en caso de que no pudiera estar, además, es necesario mencionar que el estudiante fue representante estudiantil del programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Cesmag.

Es importante mencionar que en este caso práctico cada uno de los nodos que componen la red se considera un actor interdependiente con características propias y que esa interdependencia podría determinar el tipo de relaciones que establece con los demás actores de la red [24]. Cada nodo o actor está voluntariamente relacionado con otros al establecer algún tipo de interacción. Cada relación existente entre los actores representa no solo la interacción entre los estudiantes en el aula o en la plataforma, sino que determina los caminos por donde puede fluir la información del curso, o la transferencia del conocimiento y las experiencias individuales, lo que contribuye a que el vínculo pueda trascender de una relación casual en el aula a una relación duradera fuera de ella.

De acuerdo con [8], se deben resaltar las habilidades sociales, de comunicación y de influencia del docente del curso, así como la capacidad de adaptación del curso frente a los diferentes tipos de estudiantes, puesto que en los cursos analizados en este estudio es evidente que el docente es considerado el actor principal de la red; sin embargo, pueden presentarse otros actores con mayor influencia. Por ejemplo, el análisis de grado de centralidad de intermediación para la red del curso 2 permitió determinar que no siempre el docente es el principal mediador, sino que también pueden presentarse otro tipo de actores como intermediarios del grupo, en este caso se determina que es independiente el rol establecido dentro de la red. Esto sugiere que otros actores como el docente asistente o estudiantes pueden tener una importante influencia en la dinámica en el curso, al ser poseedores del liderazgo e influir en los flujos de comunicación.

En consecuencia, la aplicación de estas métricas podría ayudar a desentrañar características específicas en otras redes académicas, ya que a través de la herramienta Mathematica se han obtenido grafos cuyo análisis permite discernir la presencia del rol docente, así como también actores activos y pasivos dentro de la red. Lo que deja en claro que, aunque puedan tener características comunes como rangos de edad, intereses en programación o formación en lógica matemática, presentan como grupo características heterogéneas, como el hecho de que haya estudiantes populares, activos y con gran interés en participar y estudiantes tímidos, pasivos o con poco interés en relacionarse o participar, quizás de pocas habilidades sociales o de comunicación. Teniendo en cuenta esto, es importante incluir el factor del desempeño académico, en el que se observa que en algunos casos los estudiantes que tienen buen desempeño académico también cuentan con alta centralidad de intermediación y grado de centralidad, es decir son estudiantes activos que cuentan con liderazgo e influencia dentro del grupo y control en los flujos de comunicación.

Por otro lado, no se puede inferir con total certeza que las interacciones provocan una relación de amistad entre dos o más actores, o como se conoce normalmente como una relación afectiva interpersonal común entre personas. Si es un primer paso de acercamiento que puede aumentar la probabilidad de que eso suceda y se establezca una relación determinada; se debe tener una

riqueza de escenarios adicionales en los que se nos permitiera comparar o analizar dichos vínculos, esto podría hacer parte del trabajo futuro. Así como también se podría realizar un análisis de los aspectos más específicos de los estudiantes pasivos para determinar cuáles agentes de motivación común pueden influir, como estilos de aprendizaje o intereses, objetivos, expectativas del curso e incluso rasgos de personalidad común, para de esta manera incluir diferentes ideas en la planeación del contenido del curso que capturen el interés de todos los estudiantes, mejorando el desempeño académico y tratando de conseguir homogeneidad en el mismo.

## 5. Validez de la información

Hay muchos factores que influyen en la validez de la información recolectada y extraída de la plataforma, como por ejemplo las estadísticas básicas suministradas que solo contaban con información referente a los usuarios con mayor participación en los foros de trabajo, a través de una gráfica de líneas o área; adicionalmente se presentaron inconvenientes para procesar la interacción entre nodos con el código alfanumérico generado por la plataforma, por tal motivo en el programa desarrollado en Python se estableció generar un identificador numérico para cada usuario y posteriormente usarlo para representar las interacciones de los usuarios. De esta manera fue posible procesar el archivo en Mathematica. La información fue validada por cada uno de los autores, con el fin de verificar los datos generados por la plataforma.

## 6. Conclusiones

En vista de que existen muchas redes en la naturaleza y es necesario aplicar un método de evaluación para las mismas, se presenta el análisis de redes sociales (ARS), que permite realizar un estudio de la estructura social de una red a través de un método cuantitativo. Este caracteriza fenómenos sociales, a partir de las relaciones establecidas entre las entidades sociales identificadas como personas, grupos u organizaciones. Para ello se cuenta con un conjunto de herramientas, métricas y características que facilitan el ARS en diferentes terrenos como la salud, la georreferenciación, las redes sociales y la educación, como es este caso. Estas herramientas y este tipo de análisis deben tenerse en cuenta para definir qué métricas son las adecuadas para el estudio y qué herramientas y funciones se utilizarán.

En este caso práctico, mediante el análisis de métricas y patrones de interacción, se presentó un cambio entre los cursos de programación analizados, ya que en el primero no se evidencia gran participación por parte de los estudiantes y, por lo tanto, el vértice central es el docente del curso. Para el segundo curso se evidencia mayor participación por parte de los estudiantes, se observa que el vértice central es el docente asistente. La comunidad con mayor cantidad de participantes es la del docente asistente. Y finalmente, para el tercer curso se evidencia una total participación por parte de los estudiantes, unos con más participaciones que otros, pero con gran influencia de estudiantes del curso que presentan centralidad de intermediación y centralidad de grado alta, después del docente, que para este caso es el vértice principal de la red.

Las métricas establecidas para evaluar las redes sociales obtenidas de la plataforma Piazza permiten a los docentes determinar la participación e interacción entre los estudiantes, mediante la

publicación de notas, foros de discusión y cuestionarios en la plataforma, identificando diferentes patrones de interacción como quiénes son los estudiantes que poseen el liderazgo en el grupo, quiénes revisten de influencia dentro del mismo, lazos débiles o fuertes que puedan presentarse entre estudiantes y esto con el fin de determinar la presencia de grupos o comunidades dentro del aula, así como también determinar si la construcción de estos vínculos sociales se encuentra relacionada con el desempeño académico de los estudiantes. En la métrica 1 se pudo establecer que no hay correlación entre las calificaciones obtenidas y la centralidad de intermediación, pero sí se presentó relación entre los actores que realizaron mayor número de intervenciones en la red y la calificación obtenida, así como también estos actores son el centro de la comunidad (métrica 2 y 3).

Cabe resaltar que en el presente estudio se realizó un especial énfasis en el análisis de cada uno de los nodos que conforman las comunidades, para establecer si los estudiantes con mayor participación dentro de la plataforma influían de alguna manera dentro de los grupos. Para corroborar esta información, se obtuvo el promedio de calificación por comunidad y se verificó la nota del estudiante influyente, determinando que en algunos casos el participante tenía mayor intervención dentro de la comunidad y presentaba una influencia positiva en el desempeño del grupo.

Comparando los estudios de caso se puede afirmar que los foros de discusión fomentan la participación de los estudiantes, pero aún no hay seguridad en apoyar a los compañeros que tienen una consulta dentro de la plataforma, lo que puede presentarse por temor a equivocarse o por el simple hecho de no participar de la actividad. Para trabajos futuros es necesario establecer incentivos para la participación y la generación de discusión en los foros académicos.

Por otro lado, como trabajo futuro es posible analizar la probabilidad de que se establezca una relación de amistad a partir de las interacciones de dos o más nodos de una red, puesto que es necesario incorporar información de otros escenarios que permitan la comparación de los vínculos. De la misma manera, se podrían analizar más a fondo los resultados obtenidos con las redes heterogéneas, aplicando a redes más grandes que cuenten con mayor cantidad de nodos y relaciones entre los mismos, como también la aplicación de otras métricas como clasificación por *clustering*, centralidad de proximidad, autoridad, participación, entre otras.

## Referencias

- [1] Piazza, “Ask. Answer. Explore. Whenever”. <http://www.piazza.com> ↑2
- [2] C. Lozares, “La teoría de redes sociales”, *Rev. Socio.*, vol. 48, pp. 103-124, 1996. <http://dx.doi.org/10.5565/rev/papers/v48n0.1814> ↑2
- [3] P. Jafari, E. Mohamed, S. Lee, and S. Abourizk, “Social network analysis of change management processes for communication assessment”, *Autom. Constr.*, vol. 118, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103292> ↑2
- [4] S. Wasserman, and K. Faust, *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815478> ↑2
- [5] N. Akhtar, “Social network analysis tools”, *2014 Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, pp. 388-392, 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/CSNT.2014.83> ↑2
- [6] R. Avello Martínez, “Las fuentes de información y su evaluación”, *Comunicar. Escuela de Autores*. <https://doi.org/10.3916/escuela-de-autores-068> ↑4

- [7] T. Jia, X. Zhao, Z. Wang, D. Gong, and G. Ding, "Model Transformation and data migration from relational database to MongoDB", *2016 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)*, pp. 60-67, 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress.2016.16> ↑6
- [8] A. Kuz, M. Falco, y R. Giandini, "Análisis de redes sociales: un caso práctico", *Comput. Sist.*, vol. 20, no. 1, pp. 89-106, 2016. <https://doi.org/10.13053/cys-20-1-2321> ↑6, 9, 10, 23
- [9] J. F. Franco-Bermúdez y W. L. Ruiz-Castañeda, "Análisis de redes sociales para un sistema de innovación generado a partir de un modelo de simulación basado en agentes", *TecnoLógicas*, vol. 22, no. 44, 2019. <https://doi.org/10.22430/22565337.1183> ↑7, 9
- [10] A. Balderas, J. M. Dodero, M. Palomo, and I. Ruiz, "A domain specific language for online learning competence assessments", *Inter. J. Eng. Edu.*, vol. 31, no. extra 3, pp. 851-862, 2015. ↑7
- [11] M. Á. Conde-González y Á. Hernández-García, "Bridging the gap between LMS and Social network learning analytics in online learning", *J. Inf. Technol. Res.*, vol. 9, no. 4, pp. 1-15, 2016, <https://doi.org/10.4018/JITR.2016100101> ↑7
- [12] L. M. Oliva Córdova, H. R. Amado-Salvatierra, and K. O. Villalba Condori, "An experience making use of learning analytics techniques in discussion forums to improve the interaction in learning ecosystems", P. Zaphiris, and A. Ioannou (eds.), *Learning and Collaboration Technologies. Designing Learning Experiences*, pp. 64-76, Springer, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21814-0> ↑7
- [13] M. Á. Conde-González, Á. Hernández-García, F. García-Peñalvo, and M. L. Sein-Echaluce, "Exploring student interactions: Learning analytics tools for student tracking", P. Zaphiris, and A. Ioannou (eds.), *Learning and Collaboration Technologies*, pp. 50-61, Springer, 2015. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20609-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20609-7_6) ↑9
- [14] J. Miceli y S. Guerrero, "Redes libres de escala y su uso en el análisis de datos etnográficos: el caso de la comunidad tehuelche del Chaliá", *1ª Congreso Latinoamericano de Antropología*, 2005. ↑9
- [15] D. Mora Langa, *Estudio topológico de redes sociales en foros virtuales* (proyecto de grado), Universidad pública en Madrid, España, 2016. <https://oa.upm.es/44524/> ↑9
- [16] L. A. Navarro Sánchez y J. P. Salazar Fernández, "Análisis de redes sociales aplicado a redes de investigación en ciencia y tecnología", *Sínt. Tecnológica*, vol. 3, no. 2, pp. 69-86. <https://doi.org/10.4206/sint.tecnol.2007.v3n2-03> ↑9
- [17] E. Villegas Iriarte, "Construcción de saberes en la web social: estado de la cuestión", *Prax. Saber*, vol. 7, no. 15, pp. 183-205, 2016. <https://doi.org/10.19053/22160159.v7.n15.2016.5729> ↑9
- [18] F. J. Moreno, and S. Hernández, "An algorithm for identifying the best current friend in a social network", *Ing. e Investig.*, vol. 35, no. 2, pp. 80-88, 2015. <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v35n2.50339> ↑9
- [19] A. Knutas, J. Ikonen, U. Nikula, and J. Porras, "Increasing collaborative communications in a programming course with gamification: A case study", *CompSysTech '14: Proceedings of the 15th International Conference on Computer Systems and Technologies*, pp. 370-377, 2014. <https://doi.org/10.1145/2659532.2659620> ↑9, 17
- [20] B. Barros, R. Conejo, A. Ruiz-Sepulveda, and F. Triguero-Ruiz, "I explain, you collaborate, he cheats: An empirical study with social network analysis of study groups in a computer programming subject", *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 19, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11199328> ↑9
- [21] M. Aldana, "Redes complejas: estructura, dinámica y evolución", *fdocuments.es*, 2011. <https://fdocuments.es/document/redes-complejas-estructura-dinamica-y-evolucion.html> ↑11
- [22] L. C. Freeman, "Centrality in social networks conceptual clarification", *Soc. Netw.*, vol. 1, no. 3, pp. 215-239. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7) ↑12, 16
- [23] E. Ortiz Muñoz y Y. Hidalgo Delgado, "Detección de comunidades a partir de redes de coautoría en grafos RDF", *Rev. Cuba. Inf. Cienc. Salud*, vol. 27, no. 1, pp. 90-99, 2016. ↑18
- [24] W. Kuang Lai, Y. Uan Chen, and T.-Y. Wu, "Analysis and evaluation of random-based message propagation models on the social networks" *Computer Networks*, vol. 170, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.107047> ↑23

---

### **Ginna Viviana Leytón Yela**

Ingeniera de Sistemas de la Universidad Cesmag, Especialista en Gestión de Proyectos en Telecomunicaciones de la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano, candidata a Magíster en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, estudiante de Doctorado en Ingeniería con énfasis en Ciencias de la Computación de la Universidad del Valle.

Correo electrónico: [ginna.leyton@correounivalle.edu.co](mailto:ginna.leyton@correounivalle.edu.co)

---

### **Astrid Johana Valencia Mosquera**

Ingeniera de Sistemas con énfasis en Ingeniería del Software de la Universidad del Cauca, Especialista en Proyectos Informáticos de la Universidad Distrital.

Correo electrónico: [astrid.valencia@correounivalle.edu.co](mailto:astrid.valencia@correounivalle.edu.co)

---

### **Víctor Andrés Bucheli Guerrero**

Ingeniero de Sistemas, Magíster en Ciencias de la Computación y Doctor en Ingeniería. Profesor asociado de la Universidad del Valle y director del grupo de inteligencia artificial (GUIA) de la misma universidad.

Correo electrónico: [victor.buchelli@coreounivalle.edu.co](mailto:victor.buchelli@coreounivalle.edu.co)

## Research

# Experimental Assessment of the Emissions Characteristics of Low-Displacement Diesel Engines Operating with Biodiesel Blends from Algae Oil

*Análisis experimental de las características de emisión de motores diésel de baja cilindrada operando con mezclas de biodiésel de aceite de alga*

**Daniel Maestre-Cambronel**<sup>1</sup>, **Sofia Orjuela-Abril**<sup>2</sup>, **Jorge Duarte-Forero**<sup>ID\*1</sup>

<sup>1</sup>KAI Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Universidad del Atlántico, Puerto Colombia, Colombia., <sup>2</sup>Departamento de Administración de Empresas, Grupo de Investigación Gerencia y Escenarios para el Desarrollo, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

\*Correspondence E-mail: jorgeduarte@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido: 02/02/2021. Modificado: 25/11/2021. Aceptado: 09/12/2021.

## Abstract

**Context:** The imminent concern regarding greenhouse gas emissions associated with internal combustion engines has motivated both the industrial and academic sectors to propose reliable solutions in order to mitigate the adverse effects of thermal machines. Partial fuel substitution with biodiesel blends is a promising, convenient, and diverse technology that can contribute to minimizing emission levels.

**Method:** This study incorporated an experimental test bench for a low-displacement diesel engine that enabled control of the operating conditions in order to evaluate thermal performance, fuel metrics, and emission levels. An algae oil biodiesel blend at replacement percentages of 5 % (AB5) and 15 % (AB15) was produced via a transesterification technique. The performance evaluation was centered on the impact of the variable compression ratio and torque ranges of the engine.

**Results:** The implementation of algae oil as a biodiesel blend reduced the emission levels of CO, CO<sub>2</sub>, and HC by 40-95 % compared to diesel standalone operation. In contrast, it boosted NO<sub>x</sub> emissions in a reasonable proportion (<45 %). Further emission minimization of CO and HC could be reached by increasing the compression ratio, but CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions were negatively affected. Moreover, increasing the compression ratio intensified the combustion pressure while improving both fuel consumption and thermal performance. Contrarily, a higher algae oil content in the biodiesel blend reduced the in-cylinder pressure, thus increasing the fuel consumption and reducing the thermal performance.

**Conclusions:** In conclusion, biodiesel implementation demonstrated to be a robust tool to mitigate the global emissions of the engine to a great extent. The negative results regarding thermal performance and fuel consumption are a consequence of the higher density and lower heating value. However, this can be partially offset by increasing the compression ratio of the engine. The exploration of hydrogen and hydroxy is strongly recommended to contribute to enhancing the overall performance of partial fuel substitution technologies.

**Keywords:** fuel consumption, thermal performance, biodiesel blend, diesel engine, emission levels, partial fuel substitution

**Language:** English

## Open access



Cite as: D. Maestre, S. Orjuela, and J. Duarte. "Experimental assessment of the emissions characteristics of low-displacement diesel engines operating with biodiesel blends from algae oil". *Ing.*, vol. 27, no. 2, 2022. e17539.

<https://doi.org/10.14483/23448393.17539>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

### Resumen

**Contexto:** La inminente preocupación en torno a la emisión de gases de efecto invernadero asociada a los motores de combustión interna ha motivado a la industria y la academia a proponer soluciones confiables para mitigar los efectos adversos de las máquinas térmicas. La sustitución parcial de combustible es una diversa, conveniente y prometedora tecnología que puede contribuir a minimizar los niveles de emisión.

**Método:** El estudio incorporó un montaje para pruebas experimentales de un motor diésel de baja cilindrada que permite controlar las condiciones de operación para evaluar el desempeño térmico, de consumo de combustible y de niveles de emisión. Se produjo una mezcla biodiésel de aceite de alga a un porcentaje de sustitución del 5 % (AB5) y 15 % (AB15) a través de una técnica de transesterificación. La evaluación de desempeño se centró en el impacto de la relación de compresión variable y el margen de torque del motor.

**Resultados:** La implementación del aceite de alga como mezcla biodiésel redujo los niveles de emisión del CO, CO<sub>2</sub> y HC en un 40-95 % en comparación con la operación autónoma de diésel comercial. En contraste, se incrementaron las emisiones de NO<sub>x</sub> en una proporción razonable (<45 %). Se pudo obtener una minimización adicional de las emisiones de CO y HC al incrementar la relación de compresión, pero las emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> fueron negativamente afectadas. Adicionalmente, al aumentar la relación de compresión se incrementó la presión durante la combustión, lo cual mejoró el consumo de combustible y el desempeño térmico. Contrariamente, un mayor contenido de aceite de alga en la mezcla biodiésel redujo la presión dentro del cilindro, lo que aumentó el consumo de combustible y redujo el desempeño térmico.

**Conclusiones:** En conclusión, la implementación de biodiésel demostró ser una herramienta robusta para mitigar en gran medida las emisiones globales del motor. Los resultados negativos en cuanto a desempeño térmico y consumo de combustible son consecuencia de la alta densidad y la menor capacidad calorífica. Sin embargo, esto puede ser parcialmente contrarrestado al incrementar la relación de compresión del motor. La exploración del hidrógeno e hydroxy es alta recomendada para contribuir a mejorar el desempeño global de las tecnologías de sustitución parcial de combustible.

**Palabras clave:** consumo de combustible, desempeño térmico, mezcla biodiésel, motor diésel, niveles de emisión, sustitución parcial de combustible

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

Fossil fuels have been essential for socio-economic development worldwide due to their central role in the energy, mobility, industrial, and agricultural sectors. The massive utilization of oil and gas derivatives has led to the dramatic exploitation of non-renewable resources, which represents a significant environmental problem that sets an intensified pressure on the energy crisis [1], [2]. However, the main concern of both governmental and international organizations is centered on the unprecedented rate of greenhouse emissions derived from conventional energy practices [3], [4]. Particularly, Internal Combustion Engines (ICEs) represent almost 65 % of global CO<sub>2</sub> emissions, given that they are extensively implemented in transportation and energy production [5]–[7]. Therefore, both the industrial and academic sectors have focused on the exploration of alternative fuels that contribute to minimizing the global warming potential of ICEs [8].

Particularly, due to its various advantages, biodiesel is one of the most promising alternatives for partial-fuel substitution technology in compression-ignited ICEs [9], [10]. First, it features similar physicochemical characteristics to commercial diesel, exhibiting clever perspectives on combustion performance [8]. Moreover, it can be incorporated into the engine without requiring any modification below fuel replacement grades of 20 % (B20) [11].

Lastly, it represents a cost-effective alternative, given that the production process is significantly less complex, prolongs engine life, and reduces lubrication cost. It is also biodegradable, which is a direct advantage from an environmental perspective [12]. Hence, different countries foster the massive penetration of biodiesel technology through the implementation of national policies [13].

Biofuels can be produced via mechanical and chemical techniques. Particularly, the chemical process of transesterification is massively implemented due to its relative simplicity [14]. Another vital factor in the production of biofuels is feedstock selection since it constitutes nearly 75 % of the production cost [15]. More than 350 oil-bearing crops have been identified as potential raw materials, while the availability is mainly determined by the location [8]. In this sense, the main raw materials can be classified as animal fats and vegetable oils [16]. Specifically, there is an inclined preference for vegetable oils, which is due to vast variety, reduced costs, and fast growth. Said oils can be classified as edible and non-edible. For instance, palm oil is an edible oil that has been extensively implemented in dual-fuel technologies [17], [18] studied the combustion and emissions characteristics of a light-duty diesel engine operating with palm oil biodiesel. The results indicated that the presence of this biodiesel blend significantly reduces CO emissions (between 20 and 50 %), but NO<sub>x</sub> emissions rise at a lower proportion (5-10 %) depending on the load condition. Similarly, [19] reported that palm oil biodiesel enables a reduction of HC emissions and smoke opacity by 38 and 19 %, respectively. Despite the wide variety of applications with edible-based blends, their imminent impact on the food industry hinders their massive implementation. Hence, non-edible vegetable oils stand as a convenient alternative for biodiesel production. In particular, algae biodiesel blends emerge as a prospective candidate based on the rapid growth, high content of lipids, diversification of cultivated habitats, and outstanding productivity, which reinforce the potential to meet the global fuel demand [20].

Accordingly, [21] evaluated the prospective application of algae oil blends for partial fuel substitution. The results showed that the physicochemical properties feature a concrete similarity to commercial diesel in terms of density, viscosity, flashpoint, calorific value, cetane number, and oxidation stability. [22] studied the influence of partial fuel replacement with biodiesel blends from microalgae oil (*Cryptocodinium cohnii*) on the overall performance and emissions levels of a diesel engine. The study addressed biodiesel replacement grades of 10, 20, and 50 %, whereas the operating margin examined the influence on engine speed. The results indicated that both NO and NO<sub>x</sub> emissions could be reduced by up to 22 %. In contrast, this produced a slight reduction in the thermal performance of the engine. Despite the intensive assessments on dual-fuel operation in diesel engines in the last two decades, the evaluation of the overall operating margin relies on the torque and engine speed, whereas the influence of variable pressure ratios is rarely characterized. Specifically, the impact of the aforementioned parameters on fuel consumption metrics, thermal performance, and emissions control could reveal vital information for biodiesel implementation. Moreover, the implementation of microalgae oil from the species *Spirulina platensis*, in biodiesel

operation of ICEs appeared to be a recent trend which has not drawn much attention from researchers [23].

The main contribution of this research is that it presents an experimental analysis of the overall performance of a low-displacement diesel engine operating with a biodiesel blend from algae oil of the species *Spirulina platensis*. The constructed test bench allows controlling the engine speed (3.500 rpm), torque (1-7 Nm), and fuel mode operation with a biodiesel replacement grade from 5 to 15 %. In addition, the study incorporates the impact of variable pressure ratio (17 and 19) on fuel consumption, thermal behavior, and emissions characteristics, which emerge as a differential factor from former studies. Therefore, this work contributes to gaining a deeper understanding of partial fuel substitution on diesel engines with variable operating ranges while closing the knowledge gap regarding *Spirulina platensis* biodiesel implementation. The paper is structured as follows: the next section describes the main features of the experimental setup, fuel characteristics, and instrumentation specifications. Section 3 outlines both thermal and fuel consumption metrics. Then, Section 4 displays the main results of this research, and, finally, Section 5 provides concluding remarks.

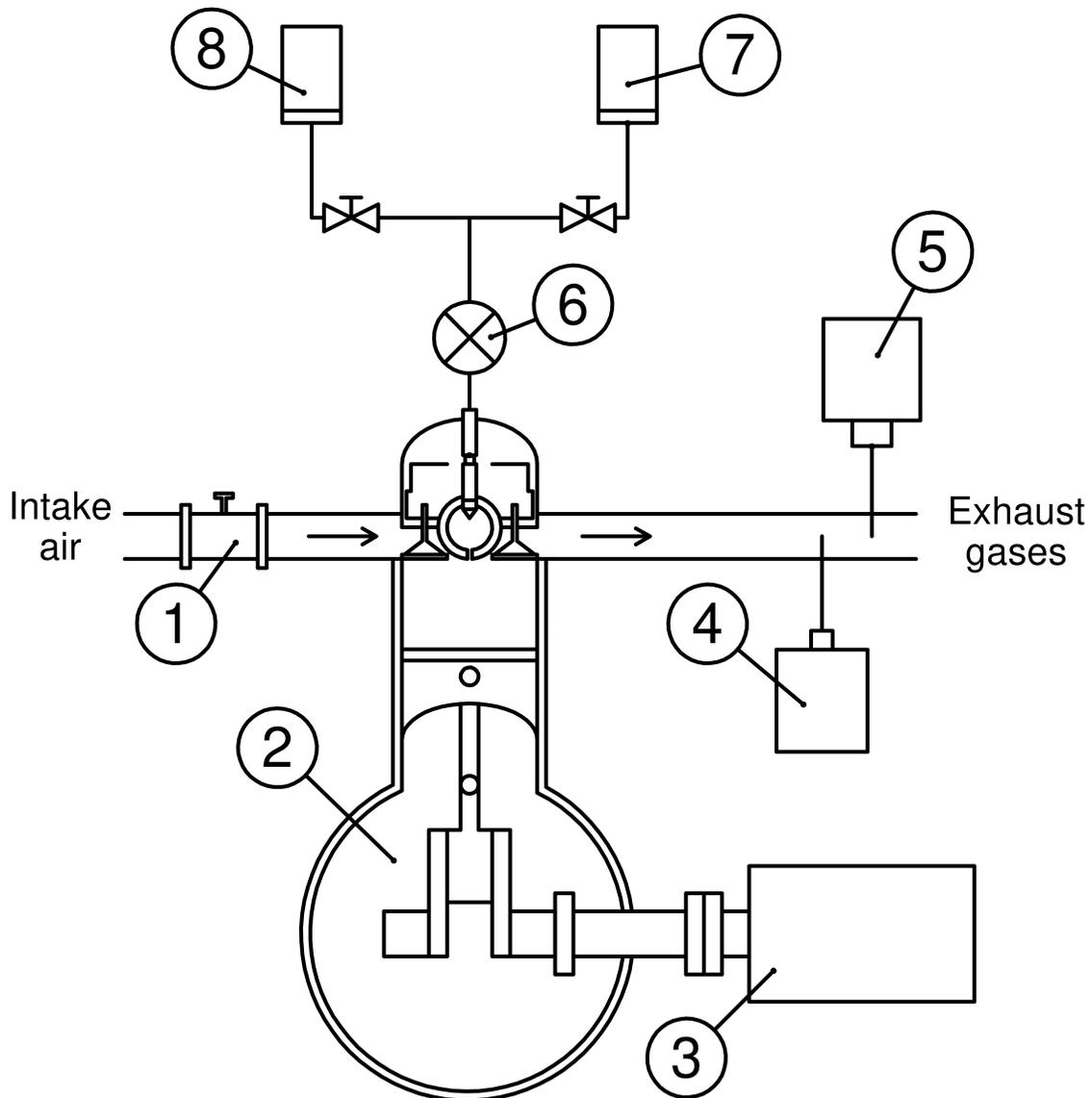
## 2. Experimental setup

Experimental testing was conducted in an in-house test bench for a single-cylinder diesel engine whose specifications are listed in Table I. Fig. 1 displays the main components of the experimental test bench, while Fig. 2 is a real representation of the engine's module.

Table I. Engine specifications

Engine type	Single cylinder
Model	SK-MDF300
Manufacturer	SOKAN
Bore	78 mm
Stroke	62,57 mm
Cycle	4 Strokes
Maximum power	3,43 kW at 3.600 rpm
Injection	Direct injection
Intake systema	Naturally
Displacement	299 mL

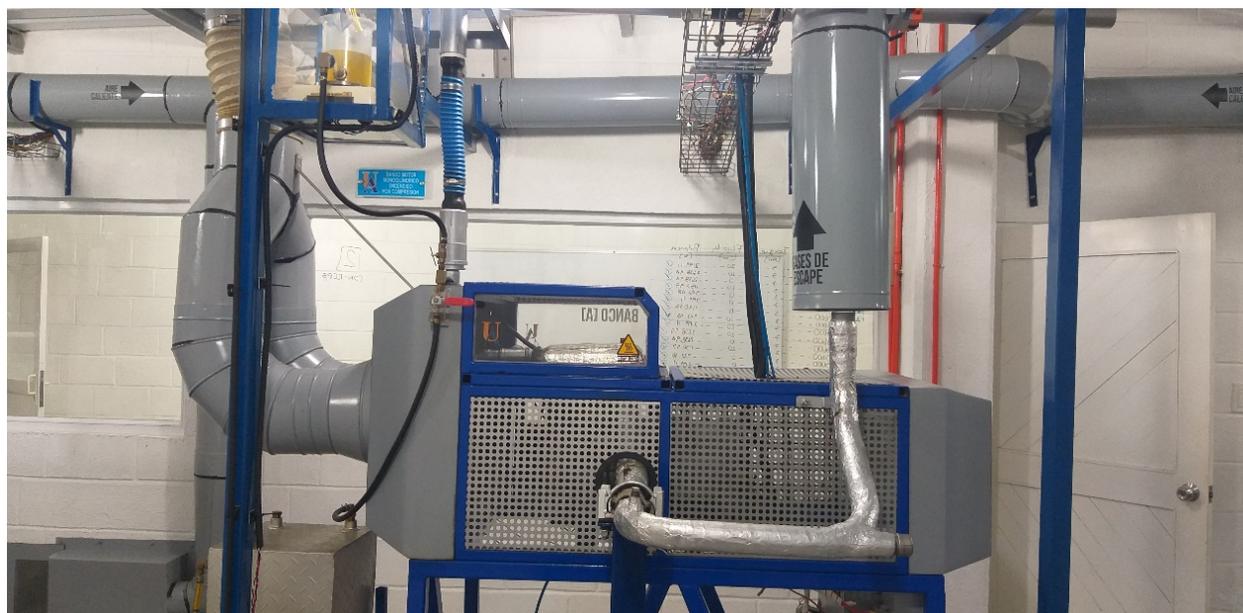
The operating conditions of the engine accounted for torque conditions from 1 to 7 Nm with a constant rotation speed of 3.500 rpm. Additionally, two different compression ratios (CR) were incorporated in the analysis, namely 17:1 (CR 17) and 19:1 (CR 19). Notice that the compression ratio is changed by replacing the piston series, which has a direct impact on the clearance volume. Table II summarizes the test conditions.



**Figure 1.** Schematics of the test bench: 1) air flow meter, 2) diesel engine, 3) dynamometer, 4) Bacharach PCA® 400, 5) BrainBee AGS-688, 6) Fuel meter, 7) diesel tank, 8) biodiesel tank

**Table II.** Conditions tested with the experimental bench

Test condition	Compression ratio	Torque [Nm]
1		1
2	17	3
3		5
4		7
5		1
6	19	3
7		5
8		7



**Figure 2.** Experimental engine test bench

To control the load condition of the engine, a dynamometer was coupled to the experimental test bench. The emission analysis of the exhaust stream was performed using two gas analyzers, Brain-Bee AGS-688 and Bacharach PCA 400, in order to account for the pollution levels of CO, CO<sub>2</sub>, HC, and NO<sub>x</sub>. Table IV shows the specifications of the emission measurement instruments.

**Table III.** Tested fuels and nomenclature

Nomenclature	Composition
Diesel	Diesel 100 %
AB5	Diesel 95 % + Algae oil biodiesel 5 %
AB15	Diesel 85 % + Algae oil biodiesel 15 %

**Table IV.** Gas analyzer specifications

Measured emission	Measuring range	Resolution
CO <sub>2</sub>	0÷19,99 vol %	0,1 % vol
CO	0÷9,99 vol %	0,01 % vol
HC	0÷19,999 [ppm]	1 % vol
NO <sub>x</sub>	0÷3.000 [ppm]	1 ppm

The total uncertainties of the measurements of the experimental bench were calculated according to the Kline and McClintock method [24]. The results are summarized in Table V.

As for the biodiesel blend, algae oil produced from cyanobacteria (*Spirulina platensis*) was employed in the study. Transesterification was performed for the extraction of the algae oil by using zinc oxide and methanol. A three-necked flask was used to mix the compounds. The first stage of

**Table V.** Uncertainty list of main measurements

Measurement	Uncertainty (%)
Fuel flow meter	±0,3
Pressure transducer	±0,25
Crank angle encoder	±0,2
Time	±0,35
Engine torque	±0,2
Engine speed	±0,05
BSFC	±0,4
BTE	±0,5
CO <sub>2</sub>	±0,1
CO	±0,1
HC	±0,25
Nox	±0,2

the process involved heating 50 mL of the mixture for 20 minutes. Then, the zinc oxide catalyst and methanol were added. The blend was maintained at a stirring speed of 550 rpm and a constant temperature of 65 °C for 60 minutes. Consequently, the biofuel layer was extracted with a separation funnel, which was washed in distilled water and dried in an oven at a temperature of 105 °C for 130 minutes.

The percentage of algae oil biodiesel substitution remained below 20 %, as previous research indicates that a higher percentage can cause engine problems that require modifications [11]. Therefore, two algae oil biodiesel blends were defined: AB5 and AB15. The composition of the fuels used in the study is shown in Table III. Notice that commercial diesel fuel was used as the baseline for the dual-fuel evaluation.

### 3. Thermal and fuel consumption metrics

This section provides a framework to evaluate the overall performance of the engine in dual-fuel operation mode according to thermodynamic features and fuel consumption. First, it is important to relate how much chemical energy (fuel) is converted into power. This is done by means of the brake thermal efficiency (BTE), which is calculated based on the first law of thermodynamics, as presented in Eq. (1).

$$BTE = 3,77 \times 10^{-4} \cdot \frac{T_q \cdot r}{\dot{m}_{fuel} \cdot LHV} \cdot 100 \% \quad (1)$$

where  $T_q$  represents the brake torque of the engine in Nm, and  $r$  relates the rotational speed of the engine in rpm.  $\dot{m}_{fuel}$  relates the mass flow rate of the fuel consumed, and LHV is the low heating value of the tested fuel.

The main fuel consumption metric of the experimental assessment corresponds to the brake-specific fuel consumption (BSFC), which relates the brake power of the engine ( $P_{br}$ ) with the

consumed fuel, as shown in Eq. (2).

$$BSFC = \frac{\dot{m}_{fuel}}{P_{br}} \quad (2)$$

## 4. Results

### 4.1. Calculation of fuel properties

The first approximation of the study corresponds to the calculation of the main physicochemical properties of the tested fuels, as presented in Table VI. Notice that these properties were calculated according to ASTM standards [25].

**Table VI.** Test fuel composition and nomenclature

Fuel	Units	ASTM D4868	ASTM D1448	ASTM D93
		Calorific value [MJ/kg]	Density [kg/cm <sup>3</sup> ]	Flashpo int [°C]
Diesel	°C	42	0,826	67
AB5	MJ/kg	41,47	0,829	69
AB15	g/cm <sup>3</sup>	39,98	0,833	72

Based on the results, it can be confirmed that biodiesel blends of algae oil feature lower calorific values in comparison with the baseline fuel. Particularly for the AB5 and AB15 blends, reductions of 1,26 and 3,59 % were obtained, respectively, compared to the standard diesel. This reduction will be examined in detail when discussing the thermal performance, since it might indicate a minimization of the energy discharged during combustion.

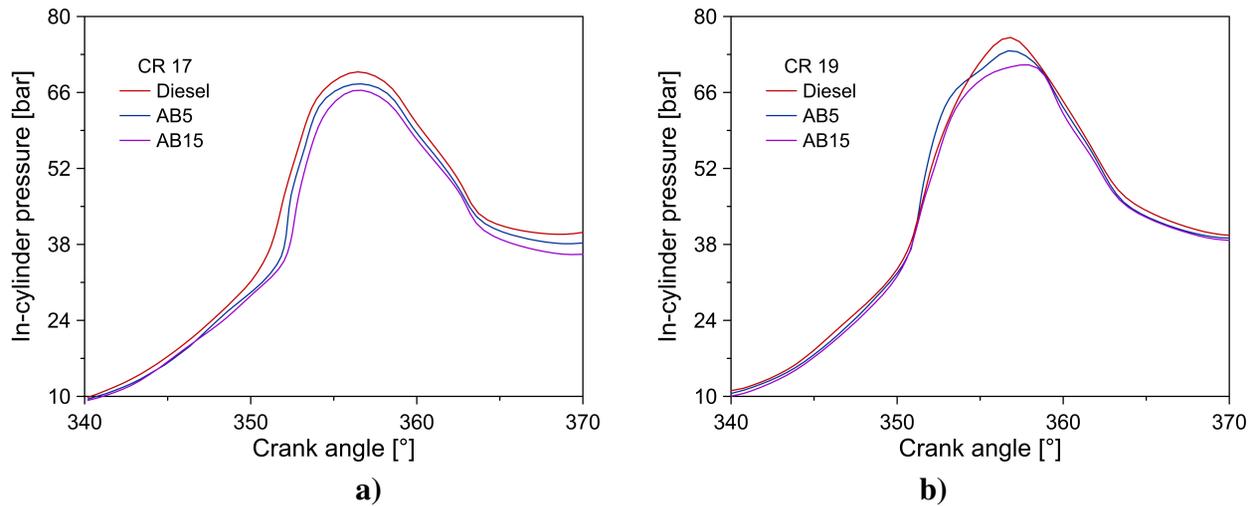
On the other hand, both the density and flashpoint of the biodiesel blends were significantly higher compared to pure diesel. Specifically, for the AB5 and AB15 blends, the density rose around 0,3-0,48 %, whereas the flash-point increased between 2-4,3 %. The latter indicates a positive pattern for implementing biodiesel blends since the manipulation of the fuel becomes much safer [8].

### 4.2. Cylinder pressure

Measuring the in-cylinder pressure throughout the cycle plays a central role in engine diagnosis, given that it provides valuable information about the combustion phenomena. Accordingly, Fig. 3 shows the pressure curve as a function of the crank angle for the tested fuels with compression ratios of 17:1 (CR 17) and 19:1 (CR 19).

According to Fig. 3, higher compression ratios boost the maximum cylinder pressure for all the tested fuels. In general, the peak pressure was achieved by pure diesel for both compression conditions, followed by the biodiesel blend with lower content of algae oil (AB5). The latter demonstrates that the incorporation of algae oil as a replacement fuel minimizes the pressure in the combustion chamber, reaching a maximum decrease of 6,83 %. Therefore, increasing the compression ratio of the engine can be considered to be a reliable mechanism to mitigate the pressure drop produced by

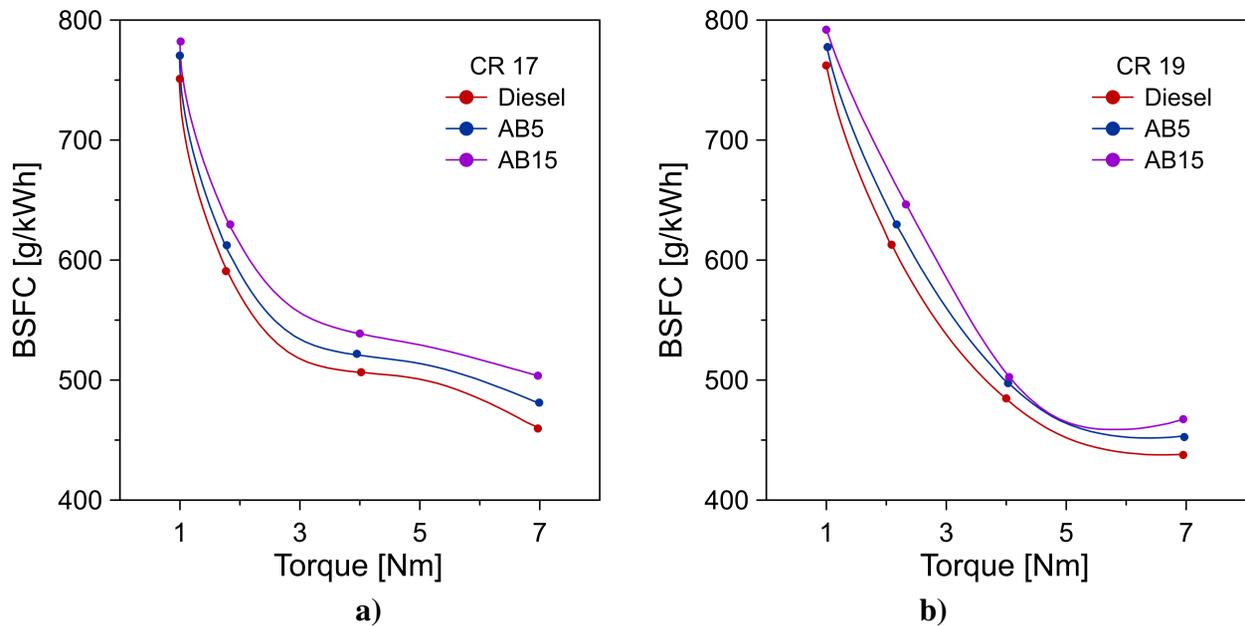
implementing algae oil as a biodiesel blend. The results agree with the overall trend of different biodiesel blends while analyzing the same parameter [10], [24].



**Figure 3.** Cylinder pressure for an engine compression ratio of (a) CR 17 and (b) CR 19

### 4.3. Brake-specific fuel consumption (BSFC)

Fig. 4 shows the BSFC for the different fuels tested across the operating margin while analyzing the influence of the compression ratio.



**Figure 4.** BSFC for an engine compression ratio of (a) CR 17 and (b) CR 19

Fig. 4 demonstrates that increasing the content of algae oil (*Spirulina platensis*) in the biodiesel blend intensifies the fuel consumption per power unit. On average, AB5 and AB15 fuels enlarge the BSFC by 3,07 % and 5,93 %, respectively, in comparison with diesel. This behavior can be attributed to the higher density of the biodiesel blend, as shown in Table IV. In line with the above, a higher density implies an increase in the fuel injected into the combustion chamber. The lower heating value of the biodiesel blends in comparison with commercial diesel can be regarded as a contributor to the intensification of the BSFC. Different studies have ratified this pattern with different biodiesel blends [8], [24]. On the other hand, a higher compression ratio minimizes the BSFC of all the tested fuels, especially at medium-high torque ranges. The latter is a consequence of higher combustion pressure, which contributes to increasing the power output of the engine [10], [24].

#### 4.4. Brake thermal efficiency

The incidence of the implementation of biodiesel blends and variable compression ratios on the brake thermal efficiency (BTE) is depicted in Fig. 5.

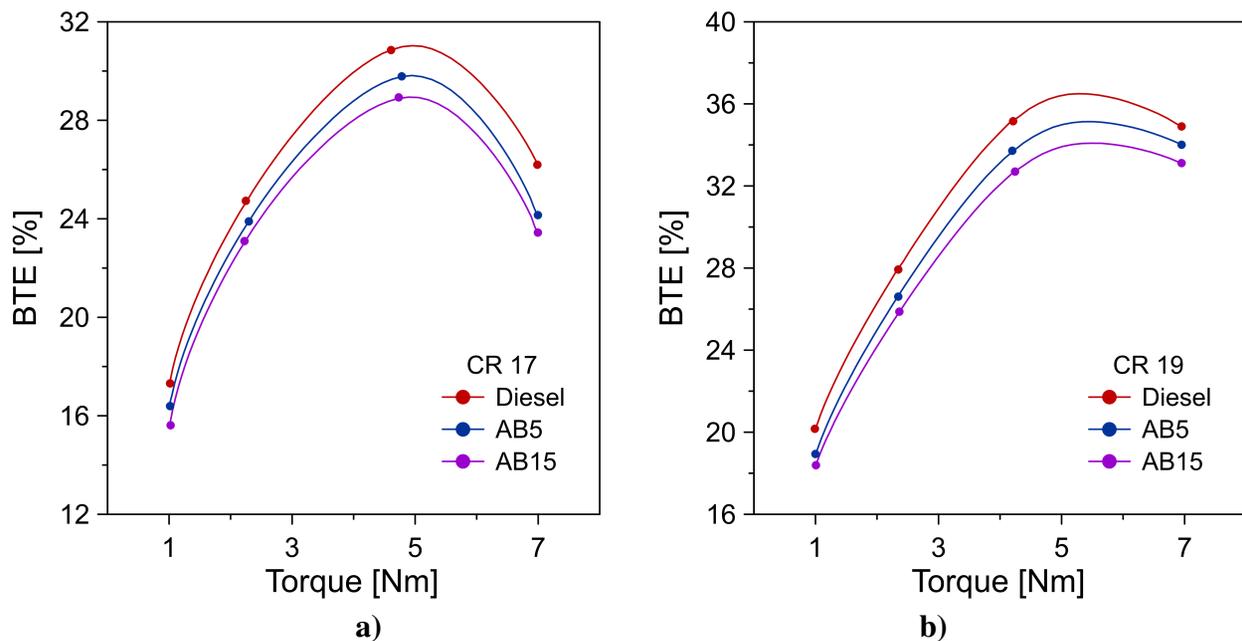


Figure 5. Brake thermal efficiency for an engine compression ratio of (a) CR 17 and (b) CR 19

According to the results, the main pattern is that the BTE has a bell-shaped curve with a maximum value for the middle range (5 Nm) of the torque. Diesel standalone operation features the highest BTE among the tested fuels, followed by the AB5 biodiesel blend, which ratifies the overall trend obtained from the cylinder pressure and fuel metrics.

Moreover, increasing the compression ratio enhances the thermal performance by up to 13 %, which might be an indication that higher pressure ranges ensure a better mixing process in the combustion chamber. Specifically, increasing the algae oil in the biodiesel blend from 5 to 15 % reduced the BTE by around 2-5 %. This behavior can be explained by the higher density and lo-

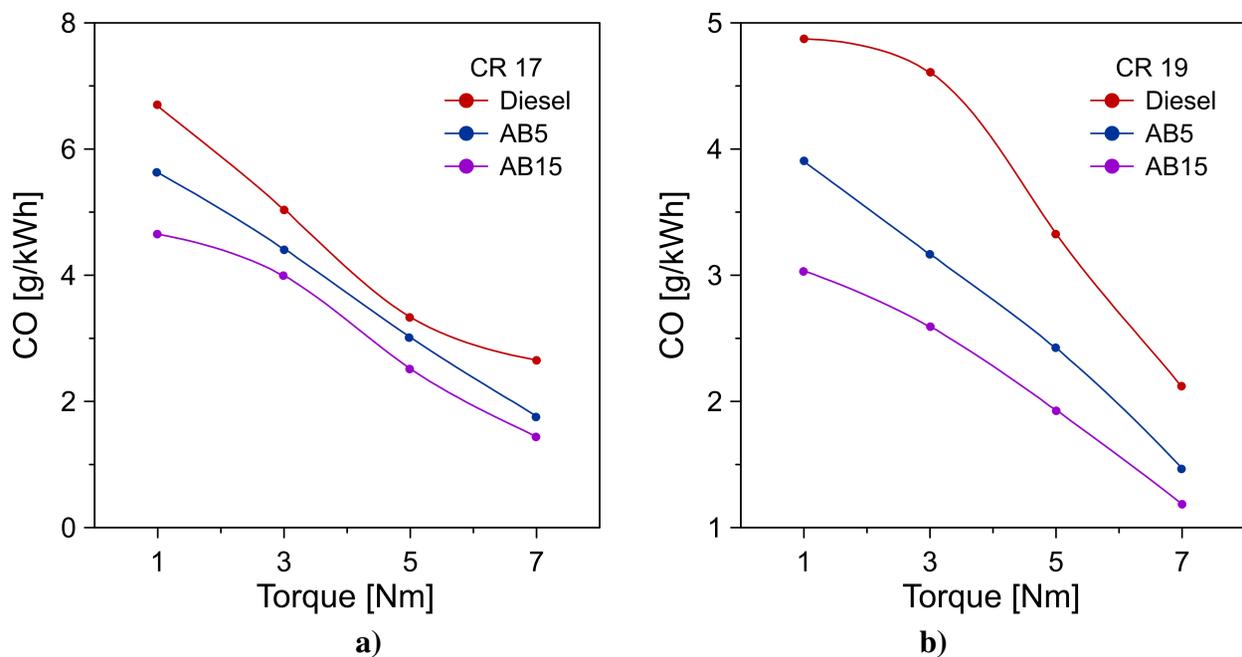
wer calorific value compared to pure diesel (see Table VI). The next section provides a detailed examination of the emissions characteristics of the tested fuels at different operating conditions.

## 4.5. Emissions results

### 4.5.1. CO emissions

The first approximation to the pollution evaluation corresponds to the carbon monoxide (CO) emission levels by the biodiesel blends of algae oil under different operating conditions. Please note that commercial diesel has been used as the baseline for comparison. It is worth mentioning that CO formation is a consequence of partial oxidation of the fuel during combustion, which is governed by factors such as fuel type, in-cylinder pressure, fuel-air mixture, among others.

Fig. 6 shows that the incorporation of the biodiesel blend of algae oil produces a significant drop in CO emissions (between 15 and 30 % compared to pure diesel). This behavior can be attributed to the improved oxygen content in the fuel, which fosters complete combustion [17]. In general, lower load rates promote the emissions of CO, which may be a consequence of poor air-fuel mixture when the engine operates at low torque. An inappropriate temperature for combustion at low rates can also be mentioned as a possible reason for poor oxidation (formation of CO) [23].



**Figure 6.** Carbon monoxide emissions for an engine compression ratio of (a) CR 17 and (b) CR 19

In terms of the biodiesel blend, increasing the algae oil fuel replacement from 5 to 15 % reduces the CO levels between 5 and 10 %, which demonstrates the positive features of the dual-fuel operating model in diesel engines.

This is a direct result of a higher oxygen content and a high cetane number, which results in shorter ignition delays. Lastly, increasing the compression ratio has a substantial impact on the emission

levels, since it minimizes CO levels between 10 and 25 %, which can be attributed to the shorter ignition delay produced by the increased heat discharged during combustion. The aforementioned explanations for CO formation agree with related research works [12], [24].

#### 4.5.2. CO<sub>2</sub> emissions

Fig. 7 shows the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions for the tested fuels along the operating margin. CO<sub>2</sub> formation is mostly associated with the CO levels, given that it is related to the oxidation process during combustion.

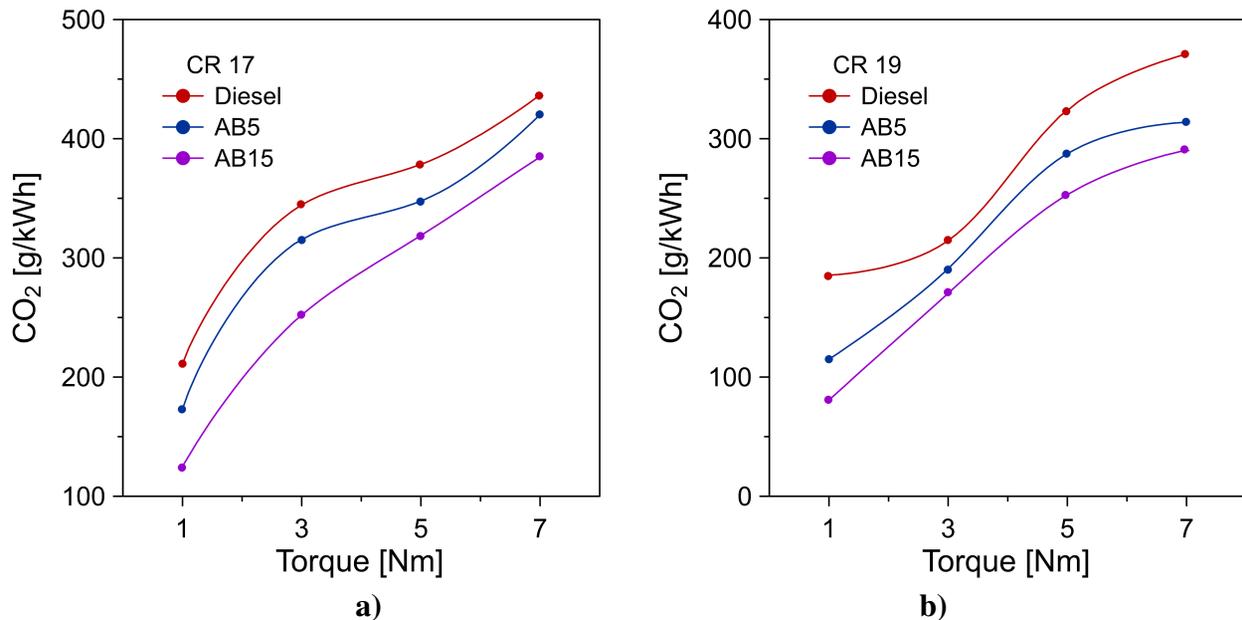
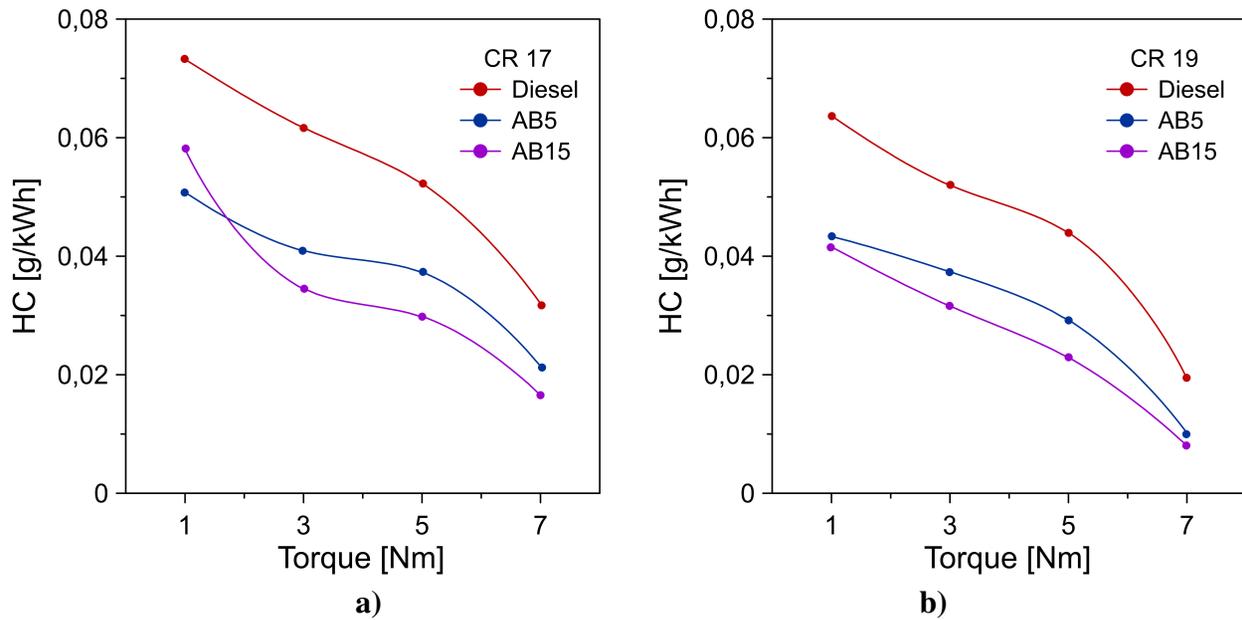


Figure 7. Carbon dioxide emissions for an engine compression ratio of (a) CR 17 and (b) CR 19

Based on the results, the overall behavior of the CO<sub>2</sub> formation displays a direct relation with the torque, which is in agreement with the CO emissions presented in the previous subsection. This pattern is an indication of complete combustion as the engine load increases, which may be related to higher temperatures at high torque levels and faster ignition. This type of behavior has been reported in other biodiesel blends [10], [18]. Once again, the standalone diesel operation features the highest emission levels (190-440 g/kWh), whereas increasing the algae oil content in the biodiesel blend promotes CO<sub>2</sub> minimization (89-360 g/kWh). Specifically, both biodiesel blends, AB5 and AB15, reduced the CO<sub>2</sub> levels between 9 and 24 % compared to commercial diesel. Lastly, a higher compression ratio plays a central role in reducing CO<sub>2</sub> emission levels, which can be attributed to improved combustion performance.

#### 4.5.3. HC emissions

Fig. 8 shows the hydrocarbon (HC) emissions for the tested fuels as a function of the operating torque. It should be pointed out that HC, just as CO, is produced during combustion, as a consequence of the partial oxidation of the air-fuel mixture.



**Figure 8.** Hydrocarbon emissions for an engine compression ratio of (a) CR 17 and (b) CR 19

Fig. 8 shows that increasing both the torque and the compression ratio produces a substantial reduction of the HC emissions. Accordingly, the highest HC emission levels occurred in association with the lowest torque, which is attributed to the incomplete combustion under these operating conditions. Surprisingly, in the case of CR 17, the HC emission levels of AB15 were higher than the AB5 blend at the lowest torque condition (1 Nm). However, as the torque increased, the AB15 surpassed the decreasing trend.

On average, the algae oil biodiesel blends AB5 and AB15 reduced HC emissions by 31 and 45 %, respectively, in comparison with commercial diesel. This pattern can be attributed to the higher oxygen content in the biodiesel blends. Notice that increasing the algae oil content in the biodiesel blend contributes to lowering the HC levels. This behavior is supported by the results of other non-edible biodiesel blends based on the presence of methyl ester and the unsaturation of the structure of biodiesel. The contribution of a higher cetane number can be outlined as a possible explanation for HC reduction by the biodiesel blends, since it contributes to shortening the ignition delay.

#### 4.5.4. NO<sub>x</sub> emissions

The formation of nitrogen oxides greatly depends on the temperature experienced during combustion (>1.000 °C), which creates an auspicious environment for reactions between oxygen and nitrogen [17]. The term NO<sub>x</sub> refers mainly to two major components, NO and NO<sub>2</sub>. Fig. 9 displays the results of the NO<sub>x</sub> emissions levels.

According to Fig. 9, the implementation of biodiesel blends of algae oil negatively impacts the minimization of NO<sub>x</sub> emissions. This behavior is explained by the enriched-oxygen nature of the biodiesel blends, which fosters nitrogen oxide formation [23]. Particularly, an increase of 13 and 38 % was observed for AB5 and AB15, respectively, in comparison with pure diesel. Similarly, high-

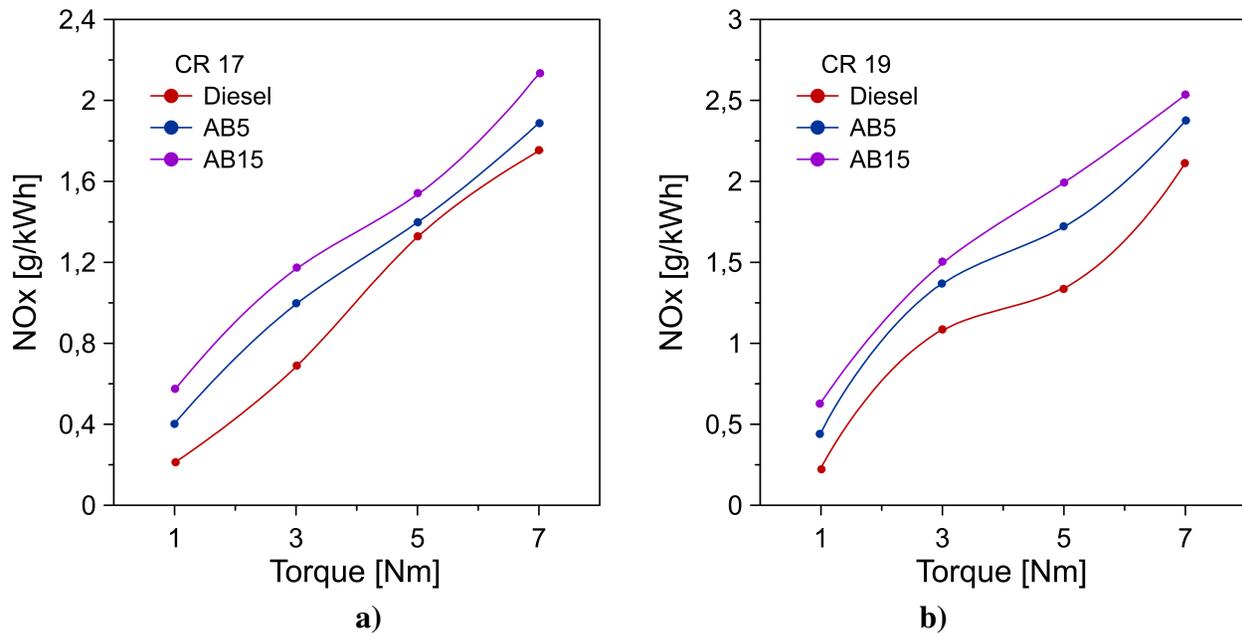


Figure 9. NOx emissions for an engine compression ratio of (a) CR 17 and (b) CR 19

her load rates represented by high torque ranges promoted NOx formation between 2-2,89 g/kWh, which can be attributed to higher in-cylinder pressure and temperatures which contribute to the reaction of nitrogen and oxygen to produce nitrogen oxides. In line with that, increasing the compression ratio also increases both temperature and pressure during combustion, which facilitates NOx formation. The overall pattern of the results ratifies this trend.

## 5. Conclusions

This research aimed to present a complete experimental assessment based on emissions and thermal characteristics in order to evaluate partial fuel substitution in a diesel engine with a biodiesel blend of algae oil from the species *Spirulina platensis*. The study incorporated different torque conditions (1-7 Nm) to examine a wide range of operations, and the effect of the compression ratio (CR 17 and CR 19) emerged as a unique contribution from former research. The operational performance was measured with commercial diesel as the baseline for comparison, while the algae oil content in the biodiesel blend was set to 5 % (AB5) and 15 % (AB15).

The results indicated that the implementation of algae oil as a biodiesel blend did not produce a dramatic variation in the fuel properties. In general, the behavior of the studied biodiesel blends can be summarized as follows: a 2,42 % reduction in calorific value, a 0,45 % density increase, and a flashpoint enlarged by around 3,67 %. On the other hand, increasing the CR fostered an almost 10 % higher pressure in the combustion chamber. Overall, turning operation from CR 17 to CR 19 boosted the in-cylinder pressure by 9,36, 9,28, and 7,08 % for pure diesel, AB5, and AB15, respectively. Consequently, the intensified pressure range magnified the BTE of the tested fuels. On average, the BTE increment for the biodiesel blends was around 17 % by raising the CR. Similarly, the impact of higher compression ratios was reflected on the minimization of fuel consumption metrics.

On average, diesel fuel, AB5, and AB15 showed reductions of 1,74 %, 1,97 %, and 2,05 % in the BSFC, respectively. Contrarily, increasing the content of algae oil from 5 to 15 % in the biodiesel blend produced a negative impact on combustion pressure, BTE, and BSFC, which is a direct consequence of the higher density and lower calorific values. Therefore, increasing the CR stands as a suitable mechanism to offset the undesired effects on thermal performance and fuel metrics. Despite reducing the overall performance, algae oil enrichment in the biodiesel blend exhibits remarkable results in terms of greenhouse gas mitigation.

In general, by establishing the algae oil content at 15 % (AB15), a maximum reduction of 38, 95 %, and 35 % was obtained for CO, CO<sub>2</sub>, and HC emissions, respectively, compared to commercial diesel. This behavior can be attributed to the higher oxygen content and the high cetane number in the biodiesel blend. In contrast, the NO<sub>x</sub> emissions were intensified for higher algae oil replacement grades. This pattern can be explained by the enriched-oxygen nature of the biodiesel blend, which promotes complete combustion in the air-fuel mixture. It is worth mentioning that increasing both the compression ratio and torque range produced higher pressure (70-78 bar) and temperature during combustion, which entails an additional maximization of NO<sub>x</sub> formation (10-25 %). Higher ignition delay as a result of higher combustion pressure can also be mentioned as a potential explanation for the NO<sub>x</sub> increase. Lastly, the torque operating range had a significant impact on emission levels. Accordingly, increasing the torque range from 1 to 5 Nm minimized the CO and HC emissions, on average, by 64 and 55 %, respectively, whereas it boosted CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> levels. The maximization trend of the torque is related to the oxidation process of the air-fuel mixture during combustion, given that a maximum torque enables the appropriate environment (higher temperature and pressure) for the formation of oxides.

Finally, this study could verify the applicability of a compound methodology involving the implementation of an algae oil-biodiesel blend and increasing the CR, which stands as a suitable tool to improve the overall performance of diesel engines from a thermal and emissions perspective.

## References

- [1] O. A. Vidal-Daza and A. Pérez-Vidal, "Estimación de la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por una industria papelera mediante el modelo AERMOD," *Ing.*, vol. 23, no. 1, pp. 31-47, 2018. <https://doi.org/10.14483/23448393.12262> ↑2
- [2] M. Becerra-Fernández, and R. Rodríguez-Yee, "Selección de alternativas para el suministro de gas natural en Colombia empleando el proceso analítico jerárquico," *Ing.*, vol. 22, no. 2, pp. 190-210, 2017. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.2.a02> ↑2
- [3] M. Alibaba, R. Pourdarbani, M. H. K. Manesh, G. V. Ochoa, and J. D. Forero, "Thermodynamic, exergo-economic and exergo-environmental analysis of hybrid geothermal-solar power plant based on ORC cycle using emergy concept," *Heliyon*, vol. 6, e03758, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03758> ↑2
- [4] E. Espinel-Blanco, G. Valencia-Ochoa, and J. Duarte-Forero, "Thermodynamic, exergy and environmental impact assessment of S-CO<sub>2</sub> Brayton cycle coupled with ORC as bottoming cycle," *Energies*, vol. 13, no. 9, p. 2259, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13092259> ↑2
- [5] L. F. Mónico-Muñoz, J. J. Sandoval-Sotelo, and A. F. Rodríguez-Chaparro, "Estudio teórico de la influencia del uso de mezclas de biodiesel de aceite de palma con JET a-1 en motores a reacción," *Ing.*, vol. 22, no. 1, pp. 140-151, 2017. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.1.a06> ↑2

- [6] G. Valencia, A. Fontalvo, and J. Duarte-Forero, "Optimization of waste heat recovery in internal combustion engine using a dual-loop organic Rankine cycle: Thermo-economic and environmental footprint analysis," *Appl. Therm. Eng.* vol. 182, p. 116109, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116109> ↑2
- [7] J. C. Gutiérrez, G. Valencia-Ochoa, and J. Duarte-Forero, "Regenerative organic Rankine cycle as bottoming cycle of an industrial gas engine: Traditional and advanced exergetic analysis," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 13, p. 4411, Jun. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10134411> ↑2
- [8] P. Tamilselvan, N. Nallusamy, and S. Rajkumar, "A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79 pp. 1134-1159, Nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.176> ↑2, 3, 8, 10
- [9] I. Abrar and A. N. Bhaskarwar, "Microemulsion fuels for compression ignition engines: A review on engine performance and emission characteristics," *Fuel*, vol. 257, p. 115944, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115944> ↑3
- [10] D. A. Herrera-Susa, J. R. Bermúdez-Samtaella, C. E. Castilla-Alvarez, and N. L. Díaz-Aldana, "Análisis del desempeño de la potencia y el torque de un motor diésel operando con mezclas de biodiesel de palma," *Ing.*, vol. 25, no. 3, pp. 250-263, 2020. <https://doi.org/10.14483/23448393.15676> ↑3, 9, 10, 12
- [11] F. R. Badal, P. Das, S. K. Sarker, and S. K. Das "A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid," *Protec. Cont. Mod. Power Syst.*, vol. 4, no. 1, art. 8, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1186/s41601-019-0122-8> ↑3, 7
- [12] E. L. Almeida, C. M. G. Andrade, and O.A. dos Santos, "Production of biodiesel via catalytic processes: A brief review," *Int. J. Chem. React. Eng.*, vol. 16, no. 5, p. 20170130, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1515/ijcre-2017-0130> ↑3, 12
- [13] J. Chen et al., "The potential of microalgae in biodiesel production," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, pp. 336-346, Jul. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.073> ↑3
- [14] H. M. Mahmudul, F. Y. Hagos, R. Mamat, A. A. Adam, W. F. W. Ishak, and R. Alenezi, "Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 497-509, May 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.001> ↑3
- [15] G. Baskar, I. A. E. Selvakumari, and R. J. B. T Aiswarya, "Biodiesel production from castor oil using heterogeneous Ni doped ZnO nanocatalyst," *Biores. Tech.*, vol. 250, pp. 793-798, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.010> ↑3
- [16] W. Orozco, N. Acuña, and J. Duarte, "Characterization of emissions in low displacement diesel engines using biodiesel and energy recovery system," *Int. Rev. Mech. Eng.*, vol. 13, pp. 420-426, 2019. <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i7.17389> ↑3
- [17] A. Mejiá, M. Leiva, A. Rincón-Montenegro, A. Gonzalez-Quiroga, and J. Duarte-Forero, "Experimental assessment of emissions maps of a single-cylinder compression ignition engine powered by diesel and palm oil biodiesel-diesel fuel blends", *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 19, p. 100613, Jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100613> ↑3, 11, 13
- [18] C. M. Noor, M. M. Noor, and R. Mamat, "Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 94, pp. 127-142, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.031> ↑3, 12
- [19] P. Roshia, S. K. Mohapatra, S. K., Mahla, H. Cho, B.S. Chauhan, and A. Dhir, "Effect of compression ratio on combustion, performance, and emission characteristics of compression ignition engine fueled with palm (B20) biodiesel blend," *Energy*, vol. 178, pp. 676-684, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.185> ↑3
- [20] G. Valencia-Ochoa, C. Acevedo-Peñaloza, and J. Duarte-Forero, "Combustion and performance study of low-displacement compression ignition engines operating with diesel-biodiesel blends," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 3, p. 907, Jan. 2019. <https://doi.org/10.3390/app10030907> ↑3
- [21] M. Mubarak, A. Shaija, and T.V. Suchithra, "Experimental evaluation of *Salvinia molesta* oil biodiesel/diesel blends fuel on combustion, performance and emission analysis of diesel engine," *Fuel*, vol. 287, p. 119526, Mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119526> ↑3
- [22] S. K. Sharif, B. N. Rao, and D. Jagadish, "Comparative performance and emission studies of the CI engine with *Nodularia Spumigena* microalgae biodiesel versus different vegetable oil derived biodiesel," *SN App. Sci.*, vol. 2, art. 858, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2697-0> ↑3
- [23] S. Aydın, "Comprehensive analysis of combustion, performance and emissions of power generator diesel engine

- fueled with different source of biodiesel blends,” *Energy*, vol. 205, p. 118074, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118074> ↑4, 11, 13
- [24] H. Koten, “Hydrogen effects on the diesel engine performance and emissions”, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 22, pp. 10511-10519, May. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.146> ↑6, 9, 10, 12
- [25] A. Drews, "Standard Guide for Petroleum Measurement Tables, in Manual on Hydrocarbon Analysis, ASTM, 6th Ed., West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2008: pp. 247-247–2. <https://doi.org/10.1520/mn110864m> ↑8

---

### **Daniel Maestre-Cambronel**

From Barranquilla, Colombia. He received his Bs. Eng in Mechanical Engineering in 2020 and specialized in Efficient Energy Management in 2021 at Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia. He is currently a researcher of the KAI Research Unit from Universidad del Atlántico. His research interests include thermal systems, hydrogen technologies, and the techno-economic optimization of energy systems.  
Correo electrónico: dmaestre@est.uniatlantico.edu.co

---

### **Sofía Orjuela-Abril**

From Bucaramanga, Colombia. She is a full-time professor of the Business Administration Program at Universidad Francisco de Paula Santander. She obtained a degree in Industrial Engineering from Universidad Libre de Colombia in 2003. Master in Business Administration with a specialization in Project Management from Universidad de Viña del Mar (2014). She is a MINCIENCIAS associate researcher.  
Correo electrónico: sofiaorjuela@ufps.edu.co

---

### **Jorge Duarte-Forero**

From Barranquilla, Colombia. He is an associate professor of the Mechanical Engineering Program at Universidad del Atlántico. He received his BSME in Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia, in 2007. Master in Mechanical Engineering from Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia in 2013. PhD in Engineering from Universidad del Norte, Colombia, in 2017. He is a MINCIENCIAS Senior Researcher.  
Correo electrónico: jorgeduarte@mail.uniatlantico.edu.co

# Data Acquisition with LoraWAN IoT Technology to Monitor Bio-Inspired Wind Turbines in Rural Areas of Cundinamarca

*Adquisición de datos con tecnología IoT LoraWAN para monitoreo de turbinas eólicas bio-inspiradas en zonas rurales de Cundinamarca*

Jersson A. Quintero \*<sup>1</sup>, Héctor G. Parra-Peñuela <sup>2</sup>, Elvis E. Gaona <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá D.C., Colombia), <sup>2</sup>Universidad Militar Nueva Granada (Bogotá D.C., Colombia)

\*Correspondence e-mail: [egaona@udistrital.edu.co](mailto:egaona@udistrital.edu.co)

Recibido: 30/12/2021. Modificado: 18/11/2021. Aceptado: 09/02/2022.

## Abstract

**Context:** The energy crisis is a global problem. In Colombia, research aimed at the efficient use of renewable energies is being conducted. For example, in the case of bio-inspired wind generators, a monitoring system is required to observe the output variables (voltage and frequency).

**Method:** LoRaWAN technologies are used to deploy the wireless link since the generators are separated from the base station. In addition, the Gateway coverage area is simulated with HTZ Communications software for future smart grid improvements.

**Results:** The implemented system allows constant monitoring over a long period of time and stores its information in online, open-source databases, which allows remotely visualizing the status of the network, with a total of 3 samples per minute and a range of up to 3,47 km.

**Conclusions:** The data acquisition system can be implemented for remote monitoring. Moreover, since it is a low power system, it can be utilized in non-interconnected areas, as well as for storing data for up to 6 months. However, for the characterization of a model of wind generators, it is advisable to modify the system so that the sampling time is lower.

**Keywords:** IoT, LoRaWAN, MCU, HTZ Communications

**Acknowledgements:** To the Center for Research and Scientific Development (CIDC) regarding their financial support to project 2-602-608-19, titled Development of bio-inspired active vortex generators for wind turbines in rural areas of Cundinamarca through CFD, by means of project bank call 03-2019.

**Language:** English

Open access



Cite as: J. A. . Quintero, H. G. Parra Peñuela, E. E. Gaona. "Data Acquisition with LoraWAN IoT Technology to Monitor Bio-Inspired Wind Turbines in Rural Areas of Cundinamarca". *Ing.*, vol. 27, no. 2, 2022. e18861. <https://doi.org/10.14483/23448393.18861>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

### Resumen

**Contexto:** La crisis energética es una problemática global. En Colombia se están realizando investigaciones para el aprovechamiento eficiente de energías renovables. Por ejemplo, en el caso de generadores eólicos bio-inspirados, se requiere un sistema de monitoreo para observar variables de salida (voltaje y frecuencia).

**Método:** Se utilizan tecnologías LoRaWAN para el despliegue del enlace inalámbrico, ya que los generadores están separados de la estación base. Además, la zona de cobertura del Gateway se construye en el software HTZ Communications para futuras mejoras en la red inteligente.

**Resultados:** El sistema implementado permite realizar un monitoreo constante por periodos de tiempo prolongados y almacena su información en bases de datos online de código abierto, lo cual permite visualizar el estado de la red de forma remota, con un total de 3 muestras por minuto y un alcance de hasta 3,47 km.

**Conclusiones:** El sistema de adquisición de datos puede ser implementado para monitoreo remoto. Adicionalmente, dado que es un sistema de baja potencia, puede utilizarse en zonas no interconectadas, así como para almacenar datos hasta por 6 meses. Sin embargo, para la caracterización de un modelo de generadores eólicos, es aconsejable modificar el sistema para que el tiempo de muestreo sea menor.

**Palabras clave:** IoT, LoRaWAN, MCU, HTZ Communications

**Agradecimientos:** Al Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIDC) por el apoyo económico al proyecto 2-602-608-19, titulado Desarrollo de generadores de vórtice activos bio-inspirados para rotores eólicos en zonas rurales de Cundinamarca mediante CFD, a través la convocatoria de banco de proyectos 03-2019.

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

Renewable sources in the world are a type of solution to the energy and environmental problems that have been arising in recent decades [1]. Colombia, a developing country, has been aware and working to mitigate this global problem, given that water is its most used resource for energy production, followed by power plants [2]. Therefore, in recent years, Colombia has been interested in gradually increasing the use of alternative energies, as is the case of smart grids [3], offering a solution to supply energy to remote or non-interconnected rural areas (ZNI), which cannot be supplied via the main power plants of the country.

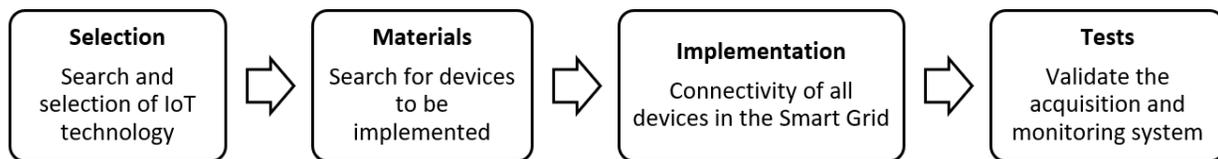
Smart grids are a set comprising a system of loads, generators, and energy storage that can be managed in isolation or connected to the rest of the electrical grid [4], a concept that was introduced by Lasseter in 2002 [5]. Smart grids can base their operation on the use of air currents, but the latter have disadvantages in the production of electrical energy, since their generation is intermittent. For this reason, there is a field of development aimed at increasing the efficiency of wind generators, wherein it is necessary to implement monitoring systems in smart grids, which may be based on the Internet of Things (IoT).

IoT is an open network of intelligent objects with the ability to share information, data, and resources, reacting to and acting on situations and changes in their environment [6]. In the case of smart grids, IoT is widely used to monitor the behavior of a system. Moreover, it is important

to mention that this technology allows remote monitoring of the variables resulting from power generation, which supports decision-making [7], [8].

## 2. Methodology

In this work, a system for the acquisition and monitoring of voltage and frequency variables is developed in order to evaluate the performance of the energy use produced by bio-inspired wind turbines. Different phases are implemented: selection of the IoT technology, materials, development, and implementation. The following sections describe each of the stages involved in the process (Fig. 1).



**Figure 1.** Phases of the elaboration of the data acquisition system to monitor energy production

### 2.1. Selection of the IoT technology

In the exploration stage, a low consumption system was sought, with the purpose of not wasting the energy produced in a high-power communication system. Moreover, this selection should not affect the coverage area, since some requirements of the project establish that this network should be available for future updates in the project and new applications that may involve constant monitoring. Likewise, a low-cost system was needed.

The concept of the IoT is closely related to smart grids in such a way that these can interact between several devices with minimal human intervention; the combination of these two systems is known as *smart grid* [9], which has applications in data processing and decision-making, thus allowing to maximize the energy produced, a situation that has proven to be problematic in the context of renewable energies [10].

Additionally, the searches conducted on IoT and its implementation in a smart grid network found that there are several key parameters that define what type of LPWAN technology could be implemented in the project. Among them are bandwidth, working frequency, distance, and licensed or unlicensed band, among others (Table I) [8]. After reviewing the implementation requirements, the LoRaWAN technology was chosen since it works in an unlicensed band and has a payload higher than Sigfox, unlimited number of messages, 128-bit communication encryption, and low power consumption.

LoRa is a low power private wireless communications protocol that operates in the physical layer of the OSI reference model. It has working frequencies in unlicensed bands and uses spread spectrum modulation (CSS, Chirp Spread Spectrum). Additionally, the fact that it is based on chirp

**Table I.** Overview of LPWAN technologies: Sigfox, Lora, and NB-IoTx [11]

LPWAN Technology/ Features	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation	BPSK	CSS	QPSK
Frequency	Unlicensed ISM band (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Unlicensed ISM band (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia).	Licensed LTE frequency band
Bandwidth	100 Hz	250KHz and 125 kHz	200 kHz
Max. data rate	100 bps	50 kbps	200 kbps
Max. messages/day	140 (UL). 4 (DL)	Unlimited	Unlimited
Max. payload length	12 bytes (UL). 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Distance	10 km (urban), 40 km (rural)	5 km (urban), 20 km (rural)	1 km (urban), 10 km (rural)
Authentication and encryption	Not compatible	(AES 125b)	(encryption LTE)
Enable private network	Not compatible	Yes	No

technology allows high tolerance to interference and high sensitivity to receive data up to -168 dB. This is due to transmission parameters such as channel frequency, bandwidth (BW), spreading factor (SF), and chirp rate (CR), as well as a greater range or higher transmission speed, which is required in the development of the project [12].

**Bandwidth (BW).** The lora modules have three configurations for the 125, 250, and 500 kHz bandwidths, modifying the data transmission between two devices. In addition, the transmitter module sends the spread data at a chirp rate equal to the system's bandwidth in chirps per second per Hz, so the 250 kHz bandwidth corresponds to a speed of 250 kcps [13].

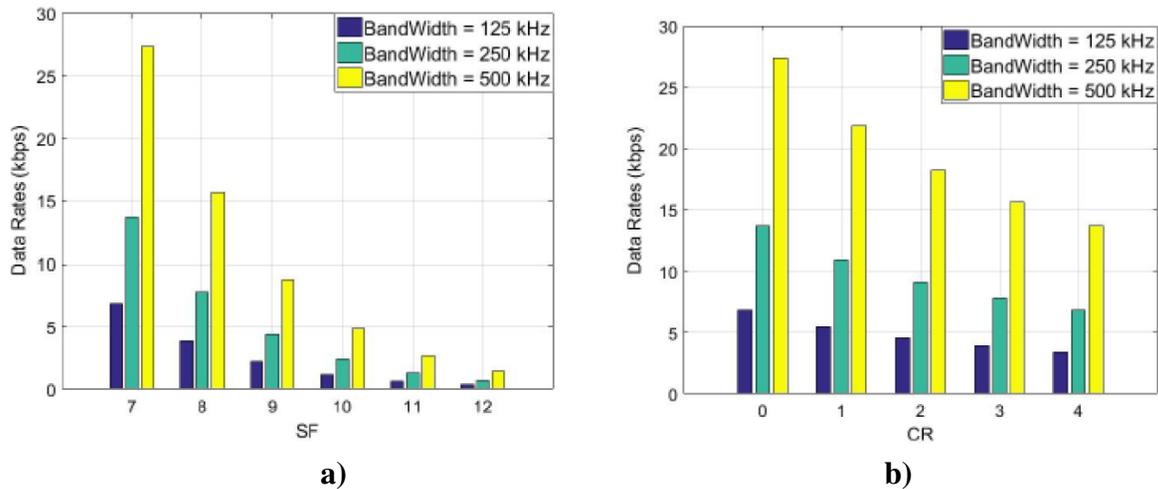
**Spreading factor (SF).** It is a factor that allows configuring the range that a radio link can have between the transmitter and the receiver device. This parameter has a range between 7 and 12, and the higher the SF, the greater the range that the signal can reach, which, however, decreases the data rate and vice versa. Fig. 3 shows how the SF affects the transition speed (Fig. 2a) [14].

**Code Rate (CR).** LoRa networks are connection-oriented technologies, and the modulation adds forward error correction (FEC) to each data transmission. This FEC can be configured through the CR parameter in LoRa modules, offering CR settings between 0 and 4, where CR = 0 means no FEC. LoRa uses code rates of 4/5, 2/3, 4/7, and 1/2. This means that, if CR is denoted as  $k = n$ , where  $k$  represents useful information, and the encoder generates  $n$  number of output bits, then  $n - k$  will be the redundant bits [13]. This coding considerably decreases the transmission rate (Fig. 2b).

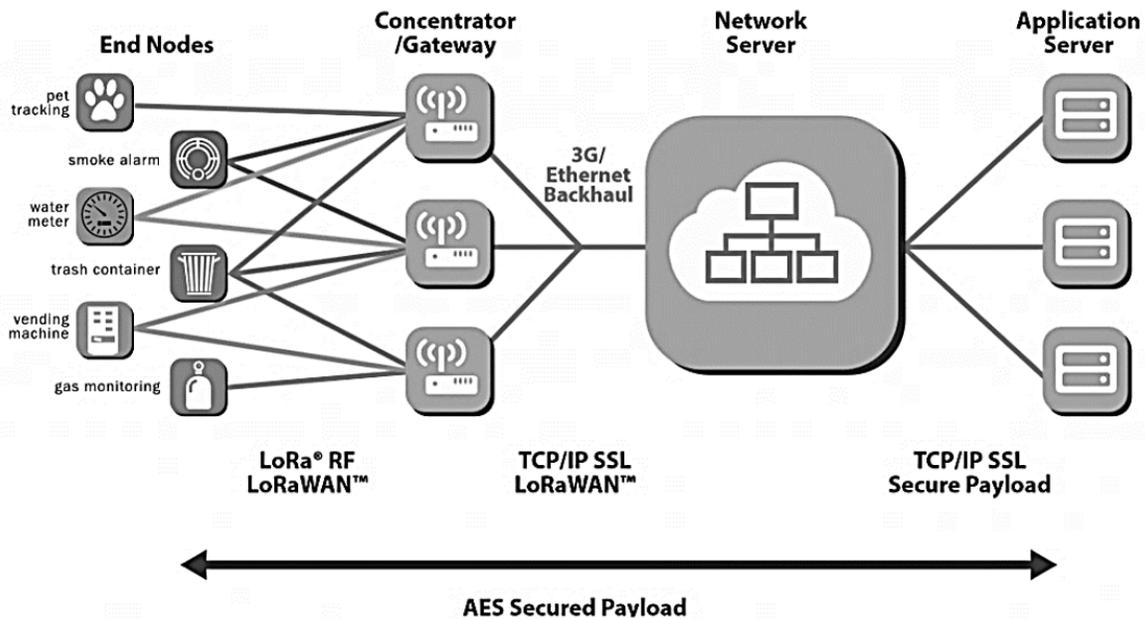
**LoRaWAN.** It is a low power and wide area network protocol designed to interconnect IoT devices based on a star topology between the end devices and the Gateway (Fig. 3). Moreover, LoRaWAN also offers authentication, confidentiality, and integrity services through AES128 encryption, so that the information can only be interpreted by the ends of the link [15].

Once the technology to be used had been selected, research was conducted on the devices that were in the market and which of them could be used for implementation in a rural area of Cundinamarca, knowing that there were limitations in terms of equipment costs. There are modules developed by the RAK company that can be used in embedded systems, which is why one such

module was chosen, thus allowing the implementation of different libraries for communication between the embedded systems.



**Figure 2.** a) Relationship between data rate and SF expansion factor; b) relationship between CR and effective data rate with SF=7 [13]



**Figure 3.** LoRaWAN network architecture [15]

## 2.2. Materials

### *Gateway LoRaWAN technology*

**RAK7258 WisGate Edge Lite** (Fig. 4a) is a full 8-channel gateway with built-in Ethernet connectivity for easy configuration. In addition, there is an on-board Wi-Fi feature that allows it to be

easily configured through the default Wi-Fi AP mode. Furthermore, the Gateway has line-of-sight (LoS) ranges of up to 15 km, whereas, for highly urbanized environments, it can cover more than 2 km. It is a perfect solution for any LoRaWAN use case scenario [16].

**Gateway Features:**

- 8 channels - **RX Sensitivity: -139 dBm (min.)**
- **TX Power: 27 dBm (max.)**
- **Frequencies: EU433 / CN470 / EU868 / US915 / AS923 / AU915 / IN865 / KR920**

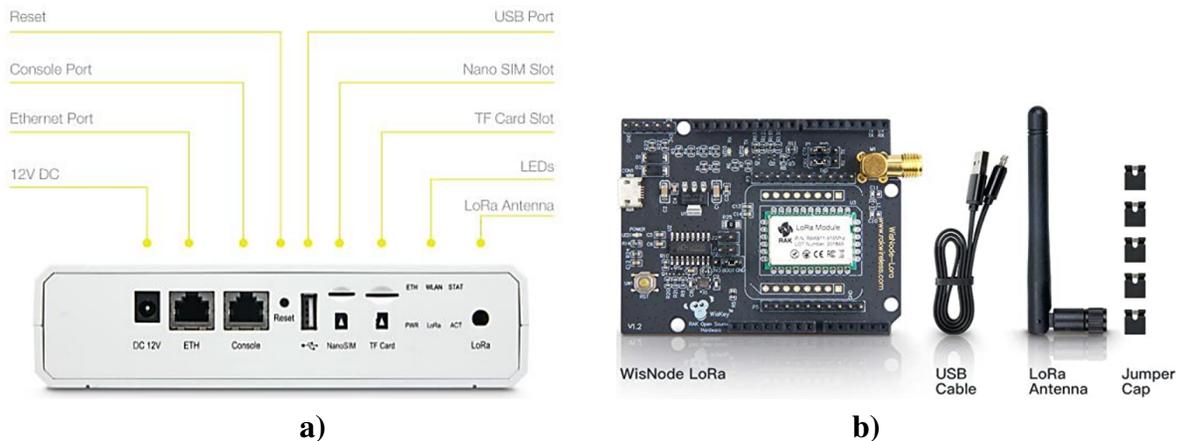
This gateway is responsible for communicating with end devices, so it must have a high sensitivity and an indoor configuration to be used when the line of sight is less than 15 km. Additionally, it has 8 channels, which allows having 8 remote nodes connected simultaneously, thus allowing the project to be scalable for future applications.

*WisDuino RAK811 module evaluation board*

The **WisDuino (RAK811) evaluation board** is a development board that comes with the Uno embedded system structure (Fig. 4b). It has a built-in MCU that allows it to function as a standalone solution or as a socket of an embedded system. This board is very suitable for fast development and testing. In addition to the integrated USB-UART port and conversion, it can also be configured with AT commands [17].

**Features of the RAK811 LoRa module**

- It supports LoRaWAN or LoRaP2P (point-to-point link)
- Low power module for battery-powered remote applications
- High receiver sensitivity (-146 dBm)
- Transmitter power between 14 and 20 dBm
- Coverage of up to 15 km in suburbs and up to 5 km coverage in urban areas
- UART communication [17]



**Figure 4.** Physical structure of the RAK7258 Gateway [16]; b) RAK811 module evaluation board [17]

This module is responsible for wirelessly sending and receiving information from an embedded system to a Gateway. Therefore, this device allows configuring the characteristics of SF, CR, BW, and use frequency, thus allowing to have a greater range or higher transmission speed in the link.

*The Things Network (TTN)*

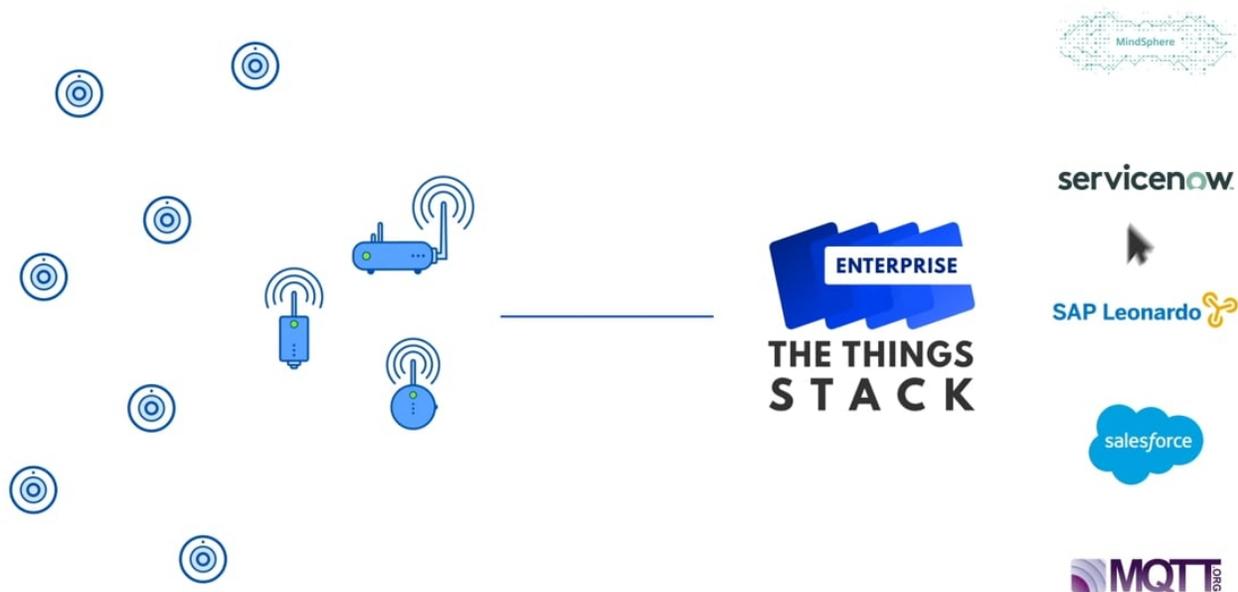
The Things Network is a global, open, decentralized, free IoT network. This service allows communication between things without the need for a 3G, 4G, or WiFi connection. It was created in 2015, with the aim of facilitating the design and manufacture of networks for the Internet of Things. In addition, it offers HTTP and MQTT integrations, as well as integration with applications developed in Java, Node.js, or Go (Fig. 5) [19].

**2.3. Implementation**

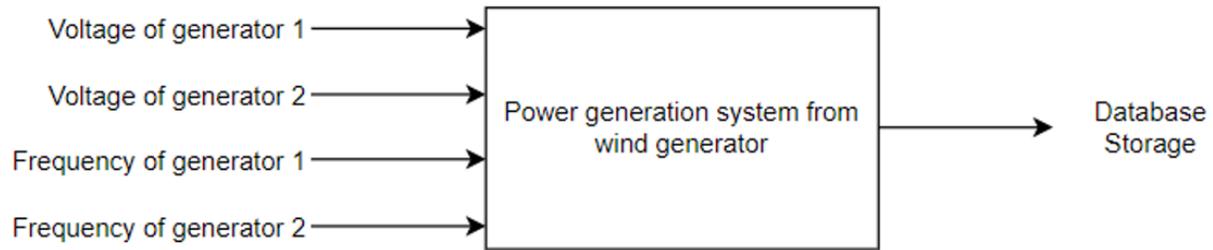
The development of the project was carried out with the prototype of a system that allows receiving the information of the variables generated by the use of wind energy in wind generators, namely the frequency and the RMS voltage of the generator. Fig. 6 shows the parameters of the system.

The maximum values of the variables are in the order of 10 Hz and 45V RMS, so signal conditioning is necessary to enter the embedded system (Fig. 7). The voltage ratio that must enter the embedded system was calculated (Eq. 1); a ratio close to 13:1 was estimated, thus avoiding saturation in the embedded system. Additionally, an optocoupler was added to measure the frequency through interruptions in the embedded system.

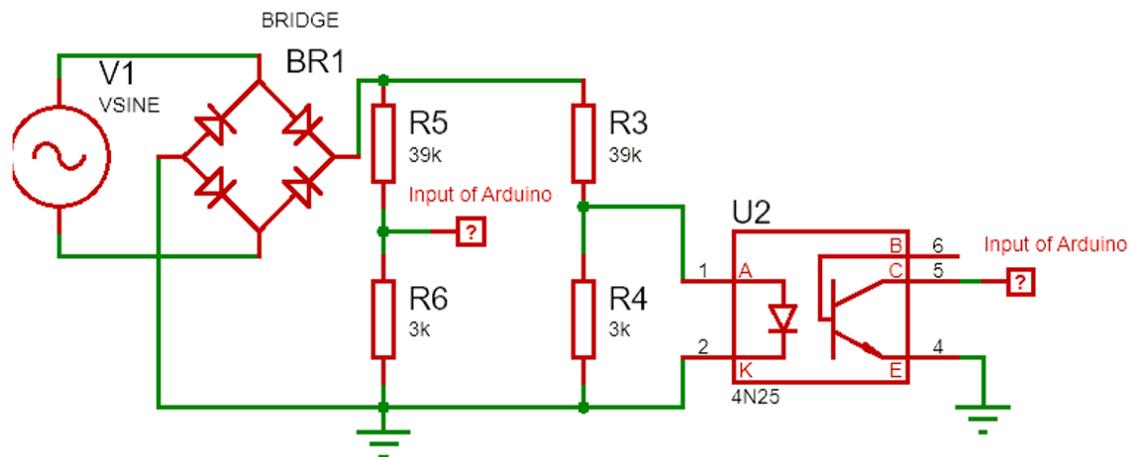
$$\frac{V_{R2}}{V_{R1}} = \frac{R2}{R1} \tag{1}$$



**Figure 5.** Network design with TTN [18]



**Figure 6.** Data acquisition system for wind generators



**Figure 7.** Conditioning circuit

Once this stage was completed, we proceeded with information processing in the embedded system, identifying how an algorithm that allows precision without sacrificing speed can be implemented to later send the information to the RAK811 module, so the latter can transmit the data wirelessly to the Gateway (Fig. 8).

Afterwards, the RAK811 module communicates with the embedded system. Unfortunately, the board can only be connected by cables and not by placing the socket, since this causes short circuit errors. Therefore, it is necessary to remove some resistors from the board, which is why we decided to use cables in order to enable communication between the microcontroller and the module [19].

Subsequently, the TTN platform was implemented (version 2) to establish the application parameters set for the initial configuration of the node, namely the device EUI, the application EUI, and the app key. With this configuration, the information is encrypted and can only be processed by the ends of the communication node and its application in the cloud (Fig. 9a).

Finally, integration with The ThingSpeak, an open-source database (Fig. 9b), was performed. The ThingSpeak is a free database that allows storing up to 3 million samples and is ideal for applications focused on IoT. However, the database only allows receiving data every 20 seconds, which limits the continuous analysis of data, although it is recommended for applications involving long periods of time, as it can store up to six months of data for the four variables for later analysis.

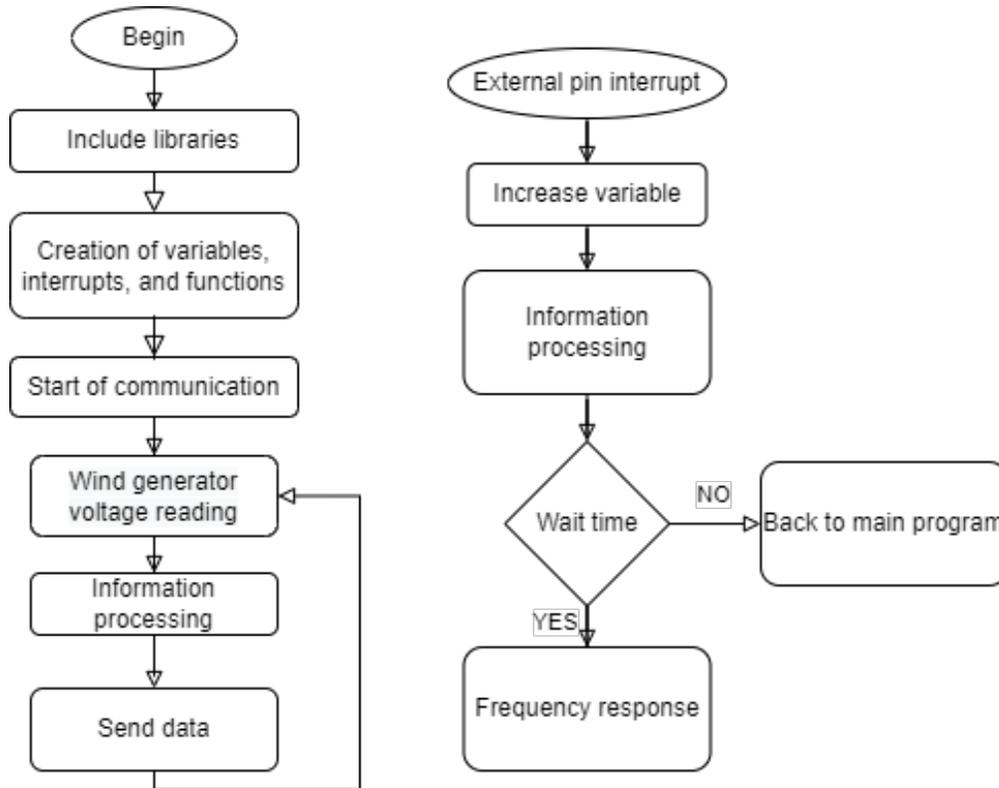


Figure 8. Pseudocode of the embedded system algorithm

Figure 9. a) Device parameters for application; b) integration of TTN with The ThingSpeak

### 3. Tests

Since the project was developed during the COVID-19 pandemic, indoor tests were performed, acquiring data from the power grid in Colombia, with the following standard values: a voltage of 110-120 V RMS (Fig. 10a) and a frequency of 60 Hz (Fig. 10b). The following graphs show the behavior of the power grid, considering the variations stemming from uncertainty in data collection. These data were conditioned and captured by the embedded system to be subsequently sent to the server of The Things Network.

As it can be observed, the system shows small variations in the main voltage because it must



**Figure 10.** left) RMS voltage vs. time; right) frequency vs. time

average several voltage samples on the embedded system pin, in addition to the requirements. The system must perform the reading of two wind turbines, which has a higher computational cost, thus affecting the information transmission speed.

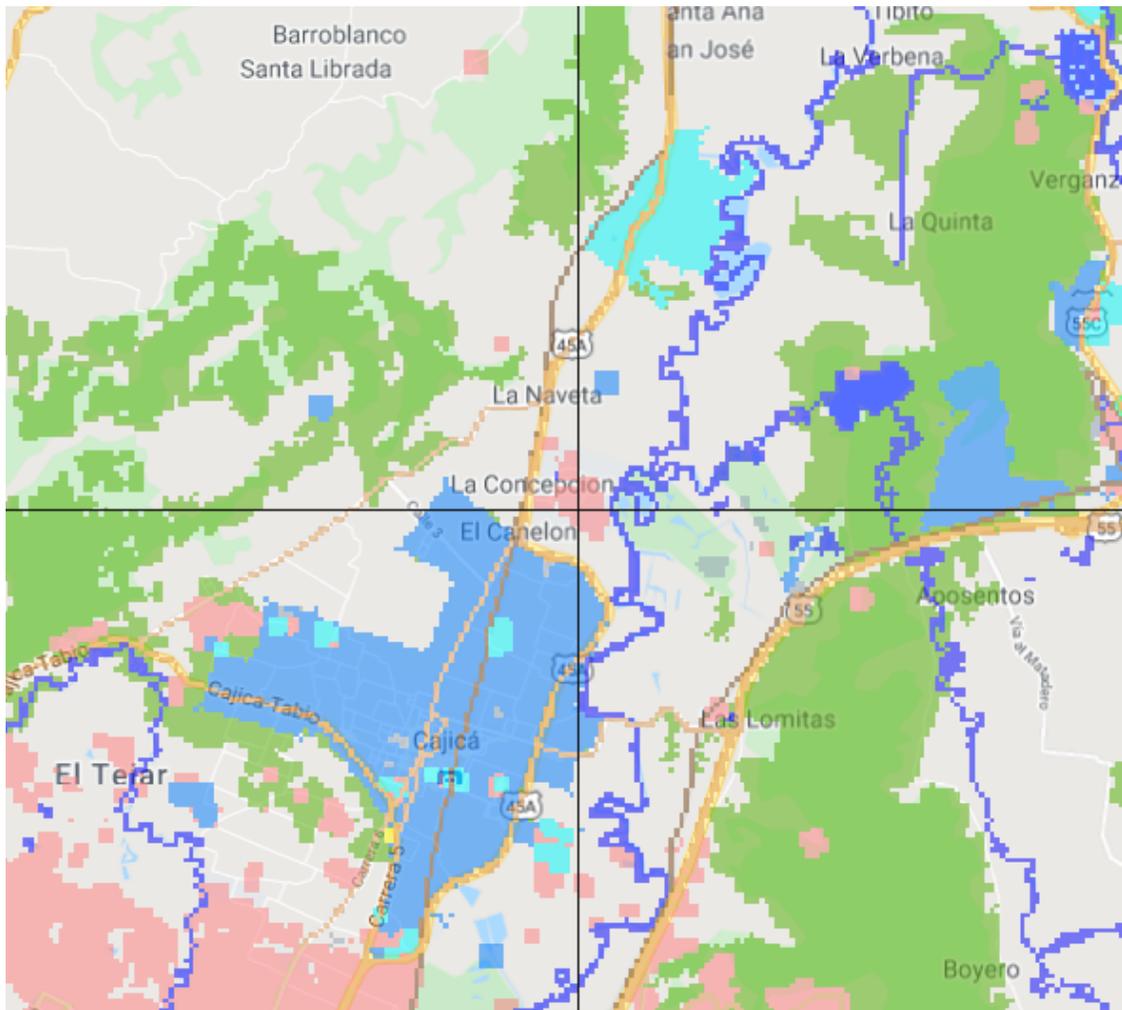
On the other hand, the integration of ThingSpeak does not store all the data sent by the embedded system, which affects the quality of the signal. This is due to the fact that the communication link with the TTN server loses frames due to writing limitations, in addition to losing information from the TTN server to the ThingSpeak integration, which also has limitations.

Finally, tests were performed with a simulation software (HTZ Communications), which allows finding the coverage area for wireless links such as IoT. By running this simulation, it was found that the area where the application was deployed can be considered as a small town surrounded by wooded areas (green), avenues (orange), and suburban areas (blue). This can affect the range of the link through attenuations contemplated by the software (Fig. 11).

This simulation was performed through calculations regarding free space losses and interference in the deployment area using the Okumura-Hata propagation method (Fig. 12). It was observed that the maximum distance between a remote node and the Gateway is 3,47 km, whereas the minimum is 2,44 km with -120 dBm. This is due to the losses that exist due to small, wooded areas, adjacent buildings, and surrounding crops, which reduce five-fold the coverage area specified by the manufacturer. Additionally, the models are an approximation to reality; they are subject to small variations that must be taken into account by variables not considered in the implemented method. However, these do not affect the estimation of the coverage area.

## 4. Discussion

The data acquisition and monitoring system implemented in bio-inspired wind generators allows storing information and displaying it simultaneously. This allows for remote monitoring of the system, a tool that is essential for applications in non-interconnected rural areas (ZNI). However, by observing the system in operation, it was found that the implemented tools and materials have li-

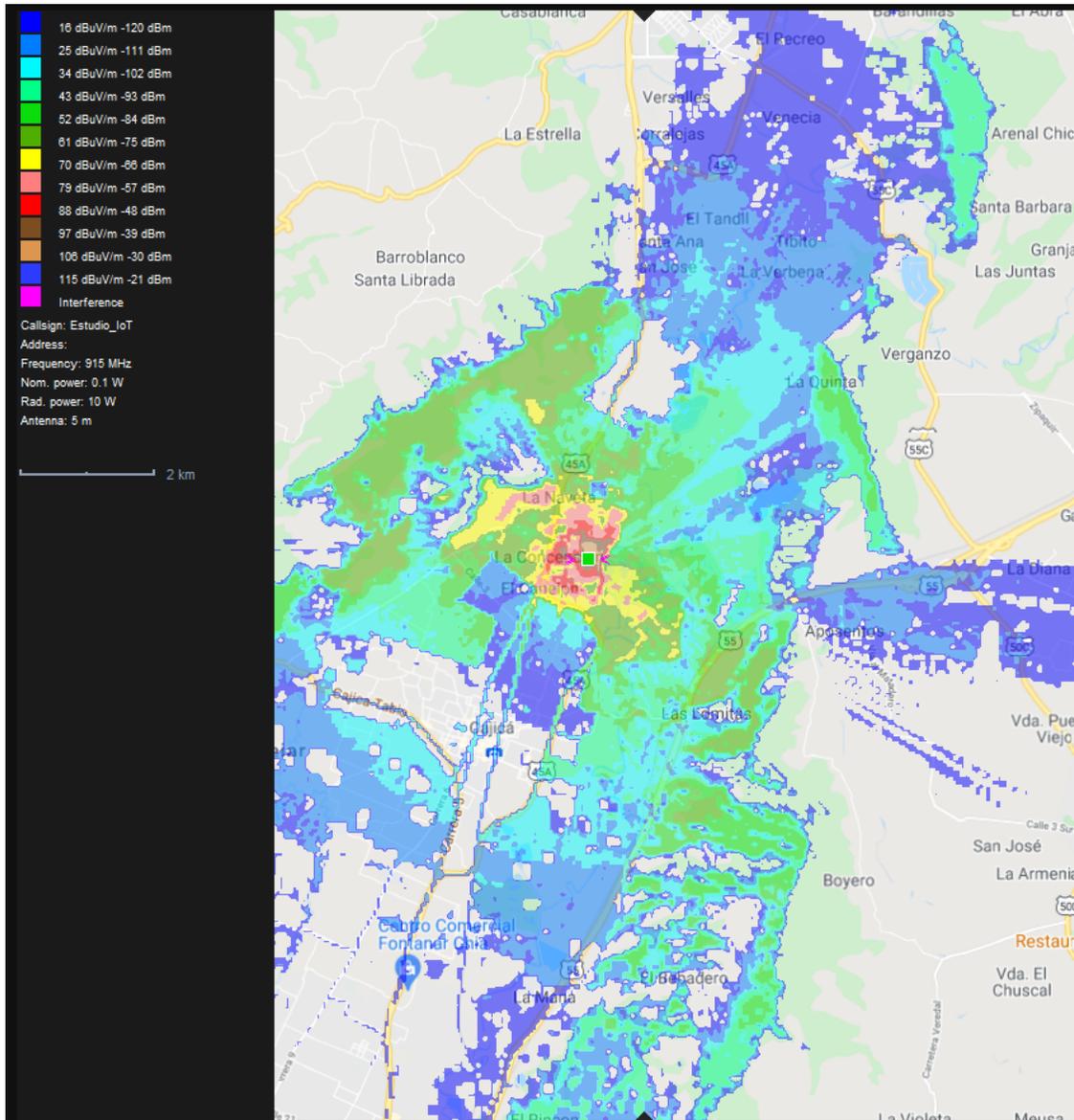


**Figure 11.** Installation point of the energy production monitoring system in a prototype of wind generators

mitations that may impair the sampling of variables. Among them is the type of embedded system used, given that it must perform the reading of the variables, information processing, and coding of the frames sent to the node. Therefore, the frame time is proportional to the computational cost of performing each task, thus reducing the transmission speed between the node and the Gateway.

In addition, The Things Network service has limitations regarding the number of frames it can receive from the node, since the integrated system generates frames every 200 ms, and TTN can only process frames every 3 seconds, so it receives 1 frame for every 15 frames, which is equivalent to approximately 7 % of the information. However, a low spread factor (SF7), a 4/5 code rate, and a 125 kHz bandwidth were used, which was initially configured to avoid delays in the wireless link, but modifying some parameters, such as the SF to 12 and a higher bandwidth (500 kHz), allows the LoRa RAK811 module to decrease the transfer rates, which results in more frames arriving successfully and in a greater coverage.

Finally, it was observed that the frames delivered to TTN are not reflected in the database, since one out of five frames were stored in The ThingSpeak database, which is due to the fact that the



**Figure 12.** IoT system coverage zone

integration has limitations for storage and allows to store data every 15 seconds. This is detrimental to the monitoring of wind generators; in order to model the behavior of the generators, a system is needed which can store the information faster by means of another type of communication link. However, if one desires monitoring for long periods of time, this system can be recommended.

## 5. Conclusions

The design of a data acquisition system for wind generators presented above can have applications in urban, suburban, or non-interconnected areas, since monitoring can be performed from anywhere in the world. Unfortunately, the whole system has a dead time of more than 15 seconds per hour, so it is not recommended. However, it can be recommended for decision-making applications or smart grid monitoring.

Likewise, the prototype can implement another type of integration, different from ThingSpeak, where 4 out of 5 frames sent by The Things Network are lost (80 %). However, the application is recommended for collecting information on the behavior of some variables over a long period of time, sacrificing the time between sample and sample, in addition to being free and easy to deploy.

Regarding hardware, a system can be implemented to improve the sampling quality of the variables, such as dedicated modules for ADC functions, together with an embedded system with concurrency in the processes, which improves the time between frames.

## References

- [1] ICCA, “Energías renovables,” 2015 [Online]. Available: <http://repiica.iica.int/B3661e/B3661e.pdf> ↑2
- [2] J. Espitia and P. Molina, “Economía colombiana y coyuntura política: La situación del sector eléctrico” [Online]. Available: <https://unipacifico.metabiblioteca.org/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=11604> ↑2
- [3] J. A. G. Moreno, C. L. T. Rodríguez, and R. A. P. Suesca, “Hybrid electric energy generation like alternative for not inte connected zones,” *Ing.*, vol. 12, no. 1, pp. 57-63, 2006. <https://doi.org/10.14483/23448393.2100> ↑2
- [4] L. A. Arias Barragán, E. Rivas Trujillo, and F. Santamaría, “Agente integrador de recursos energéticos distribuidos como oferente de energía en el nivel de distribución TT,” *Ing.*, vol. 22, no. 3, pp. 306-323, 2017. <https://doi.org/10.14483/23448393.10986> ↑2
- [5] C. Bordons, F. García-Torres, and L. Valverde, “Gestión óptima de la energía en microrredes con generación renovable,” *Rev. Iberoam. Autom. Infor. Ind.*, vol. 12, pp. 117-132, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.03.001> ↑2
- [6] S. Madakam, R. Ramaswamy, and S. Tripathi, “Internet of Things (IoT): a literature review,” *J. Comput. Commun.*, vol. 3, no. 5, pp. 164-173, 2015. <https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021> ↑2
- [7] J. M. G. Álvarez and J. C. G. Targarona, “Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia,” *DYNA*, vol. 78, no. 169, pp. 95-104, 2011. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/20070> ↑3
- [8] J. M. Aranda, “Diseño y evaluación del desempeño de una red de comunicaciones para medición inteligente en Network Simulator-2,” *Ing.*, vol. 20, no. 1, pp. 2-12, 2015. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.1.a02> ↑3
- [9] R. Bikmetov, M. Y. A. Raja, and T. U. Sane, “Infrastructure and applications of Internet of Things in smart grids: A survey,” presented at *2017 N. Am. Power Symp. (NAPS)*, Morgantown, WV, USA, Sept. 17-19, 2017. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2017.8107283> ↑3
- [10] A. F. Arciniegas M., D. E. Imbajoa R., and J. Revelo F., “Diseño e implementación de un Sistema de Medición Inteligente para AMI de la microrred de la Universidad de Nariño,” *Enfoque UTE*, vol. 8, no. 1, pp. 300-314, Feb. 2017. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n1.136> ↑3
- [11] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of LPWAN technologies for large- scale IoT deployment,” *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1-7, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005> ↑4
- [12] A. Manrique, L. Buitrago, and J. Hernández, “Redes LoRaWAN. Revision de componentes funcionales en aplicaciones IoT,” Research Paper, Fac. Tec., Univ. Dist. Francisco José de Caldas, Bogotá, Col., 2019. <http://hdl.handle.net/11349/22411> ↑4
- [13] U. Noreen, A. Bounceur, and L. Clavier, “A study of LoRa low power and wide area network technology,” presented at *2017 Int. Conf. Adv. Tech. Sig. Image Proc. (ATSIP)*, Fez, Morocco, May 22-24, 2017. <https://doi.org/10.1109/ATSIP.2017.8075570> ↑4, 5
- [14] W. A. Porras-Calderón and O. Y. Salah-García, “Implementación de una Red LPWAN de Sensores para el Monitoreo de Condiciones Ambientales,” *Met&Flu*, 2019, [Online]. Available: [https://www.cdtdegas.com/images/Descargas/Nuestra\\_revista/MetFlu14/9\\_RedLPWAN.pdf](https://www.cdtdegas.com/images/Descargas/Nuestra_revista/MetFlu14/9_RedLPWAN.pdf) ↑4

- [15] LoRa® Alliance Technical Marketing Workgroup, “A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™ What is it?,” 2015 [Online]. Available: [https://lora-alliance.org/resource\\_hub/what-is-lorawan/](https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/) ↑4, 5
- [16] RAKwireless Technology, “Documentation center RAK7258 WisGate Edge Lite datasheet overview description”, <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7258/Supported-LoRa-Network-Servers/#aws-iot-core-for-lorawan> (accessed Jan, 2022). ↑6
- [17] RAKwireless Technology, “RAK811 Evaluation Board Quick Start Guide”, <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisDuino/RAK811-Evaluation-Board/Quickstart/> (accessed Jan, 2022). ↑6
- [18] Hackster.io, “Using LoRaWAN end devices on The Things Network.” <https://www.hackster.io/nootropicdesign/using-lorawan-end-devices-on-the-things-network-206a86> (accessed May 11, 2021). ↑7
- [19] J. C. Merino, “Deployment and evaluation of an on-site LoRaWAN network based on The Things Stack version 3,” Esc. Téc. Sup. Ing. Ind. Telecom., U. Cantabria, Cantabria, Spain, Oct. 2019. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/17087/420136.pdf?sequence=1&isAllowed=y> ↑7, 8

---

### **Jersson A. Quintero**

Electronic engineer from Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia; researcher in the areas of telecommunications, IoT, and automation in environmental processes. He is currently studying Agronomy Engineering at Universidad Nacional de Colombia and works at Universidad Distrital Francisco José de Caldas in the areas of Networking and IT.

Email: [jeaquintero@correo.udistrital.edu.co](mailto:jeaquintero@correo.udistrital.edu.co)

---

### **Hector Parra**

Electronic engineer from Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia; researcher in areas such as telecommunications, telematics, digital signal processing (DSP), and control; Naval Reserve Officer of the National Navy of Colombia; Master in Mechatronics Engineering from Universidad Militar Nueva Granada; and currently studying a PhD in Electrical and Electronic Engineering Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colciencias Bicentennial 2019 Doctoral Excellence Fellow. Engineering professor at Universidad Militar Nueva Granada since 2018.

Email: [hector.parra@unimilitar.edu.co](mailto:hector.parra@unimilitar.edu.co)

---

### **Elvis E. Gaona-García**

BSc in Electronic Engineering. He received MSc degrees in Information Science and Communications at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2001 and 2007, respectively, as well as a PhD degree in Engineering in 2017. He has been a professor at the Department of Engineering of Universidad Distrital Francisco José de Caldas since 2002. He is currently the Director of the Doctoral program in Engineering at Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. He has authored and coauthored more than 100 refereed journal and conference papers, five research books, two book chapters, and three edited books with Elsevier and Springer. His research interests include the applications of artificial intelligence, microgrids, telecommunication systems and image analysis.

E-mail: [egaona@udistrital.edu.co](mailto:egaona@udistrital.edu.co)

# Testing the Causes of a Levee Failure Using Bayesian Networks

*Evaluación de las causas de falla de un dique usando redes bayesianas*

**William García-Feria**<sup>ID</sup>\*<sup>1</sup>, **Julio Colmenares-Montañez**<sup>1</sup>, **German Hernández-Pérez**<sup>ID</sup>\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia (Bogotá-Colombia).

\*Correspondence e-mail: wmgarciaf@unal.edu.co

Recibido: 30/12/2021. Modificado: 18/11/2021. Aceptado: 09/02/2021.

## Abstract

**Context:** Forensic geotechnical engineering aims to determine the most likely causes leading to geotechnical failures. Standard practice tests a set of credible hypotheses against the collected evidence using backward analysis and complex but deterministic geotechnical models. Geotechnical models involving uncertainty are not usually employed to analyze the causes of failure, even though soil parameters are uncertain, and evidence is often incomplete.

**Method:** This paper introduces a probabilistic model approach based on Bayesian Networks to test hypotheses in light of collected evidence. Bayesian networks simulate patterns of human reasoning under uncertainty through a bidirectional inference process known as “explaining away.” In this study, Bayesian Networks are used to test several credible hypotheses about the causes of levee failures. Probability queries and the K-Most Probable Explanation algorithm (K-MPE) are used to assess the hypotheses.

**Results:** This approach was applied to the analysis of a well-known levee failure in Breitenhagen, Germany, where previous forensic studies found a multiplicity of competing explanations for the causes of failure. The approach allows concluding that the failure was most likely caused by a combination of high phreatic levels, a conductive layer, and weak soils, thus allowing to discard a significant number of competing explanations.

**Conclusions:** The proposed approach is expected to improve the accuracy and transparency of conclusions about the causes of failure in levee structures.

**Keywords:** forensic geotechnical engineering, Bayesian Networks, levee failure

**Language:** English

## Open access



Cite as: W. Garcia-Feria, J. Colmenares-Montañez, G. Hernández-Pérez. “Testing the Causes of a Levee Failure Using Bayesian Networks”. *Ing.*, vol. 27, no. 2, 2022. e18538. <https://doi.org/10.14483/23448393.18538>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## Resumen

**Contexto:** La ingeniería geotécnica forense tiene como objetivo determinar las causas más probables que conducen a fallas de tipo geotécnico. La práctica habitual pone a prueba un conjunto de hipótesis a la luz de la evidencia, utilizando análisis retrospectivos y modelos geotécnicos complejos pero deterministas. Los modelos geotécnicos que involucran incertidumbre no suelen emplearse para analizar las causas de falla, a pesar de que los parámetros del suelo son inciertos y la evidencia suele ser incompleta.

**Método:** Este artículo presenta un enfoque de modelo probabilístico basado en redes bayesianas para evaluar hipótesis con base en la evidencia recolectada. Las redes bayesianas simulan patrones de razonamiento humano bajo incertidumbre a través de un proceso de inferencia bidireccional conocido como *explaining away* [explicación]. En este estudio, las redes bayesianas se utilizan para probar hipótesis creíbles sobre las causas de falla de un dique. Para evaluar las hipótesis se utilizan consultas de probabilidad y el algoritmo de explicación más probable (K-MPE).

**Resultados:** El enfoque se empleó en el análisis de un dique en Breitenhagen, Alemania, donde varios estudios forenses anteriores encontraron multiplicidad de explicaciones contrapuestas acerca de las causas de falla. El enfoque permite concluir que la causa más probable de falla fue una combinación de altos niveles freáticos, una capa de suelo de alta permeabilidad y suelos de baja resistencia, lo que permitió descartar un número significativo de explicaciones contrapuestas.

**Conclusiones:** Se espera que el enfoque probabilístico propuesto mejore la precisión y la transparencia de las conclusiones sobre las causas de falla en estructuras tipo dique.

**Palabras clave:** ingeniería geotécnica forense, redes bayesianas, falla de diques

**Idioma:** Inglés

## 1. Introduction

Drawing conclusions about the causes of geotechnical failures can be strongly affected by parameters and model uncertainties. Therefore, conclusions derived from forensic assessments often seem to be arbitrary and controversial. Although forensic analyses follow a rigorous process, the lack of a probability-based framework can lead to costly and inefficient engineering solutions, as well as to the wrong legal decisions.

Graphical probabilistic methods such as Bayesian Networks (BNs) can improve the practice of forensic geotechnical engineering. Their ability to model competing hypotheses about the causes of failure makes them a suitable tool for forensic assessments. BNs have been mainly used in medicine, legal, and forensic science, mostly to support decisions in circumstances where uncertainty or imprecision prevails [1]–[5]. Forensic engineering has partially used BNs for drawing reasonable conclusions about the causes of failures. Several studies, such as those presented in [6]–[9], demonstrate their applicability. Despite the benefits of BNs in forensic engineering, they have not been widely adopted in forensic geotechnical studies [10].

This paper presents a Bayesian Network approach to support decisions in forensic geotechnical assessments. The approach relies on the generic forensic engineering process for failure assessment but incorporates a probabilistic framework to consider parameters and model uncertainties. The Breitenhagen levee failure that occurred in Germany in 2013 is used to validate the proposed BN approach. Data, studies, and some assumptions associated with the Breitenhagen levee failure, which are presented in [11], [12], and [13], are used as a starting point for this study.

The results show that the proposed BN approach can support the forensic geotechnical process. Moreover, the interpretability and traceability of BNs ensure a rational decision based on a probabilistic framework. Therefore, legal decisions and engineering solutions can be supported by more objective conclusions.

## 2. Forensic geotechnical engineering

Forensic geotechnical engineering deals with investigating and communicating the causes of failures attributed to geological/geotechnical aspects [14], [15]. It involves the analysis of cause-effect relationships using the scientific method and some complementary techniques. Most forensic engineering methodologies focus on structural failures [16]. However, very few procedures and guidelines have been adapted to fulfil forensic geotechnical requirements. Among them, there is a methodology for levee failures [12], a conceptual framework proposed in [23], and a modified version of the observational method [24].

From a broader perspective, this process includes four stages [16], [17]: (1) collecting evidence, (2) developing failure hypotheses, (3) testing hypotheses against evidence, and (4) finding the most likely cause of failure. In the first stage, forensic engineers collect all available information to understand the circumstances that led to the failure. Sources of information may include field observations and investigation, traditional and drone photography, working drawings, contract documents, eyewitness interviews, and construction records [16].

The second stage aims to develop credible hypotheses of failure based on the collected evidence. Brady [17] and Bell [25] suggest that conventional design methods used in engineering practices are not suitable for developing credible hypotheses. These methods apply synthesis techniques based on forwarding reasoning. Synthesis could lead to wrong conclusions about the causes of failure because the collected evidence is forced to match biased hypotheses. [20] recommends deductive analysis to investigate the causes of failures, where the collected evidence guides the development of credible hypotheses.

In the third stage, hypotheses about the causes of failure are tested against the collected evidence. Back analysis has been commonly used to accept or reject hypotheses. However, selecting analytical tools and interpreting results from back analysis requires experienced engineers [26], mainly when the failure is represented by complex soil constitutive models and demanding analytical tools.

The fourth stage is the goal of any forensic assessment. A credible cause of failure is reached when all alternative hypotheses are eliminated and only one (or some) match the evidence. Selecting the most likely cause (or causes) of failure is quite a challenging task. Occasionally, the selected cause of failure seems arbitrary or subjective due to large uncertainties in both parameters and models [12], [25] and [20] suggest using the scientific method to overcome subjectivity. The scientific method tests hypotheses against the collected evidence in order to approve or disapprove its validity. In other words, the method reexamines the collected evidence to determine if a hypothesis can explain it.

In forensic geotechnical engineering, [23] and [27] propose some guidelines based on the scientific method. [20] goes further and argues that reliable scientific interpretations about causes of failure should come from statistic and probabilistic analysis. To date, very few forensic engineering assessments use probabilistic tools [13], [28]. Furthermore, [29] recognize the scarcity of previous literature about this topic.

### 3. Bayesian Networks

This section introduces some important concepts regarding Bayesian Networks (BNs). Several standard textbooks, such as [30] and [31], are recommended for an extended introduction. A BN is a probabilistic model that combines probability and graph theories [32]. BNs are used for inference and reasoning under uncertainty due to their ability to simulate human reasoning processes [33]. Forward and backward inference is recognized as a crucial characteristic in BNs. These attributes, along with a rigorous probabilistic background, have led BNs to successful applications [1], [2], [5], [6]. In the technical literature, BNs are also known as Bayesian expert systems, probabilistic graphic networks, belief networks, or Bayes nets.

#### 3.1. Basic definitions

A problem involving reasoning under uncertainty and decision-making can be represented through a causal graph  $G$  (see Fig. 1).  $G$  is a structure consisting of nodes and edges<sup>1</sup>. Nodes represent events or variables, and edges embody causal relationships between nodes [31]. A pair of nodes  $X_i$  and  $X_j$ , belonging to a set of nodes  $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ , can be connected by a directed edge  $X_i \rightarrow X_j$ . When the edges in  $G$  do not form a cycle,  $G$  is known as a directed acyclic graph (DAG). Nodes encode random variables, propositions, or sample spaces. A node can have any number of states in a discrete set or in a continuous set. For example, node  $X_i$  in Fig. 1 has two states  $X_i = \{X_i^0, X_i^1\}$ , whereas the sample space of node  $X_j$  is described by a Gaussian distribution  $X_j \sim N(\mu_{X_j}, \sigma_{X_j})$ .

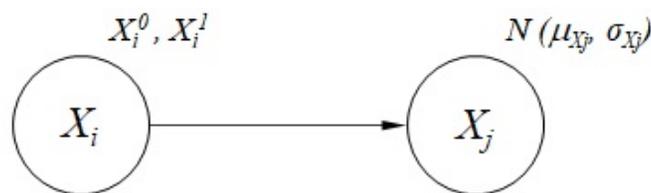


Figure 1. A simple causal graph  $G$

Causal relationships between nodes  $X$  are graphically represented by edges  $E$ . In the context of BNs, causality denotes dependencies between variables or the direct influence of node  $X_i$  on node  $X_j$ . Usually, this influence is not entirely deterministic. Therefore,  $E$  expresses the probabilistic

<sup>1</sup>Graphs are usually denoted as  $G = (V, E)$ , where  $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots\}$  represents the set of vertices and  $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots\}$  represents the set of edges. However, given that, in probabilistic graphical models, each node is associated with a random variable  $X_i$ , the graphs are directly denoted  $G = (X, E)$  with  $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots\}$  and  $X_i$  representing nodes and random variables simultaneously.

influence of  $X_i$  on  $X_j$ . For discrete variables, the influence is represented by a conditional probability table (CPT). In the case of continuous variables, conditional probability distributions (CPD) are employed. A CPT specifies a probability distribution over the states of  $X_j$  given each possible state of  $X_i$ . In more general terms, a CPT encodes  $P(X_j|pa(X_j))$ , where  $pa(X_j)$  represents the set of nodes in  $X$  with edges pointing to  $X_j$ . The term  $pa(X_j)$  is read as parents of  $X_j$ .

A causal graph is defined as a Bayesian Network when all the following conditions are met [30]:

1. Each node has a finite set of mutually exclusive states.
2. The edges do not form a cycle between nodes (*i.e.*, it is a DAG).
3. The strength of the causal relationship between variables is expressed by conditional probabilities tables or distributions (CPTs or CPDs).

### 3.2. Structure of a Bayesian Network

The structure of a BN refers to the type of relationships (connections) between nodes. There are three basic connections in a BN: serial, converging, and diverging. Each type of connection determines which nodes are updated when some evidence is entered in the BN.

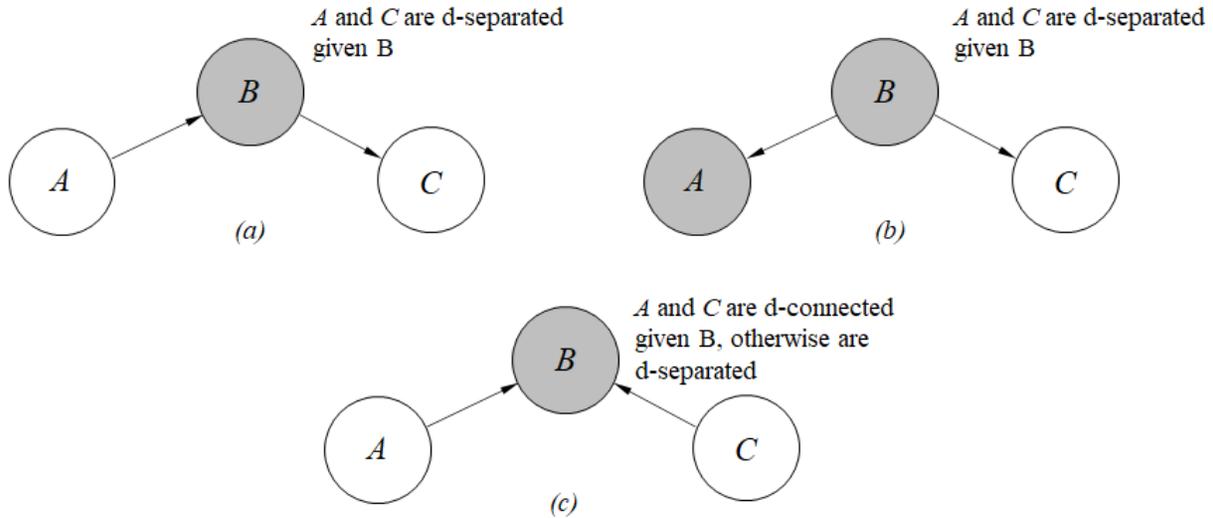
A serial connection between three nodes is shown in Fig. 2a. In this structure, node  $A$  influences  $B$ , which in turn influences  $C$ . If the state of  $A$  is known (*i.e.*,  $A$  is instantiated), it will influence the state of  $C$  through node  $B$ . Similarly, if the state of  $C$  is known, the state of  $A$  will change through  $B$ . On the contrary, if the state of node  $B$  is known, the flow of information between  $A$  and  $C$  is blocked. In this case,  $A$  and  $C$  are *d-separated* given  $B$ .

Fig. 2b presents a diverging connection between three nodes. If some evidence is included in  $B$ , information is transmitted to  $A$  and  $C$ . However, any additional evidence included in  $A$  when  $B$  is instantiated will not be transferred to  $C$ . In this case,  $A$  and  $C$  are *d-separated* given  $B$ , or  $A$  and  $C$  are conditionally independent given  $B$ .

In a converging connection (Fig. 2c), any evidence entered in  $A$  and  $C$  will change the state of node  $B$ . Likewise, any evidence included in  $B$  will change the state of  $A$  and  $C$ . Hence,  $A$  and  $C$  can transmit information between them when  $B$  is instantiated. In other words,  $A$  and  $C$  are *d-connected* given  $B$ . In any other case,  $A$  and  $C$  are *d-separated*.

The power of BNs resides on combining Bayes's rule and the chain rule. These characteristics give BNs the ability for decision-making and abductive reasoning. Bayes's rule states that prior belief about a hypothesis can be modified if some evidence is available. Let us say that  $H$  represents a hypothesis and  $E$  some evidence related to  $H$ . The updated belief about  $H$  given  $E$  can be calculated through Bayes's rule (Eq. 1). In Eq. 1,  $P(H|E)$  represents the posterior (updated) probability of  $H$  given  $E$ ,  $P(E|H)$  the likelihood of the evidence given the hypothesis  $H$ , and  $P(H)$  the prior probability of  $H$ . The term in the denominator is the marginal likelihood, which normalizes the posterior probability.

$$P(H|E) = \frac{p(E|H)p(H)}{\sum_H p(E|H)p(H)} \quad (1)$$



**Figure 2.** Basic connections in BNs: (a) serial connection, (b) diverging connection, (c) converging connection. Grey nodes indicate instantiation

The chain rule reflects the properties of a BN. Let  $X' = \{A, B, C, D, E\}$  be the universe of variables that describe a problem. If  $G_{BN}$  defines a Bayesian network over  $X'$  (Fig. 3), then Eq. (2) represents the conditional probability of  $G_{BN}$ , where  $A$  and  $B$  are parent nodes and  $C, D,$  and  $E$  are children nodes. Eq. (2) can be rewritten in the compact form of Eq. (3). Although a  $G_{BN}$  is sufficient for updating probabilities, BNs with many nodes have a high computational cost. Some efficient algorithms such as junction tree and stochastic simulation considerably reduce this cost.

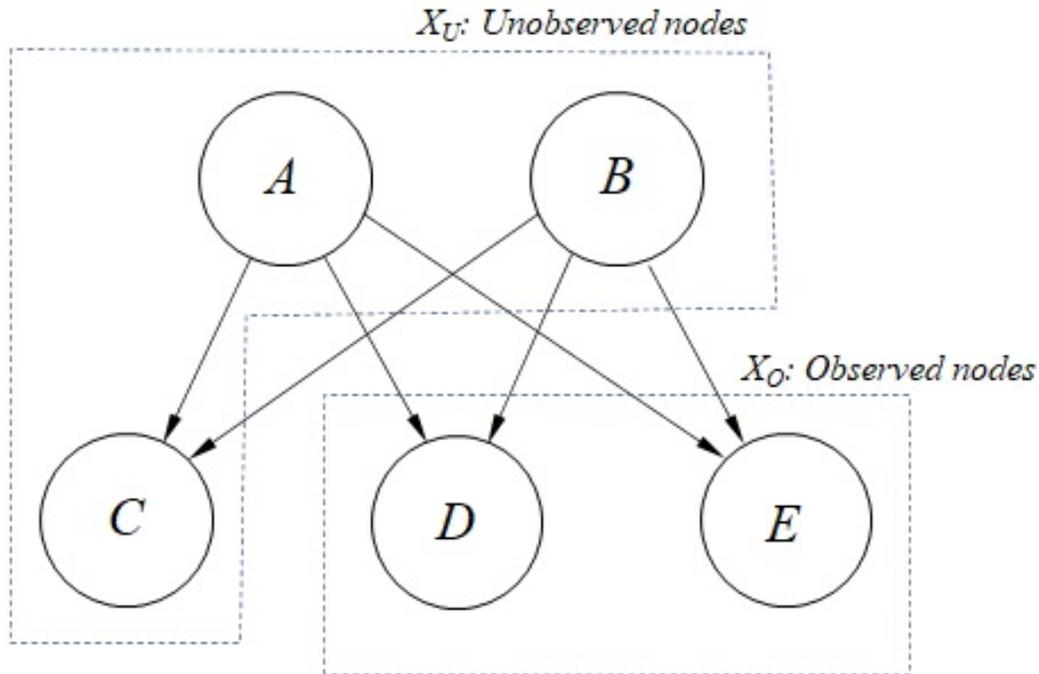
$$P(X') = P(A)P(B)P(C|A, B)P(D|A, B)P(E|A, B) \quad (2)$$

$$P(X') = \prod_{i=1}^N P(X_i|pa(X_i)) \quad (3)$$

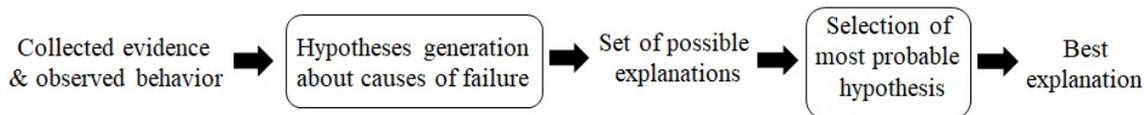
### 3.3. Abductive reasoning in Bayesian Networks

BNs play a significant role in the field of abductive reasoning methods. Abduction refers to generating plausible explanations (hypotheses) for a set of observations (evidence) related to a phenomenon. Fig. 4 presents the abductive process described in [34] adapted to the geotechnical context. Based on the collected evidence and observed behavior, several credible hypotheses are generated. These hypotheses constitute a set of possible explanations for a geotechnical failure (*i.e.*, causes of failure). A BN, along with a metric-based criterion, is used to select the most probable hypothesis (*i.e.*, the best explanation).

Let  $x_o$  be a set of collected evidence for the observed nodes  $X_O$  in a BN (Fig. 3). An explanation is an arrangement of states for the unobserved nodes  $X_U = x_U$  that is consistent with  $x_o$ . Abductive reasoning aims to find the best explanation (*Most Probable Explanation*, MPE) among a set of possible explanations [35]. Eq. (4) defines the MPE in which  $x_U^*$  is a single arrangement of states



**Figure 3.** Example of a BN with five nodes: two parents and three children. Dash lines indicate sets of observed and unobserved nodes.



**Figure 4.** Abductive process [34] adapted to the geotechnical context.

for  $X_U$ . Although the MPE is a useful metric, abductive reasoning is also interested in the *Most Probable Explanations* (K-MPE) [36]. The K-MPE identifies and organizes the most probable states of  $X_U$  according to their joint probabilities.

$$x_U^* = \operatorname{argmax}_{x_U} P(x_U|x_0) \quad (4)$$

## 4. Bayesian Network approach for forensic assessment of a levee failure

Assessing evidence and evaluating competing hypotheses are regarded as challenging tasks [15], [18]. Abductive and probabilistic reasoning can support these tasks through the rigorous mathematical framework of BNs. The five-step approach proposed in this paper is described in the following subsections. In general, the approach defines a set of competing hypotheses about the causes of a levee failure and builds a BN to test them. The collected evidence is included in the BN to assess the hypotheses via an abductive process. The approach identifies the most probable causes of failure (explanations) using the K-MPE metric over the set of credible hypotheses.

## 4.1. The five-step approach

The first step consists of identifying credible hypotheses about the causes of failure. In geotechnical engineering, common failure hypotheses are related to pore water pressures, loading magnitudes, and subsoil conditions [13]. Each credible hypothesis is translated into the BN through a node. Subsequently, several states are assigned to each node according to its characteristics.

The second step defines evidence nodes to the observed or behavioral variables. These nodes can include, among others, stability condition, deformation magnitude, water level elevation, runoff distance, and slip geometry. In some cases, mediating variables could be required to connect hypotheses and evidence nodes. For example, the Factor of Safety (FoS) can be defined as a mediating variable to link a hypothesis node related to the soil strength and an evidence node associated with the stability condition.

Given the set of hypotheses and observed nodes, the next step identifies causal relationships between nodes. Causality is easily identifiable when a physical model of the phenomenon is available. Otherwise, the BN structure can be supported on semantic and syntax substructures known as idioms [37]. It is easily identifiable by expressions such as ‘attributable to, due to, as a consequence of, impact, caused by, resulting in’, among others.

Once the causal graph has been defined (*i.e.*, nodes and edges), the fourth step aims to elicit the conditional probability tables (CPT). This quantitative information can be obtained from mathematical models (*e.g.*, computer simulations) or databases. Expert knowledge can also be used to determine the CPD values. However, analyses with multiple nodes could limit the use of expert knowledge.

The final step involves entering the collected evidence into the BN, updating the nodes, and evaluating the competing hypotheses. In this step, the BN is used to answer questions in the form of conditional probability queries, in other words, to find the probabilities of unobserved nodes given specific states in observed nodes [38]. The K-MPE is a particular type of query that aims to identify the K most likely states of the nodes given some evidence. Its results can be used to draw conclusions about the causes of failure. In this study, hypotheses describing the causes of failure from a forensic perspective are statistically compared by evaluating their likelihoods.

## 5. Application example: the Breitenhagen levee failure

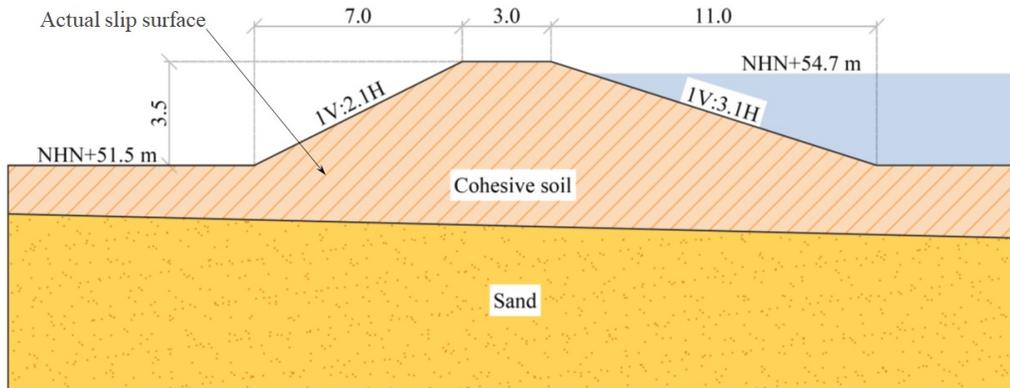
The proposed five-step BN approach was applied to the Breitenhagen levee failure. [12] presented a comprehensive forensic study of this case based on a sensitivity analysis. The failure scenarios and geotechnical models presented in [12] are used to validate the proposed BN approach.

### 5.1. General description

The Breitenhagen levee failure occurred in June 2013 during the Sale River floods in Saxony-Anhalt, Germany. According to [11], the failure was a slope instability due to sustained high water levels in both the Elbe and Saale rivers. The levee at the failure location was 3,5 m high with a

3,0 m wide crest. The slope at the waterside was 1V:3,1H, whereas the slope at the landside was 1V:2,1H.

Fig. 5 presents a cross-section of the levee and a simplified stratigraphy inferred from borings reported in [11]. The levee consists mainly of two soil layers. The upper soil is a homogeneous cohesive material, underlain by a sandy soil at about 5,5 m below the levee's crest.



**Figure 5.** The Breitenhagen levee at the failure location, cross-section, and simplified stratigraphy. NHN (Normalhöhennull) corresponds to the vertical datum used in Germany

Some authors conducted forensic assessments to determine the causes of the Breitenhagen levee failure. For example, [11] concluded that the most likely cause of failure was the existence of a conductive layer inside the levee. [12] used a series of photographs taken at the moment of failure to infer a circular slip surface. These authors also identified a pond by the waterside, indicating a possible connection between the aquifer (sand layer) and the landside. A later study, [13], determined that the failure was likely caused by locally weak soils and high water pore pressures in the aquifer. The proposed BN approach is applied and explained in detail in the following sections.

## 5.2. Step 1. Identification of hypothesis nodes

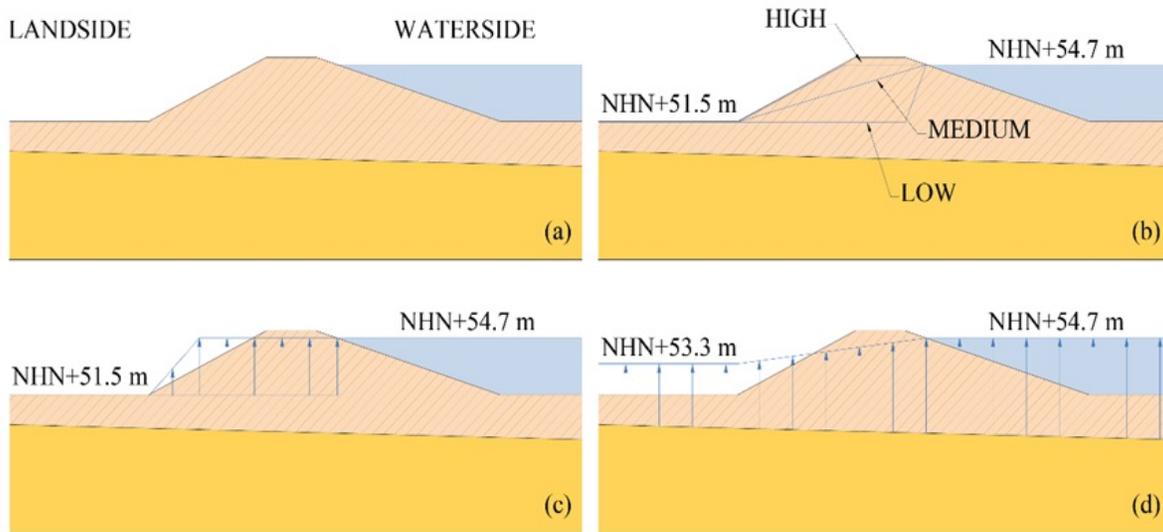
Hypotheses about possible causes of failure are defined using the evidence collected from previous studies [11], [12]. Two sets of hypotheses are identified. The first set includes three hypotheses related to the following pore pressure conditions (Fig. 6):

- phreatic level elevation,
- existence of a conductive layer, and
- existence of high pore pressures inside the levee due to a pond connection.

The second set consists of hypotheses associated with the parameters of two soil models: Mohr-Coulomb for drained conditions and SHANSEP for undrained behavior. The Mohr-Coulomb model includes the parameters  $\phi'$  (effective angle of shear resistance) and  $c'$  (effective cohesion intercept). The SHANSEP model contains the parameters  $S$  (normally consolidated stress ratio),  $m$  (strength increase exponent), and POP (pre-overburden pressure).

A unique node is assigned to each pore pressure condition and each soil parameter. For the sake of simplicity, discrete values are used to describe the set of possible states of each node.

Fig. 6 and Table I summarize the hypothesis nodes used in this study and their corresponding discrete states.



**Figure 6.** Levee models for hypotheses related to pore pressure conditions: (a) basic model, (b) phreatic level elevations, (c) existence of a conductive layer, (d) existence of high pore pressures inside the levee due to a pond connection

**Table I.** Definition of hypothesis nodes and their corresponding states

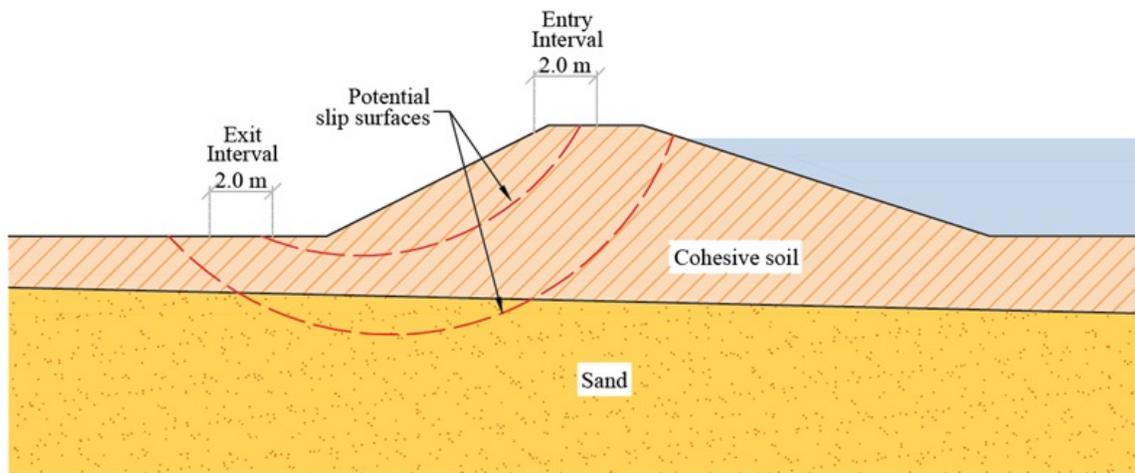
Node	Definition	Distribution	States
PL	Phreatic line elevation	Discrete uniform	High, Medium, Low
CL	High pore pressures inside the levee due to a conductive layer	Discrete uniform	Yes, No
PC	High pore pressures inside the levee due to a pond connection (PC) to the aquifer	Discrete uniform	Yes, No
$c'$	Effective cohesion intercept (Mohr-Coulomb constitutive model) in kPa	Discrete uniform	[0, 1, 2, ..., 15]
$\phi'$	Angle of shear resistance in degrees	Discrete uniform	[15, 16, ..., 33, 34]
S	Normally consolidated stress ratio	Discrete uniform	[0.23, 0.25, 0.27, ..., 0.49]
m	Strength increase exponent	Discrete uniform	[0.50, 0.54, 0.58, ..., 0.98]
POP	Pre-Overburden Pressure	Discrete uniform	[0, 10, 20, ..., 150]

### 5.3. Step 2. Definition of evidence nodes

Two evidence nodes are defined to account for observed or behavioral variables. The first node corresponds to the levee's stability condition. This node includes two states: stable and unstable. The stability condition is usually evident and only requires visual inspection. However, some cases require the evaluation of experienced engineers. For the Breitenhagen failure, the unstable condition was inferred from photographs taken during the event [11]. The consequences of the failure (*e.g.*, floods) may also be used to define the levee's stability condition.

The second evidence node refers to the slip surface geometry. Identifying and measuring slip surfaces is a challenging task. Slip surfaces usually disappear after failure or cannot be fully observed. In some cases, the start and end locations of slip surfaces are identifiable. For the Breitenhagen failure, six start and six end locations were defined. Each location represents a possible interval within which start and end points can be observed.

Fig. 7 presents an example of two entry and exit intervals, as well as two potential circular slip surfaces. A total of 36 start-end point combinations are defined. Table II presents the evidence nodes used in the analysis and their corresponding states.



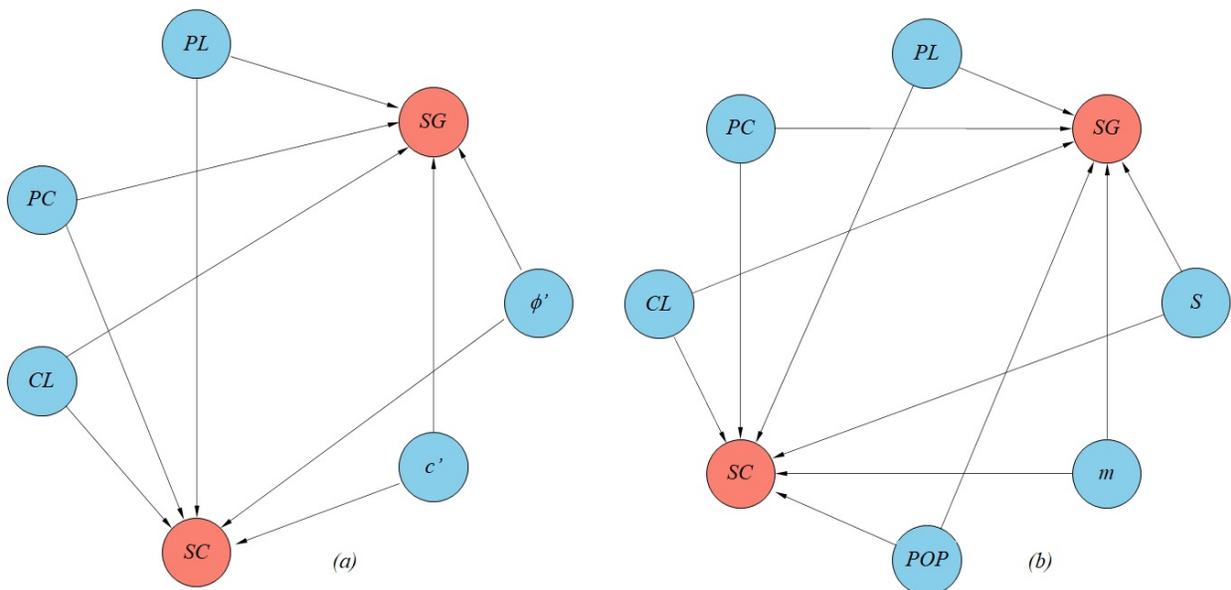
**Figure 7.** Example of potential slip surfaces with entry and exit intervals. Start and end points of slip failures can be observed within these intervals

**Table II.** Definition of evidence nodes and their corresponding states

Node	Definition	Distribution	States
SC	Stability condition	Discrete	Stable, Unstable
SG	Slip surface geometry	Discrete	36 geometries: SG 1 to SG 36 (Locations defined based on levee geometry and circular failure mechanisms)

### 5.4. Step 3. Causal connections

The causal relationships between hypothesis nodes and evidence nodes are defined using mathematical models and semantic substructures. Bishop's limit equilibrium equations are used to infer causal connections between nodes representing soil parameters and evidence nodes. On the other hand, causal connections between hypothesis nodes related to pore pressure conditions and evidence nodes are deduced from semantic substructures. For instance, [12, p. 70] describes the causes of levee failure in the following terms: "the levee breach is likely caused by unexpected high pore pressures [...] and unexpected saturation of the levee". [11, p. 35] (translated from German) describes the causes of failure as follows: "the primary cause of damage is a combination of several partial causes such as [...] horizontal water seepage due to a root zone on the waterside". The causal graphs for both Mohr-Coulomb and SHANSEP models are presented in Fig. 8.



**Figure 8.** Causal graphs for the Breitenhagen failure analysis: (a) Mohr-Coulomb (drained) constitutive model, (b) SHANSEP (undrained) soil model

### 5.5. Step 4. Elicitation of conditional probability distributions

The elicitation of conditional probability tables (CPTs) consists of two phases. The first phase includes the definition of prior probabilities for hypothesis nodes. In the case of Breitenhagen failure, no prior knowledge about the causes of failure is available. Therefore, states for each hypothesis node are equally probable and described by discrete uniform distributions.

The second phase involves eliciting the CPTs for evidence nodes. A numerical experiment consisting of 200.000 Monte Carlo simulations is used to infer these CPTs. In the experiment, a random sequence of states is generated based on the prior probabilities of hypothesis nodes. Each sample from the sequence is tested via a slope stability analysis using D-Stability [39] and a Python script.

Bishop's equations are implemented in the slope stability calculations.

The set of results from the calculations (*i.e.*, stability condition and slope geometry) are used to elicit the CPTs of evidence nodes and described by discrete distributions using the states presented in Table II.

Fig. 9 and Fig. 10 depict the BNs for the Breitenhagen failure along with their prior distributions (*i.e.*, no evidence) for both hypotheses and evidence nodes.

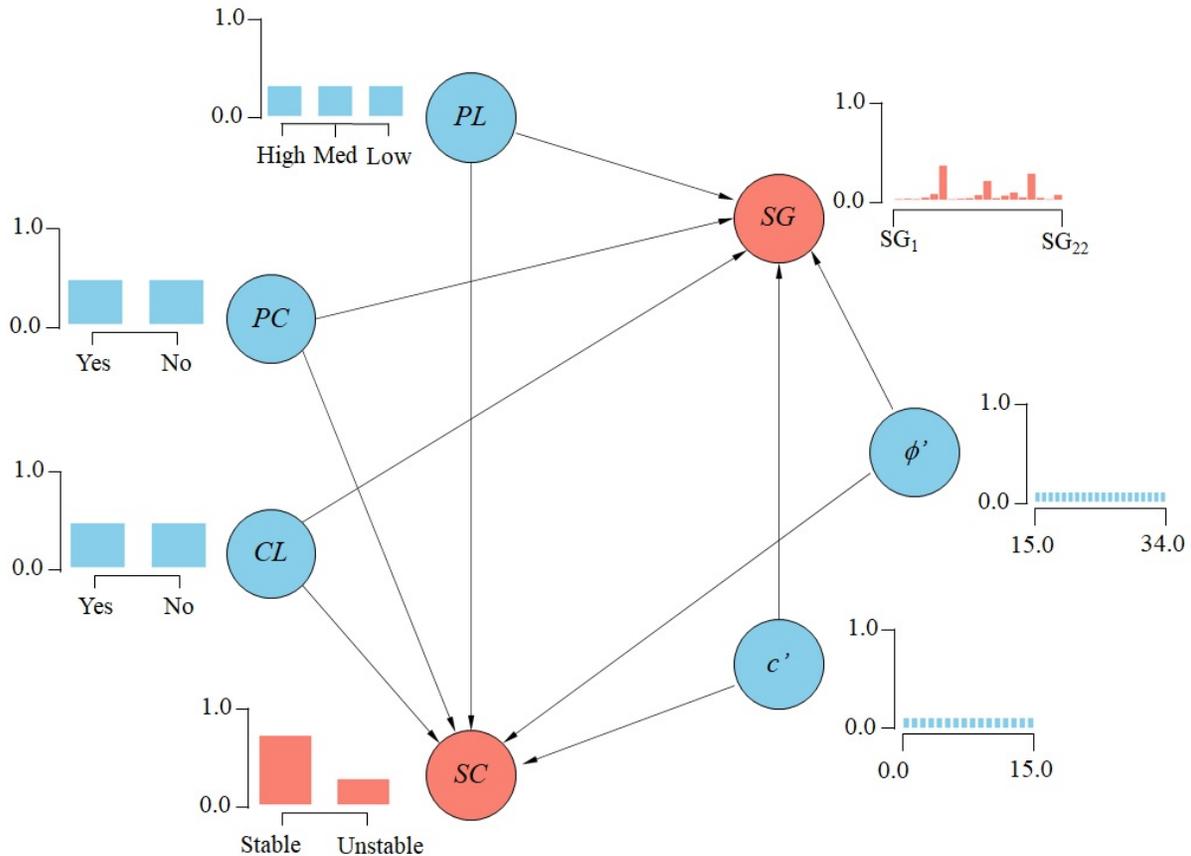


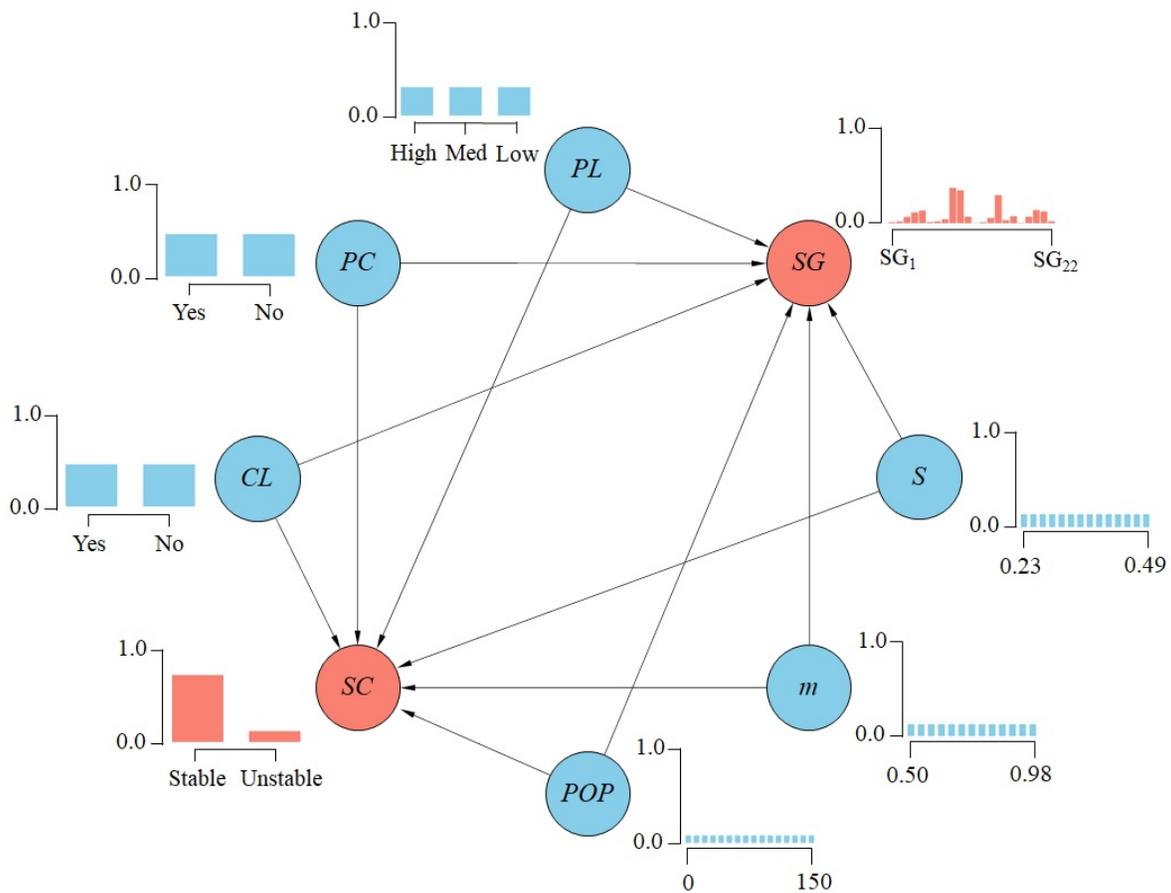
Figure 9. BN for the drained constitutive model (Mohr-Coulomb) before observing any evidence

## 5.6. Step 5. Entering evidence and evaluating competing hypotheses

The set of competing hypotheses is evaluated by entering the available evidence into the BN. The evaluation begins by defining the set of hypotheses. Each competing hypothesis represents a combination of states in the hypothesis nodes. For example, hypothesis H1, defined as a saturated levee, proposes a high phreatic level ( $PL=High$ ) as the cause of failure. For H1, there is no existence of a conductive layer ( $CL=No$ ) nor a pond connection ( $PC=No$ ). Moreover, the soil parameters assume intermediate values. Four additional competing hypotheses similar to H1 are presented in Table III.

**Table III.** Five competing hypotheses about the causes of the Breitenhagen levee failure

Hypothesis	Name	Pore pressure scenarios			Drained behavior		Undrained behavior		
		ST	CL	PC	$\phi'$ (circ)	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	S	m	POP
H1	Saturated levee	High	No	No	22-28	4-10	0,31-0,41	0,62-0,86	20-100
H2	Conductive layer	Medium	Yes	No	22-28	4-10	0,31-0,41	0,62-0,86	20-100
H3	Pond connection	Medium	No	Yes	22-28	4-10	0,31-0,41	0,62-0,86	20-100
H4	Saturated levee + weak soil	High	No	No	< 21	≤ 3	≤ 0,29	≤ 0,62	≤ 20
H5	Conductive layer + weak soil	Medium	Yes	No	≤ 21	< 3	≤ 0,29	≤ 0,62	≤ 20



**Figure 10.** BN for the SHANSEP soil model before observing any evidence

Once the competing hypotheses are defined, a set of probability queries are constructed using the available evidence. Two types of probability queries are identifiable depending on their structure: predictive and abductive. Predictive queries ask about the probability of observing the available evidence, provided that a hypothesis is met. For instance, Eq. (5) represents the probability of observing an unstable condition with the slip geometry  $SG_{12}$ , provided that hypothesis H1 is met.

$$P(SC = Unstable, SG|SG_{12}|ST = High, CL = No, PC = No) \quad (5)$$

On the other hand, abduction queries use the BN to answer questions about the probability of observing a hypothesis given the available evidence. Eq. (6) represents the abduction query for the

probability of observing hypothesis H1, given that the slope is unstable, and the slip failure has a geometry represented by  $SG_{12}$ .

$$P(ST = High, CL = No, PC = No | SC = Unstable, SG = SG_{12}) \quad (6)$$

The competing hypotheses from Table III. are just five out of thousands of available credible hypotheses resulting from combining the states of the hypothesis node.

Given this large number of hypotheses, the K-MPE algorithm is implemented. In this study, the K-MPE algorithm is used to find the best three explanations for the Breitenhagen levee failure.

## 6. Results

Table IV shows the results for the probability queries performed on hypotheses H1 to H5. When the BN is used as a predictive tool, hypothesis H4 better predicts the available evidence than the rest of the hypotheses. In other words, a saturated levee, along with weak soils, is more likely to lead to an unstable condition with the slip geometry  $SG_{12}$ . Fig. 11 depicts the instantiations for the predictive query associated with H4 in drained condition.

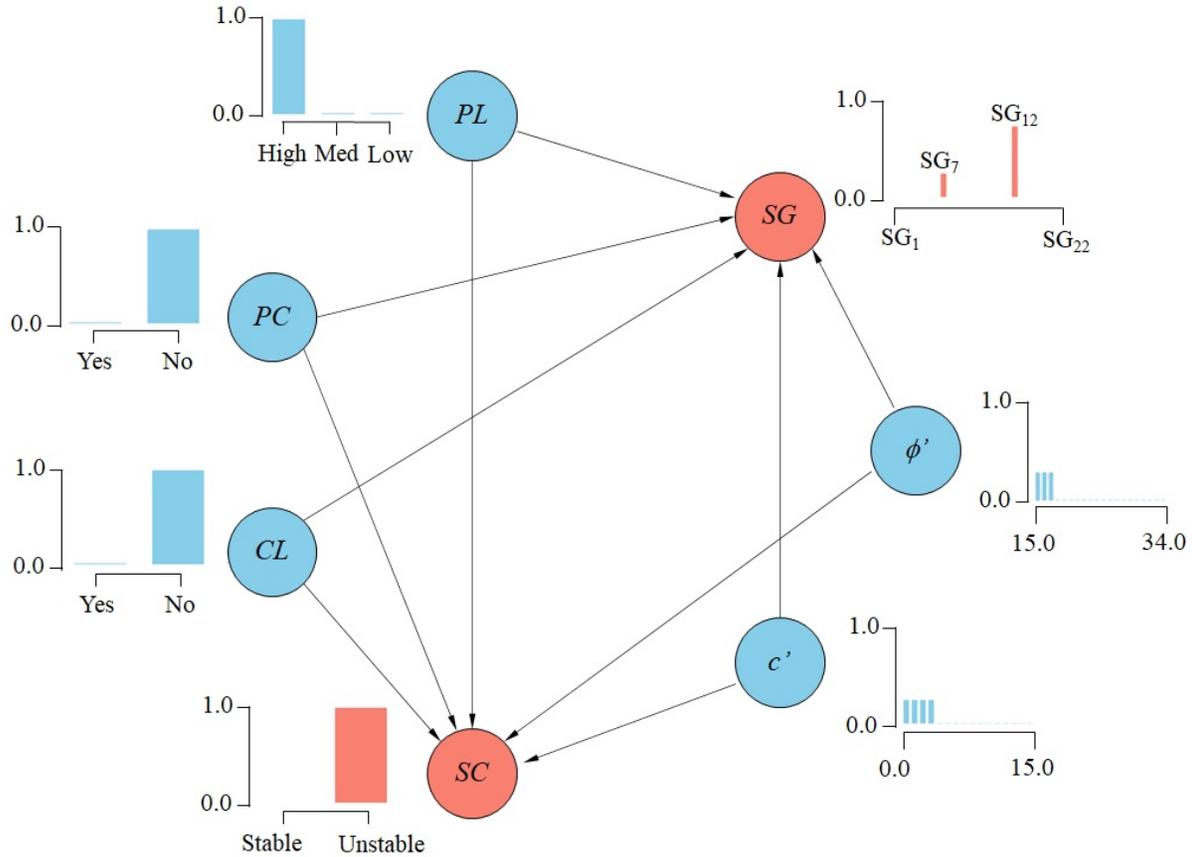
When the BN is used for abductive reasoning, the available evidence ( $SC = Unstable, SG = SG_{12}$ ) is better explained by hypothesis H4 than H1, H2, and H3. However, the probability of hypothesis H5 does not show a significant difference in comparison to H4. Therefore, H5 is also a reasonable explanation for the Breitenhagen levee failure.

**Table IV.** Results for predictive and abductive queries performed on hypotheses H1 to H5

Hypothesis	Name	Predictive queries		Abductive queries	
		P(SC = unstable, SG= $SG_{12}$   Hi)		P(Hi   SC = unstable, SG= $SG_{12}$ )	
		Drained	Undrained	Drained	Undrained
H1	Saturated levee	6,1E-02	1,0E-02	1,3E-02	3,8E-03
H2	Conductive layer	4,2E-02	2,0E-03	7,7E-03	9,0E-04
H3	Pond connection	0,0E-00	0,0E-00	0,0E-00	0,0E-00
H4	Saturated levee + weak soil	7,5E-01	9,4E-01	8,3E-02	4,0E-02
H5	Conductive layer + weak soil	5,0E-01	6,3E-01	6,3E-02	2,7E-02

The K-MPE algorithm was implemented to find the most probable explanations. Table V lists the  $K = 3$  MPE for the drained soil constitutive model, along with the instantiations of the hypothesis nodes. For the drained condition, the best explanation for the levee failure is the existence of a conductive layer and low values of soil strength parameters. Interestingly, the second and third best explanations are also related to low values of  $c'$  and  $\phi'$ . None of the  $K = 3$  MPE includes the pond connection as an explanation for the levee failure.

Table VI lists the  $K = 3$  MPE for the undrained soil constitutive model. In this case, the best explanation is the simultaneous existence of a high phreatic level, a conductive layer, and low POP values. As with the drained condition, a pond connection does not explain the levee failure.



**Figure 11.** Updated nodes for a predictive query associated with H4 (drained condition)

**Table V.**  $K=3$  MPE for the drained soil constitutive model

<b>K</b>	<b>PL</b>	<b>CL</b>	<b>PC</b>	<b>c</b>	<b>fi</b>	<b>P</b>
1	Medium	Yes	No	4	17	4,92E-03
2	High	No	No	1	24	4,79E-03
3	Medium	Yes	No	3	18	4,76E-03

**Table VI.**  $K=3$  MPE for the undrained soil constitutive model

<b>K</b>	<b>PL</b>	<b>CL</b>	<b>PC</b>	<b>S</b>	<b>m</b>	<b>POP</b>	<b>P</b>
1	High	Yes	No	0,33	0,74	20	1,49E-03
2	High	No	No	0,27	0,54	20	1,46E-03
3	High	Yes	No	0,39	0,54	0	1,44E-03

## 7. Discussion

The Bayesian Network approach presented in this study proposes a substantial advance for objectively determining the causes of levee failures. The five steps of the approach quantitatively account for credible hypotheses as causes of failure. Moreover, the collected evidence is transparently included in the process in order to draw conclusions based on probabilistic and abductive reasoning.

To date, little research has been published on the role of Bayesian Networks in investigating causes of geotechnical failures. For example, [13] propose a Bayesian-based method to update prior probabilities of failure scenarios by including collected evidence. However, said approach does not account for multiple or simultaneous causes due to assumptions related to mutual exclusivity in probabilistic analysis. The BN approach overcomes this limitation by assigning a node to each credible hypothesis without restricting the simultaneous occurrence of two or more events.

Other approaches, such as the ones proposed in [10], use BNs to diagnose the causes of failures based entirely on data. The probability relationships (*i.e.*, CPTs) are learned from data without resorting to physical-based models. Although this approach could reach reasonable conclusions, data from failures is scarce and is not always available. The BN approach overcomes these shortcomings by building probability relationships via mathematical models broadly accepted by the geotechnical community.

In this work, the BN approach was applied to the Breitenhagen levee. The results demonstrate the capabilities of BN to draw conclusions about the causes of failure. The most probable explanation seems to be the simultaneous existence of a high phreatic level, a conductive layer, and low soil resistance values. Not surprisingly, this conclusion appears to agree well with previous studies based on sensitivity analysis [12] and traditional forensic analysis [11]. However, the results contradict the findings of [13], which associate the failure with high pore pressures due to a pond connection to an aquifer.

The levee failure assessment using the BN approach is based on several assumptions. For instance, independence between hypothesis nodes is assumed, even though it is known that some soil parameters are correlated. Furthermore, some hypothesis nodes associated with pore water pressures could not be independent in the sense that, for example, a pond connection to an aquifer could lead to a reduction in the phreatic level. In that case, an edge between the two hypothesis nodes should be included. The results obtained from step 4 were used to confirm the independence of the hypothesis nodes. In this case, several BN structures were built using only data obtained from simulations. The best-rated BN structures did not show a correlation between the hypothesis nodes.

Another assumption is that the hypothesis nodes are collectively exhaustive. In other words, the BN encompasses the entire range of possible causes leading to failure, and at least one of them must occur to explain the failure. Other possible causes could be disregarded if they are not included in the BN. Hence, credible hypotheses should be proposed using engineering expertise.

The steady-state condition assumed for pore water pressures is a significant limitation that could lead to erroneous conclusions about the causes of failure [13]. For the Breitenhagen levee failure, the pond connection seems to be irrelevant due to the high impact of the phreatic line position. The three most probable explanations derived from the K-MPE metric corroborate this assumption when comparing their probabilities of occurrence. However, unsteady conditions for piezometric pressures could be relevant. Further research studies could evaluate the influence of transient flow and assess the statistical significance between different failure scenarios using metric criteria such as the Bayes factor or the log likelihood function.

Data from slope stability simulations are used to elicit the CPTs. In this study, the limit equilibrium method and drained/undrained constitutive models (Mohr-Coulomb and SHANSEP) are used. Although finite element methods and unsaturated soil constitutive models could better represent the actual condition of the levee, the computational cost is considerably higher. Consequently, analysis methods and constitutive soil models should be selected based on accuracy requirements, the engineers' experience, and available evidence.

The proposed BN approach can be generalized to any type of forensic geotechnical assessment, including but not restricted to failures in dams, slopes, foundations, and excavations. The results from this study demonstrate its capability for drawing objective conclusions about the causes of geotechnical failures.

## 8. Conclusions

A straightforward Bayesian Network approach to support decisions in forensic geotechnical engineering is presented. The approach follows a five-step sequence that reflects the generic forensic engineering process for failure assessment. Furthermore, it includes the mathematical consistency of Bayesian Networks. BNs can significantly improve the accuracy and transparency of forensic conclusions by supporting their findings on probability and abductive reasoning.

Unlike traditional forensic approaches, competing hypotheses about the causes of failure can be probabilistically compared. Besides, BNs can simultaneously deal with multiple hypotheses and find the most probable explanation to geotechnical failures.

The BN approach is applied to investigate the causes of the Breitenhagen levee failure. Three failure scenarios related to pore water conditions and two soil constitutive models with their corresponding parameters are used as hypotheses about causes of failure. Causal connections between hypothesis nodes and evidence nodes are defined through a mathematical model and common geotechnical idioms. In the case under study, the CPTs were estimated from thousands of slope stability simulations using the states of hypothesis nodes. Evidence collected from failure was used to update the BN through predictive and abductive queries.

The three most probable explanations for the levee failure were estimated using the K-MPE algorithm. A high phreatic level combined with a conductive layer and low soil strength parameters seems to be the most probable cause of failure.

The BN approach can be applied in any forensic geotechnical assessments where several competing hypotheses need to be evaluated. However, the computational effort and time required for calculation could limit its use. Future work should prioritize: 1) building efficient BN structures for describing forensic assessments and 2) extending the BNs approach to analyzing geotechnical failures in foundations, excavations, slopes, and dams.

## References

- [1] F. Taroni, A. Biedermann, P. Garbolino, and C. G. G. Aitken, "A general approach to Bayesian networks for the interpretation of evidence," *Forensic Sci. Int.*, vol. 139, no. 1, pp. 5-16, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2003.08.004> ↑2, 4
- [2] M. Neil, N. Fenton, D. Lagnado, and R. D. Gill, "Modelling competing legal arguments using Bayesian model comparison and averaging," *Artif. Intell. Law*, vol. 27, no. 4, pp. 403-430, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10506-019-09250-3> ↑2, 4
- [3] P. Garbolino and F. Taroni, "Evaluation of scientific evidence using Bayesian networks," *Forensic Sci. Int.*, vol. 125, no. 2-3, pp. 149-155, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(01\)00642-9](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(01)00642-9) ↑2
- [4] A. Biedermann and F. Taroni, "Bayesian networks for evaluating forensic DNA profiling evidence: A review and guide to literature," *Forensic Sci. Int. Genet.*, vol. 6, no. 2, pp. 147-157, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2011.06.009> ↑2
- [5] M. Kwan, R. Overill, K.-P. Chow, H. Tse, F. Law, and P. Lai, "Sensitivity analysis of Bayesian networks used in forensic investigations," *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, vol. 361, pp. 231-243, 2011. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-24212-0\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24212-0_18) ↑2, 4
- [6] G. A. Davis, "Bayesian reconstruction of traffic accidents," *Law. Probab. Risk*, vol. 2, no. 2, pp. 69-89, 2003. <https://doi.org/10.1093/lpr/2.2.6> ↑2, 4
- [7] M. Holický, V. Návarová, R. Gottfried, M. Kronika, J. Marková, and K. J. Miroslav Sýkora, *Basics for assessment of existing structures*, Prague, Czech Rep.: Kolkner Institute, Czech Technical University in Prague, 2013. ↑2
- [8] A. Biedermann, F. Taroni, O. Delemont, C. Semadeni, and A. C. Davison, "The evaluation of evidence in the forensic investigation of fire incidents (Part I): An approach using Bayesian networks," *Forensic Sci. Int.*, vol. 147, no. 1, pp. 49-57, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.04.014> ↑2
- [9] A. Biedermann, F. Taroni, O. Delemont, C. Semadeni, and A. C. Davison, "The evaluation of evidence in the forensic investigation of fire incidents. Part II. Practical examples of the use of Bayesian networks," *Forensic Sci. Int.*, vol. 147, no. 1, pp. 59-69, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.04.015> ↑2
- [10] Y. Xu and L. Zhang, "Diagnosis of Geotechnical Failure Causes Using Bayesian Networks," in *Forensic Geotechnical Engineering*, V. V. S. Rao and G. L. Sivakumar Babu, Eds. New Delhi: Springer India, 2016, pp. 103-112. ↑2, 17
- [11] P. Grubert, "Saaledeich bei Breitenhagen Geotechnische Untersuchungen der Bruchstelle Empfehlungen zur Sanierung," Magdeburg, Ger.: Gesellschaft für Grundbau und Umwelttechnik mbH, 2013. ↑2, 8, 9, 11, 12, 17
- [12] J. J. Kool, W. Kanning, T. Heyer, C. Jommi, and S. N. Jonkman, "Forensic analysis of levee failures: the Breitenhagen case," *Int. J. Geoengin. Case Hist.*, vol. 5, no. 2, pp. 70-92, 2019. <https://doi.org/10.4417/IJGCH-05-02-02> ↑2, 3, 8, 9, 12, 17
- [13] J. J. Kool, W. Kanning, C. Jommi, and S. N. Jonkman, "A Bayesian hindcasting method of levee failures applied to the Breitenhagen slope failure," *Georisk Assess. Man. Risk Eng. Sys. Geohazards*, vol. 15, no. 4, pp. 299-316, 2020. <https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1815213> ↑2, 4, 8, 9, 17
- [14] V. V. S. Rao and G. L. S. Babu, *Forensic Geotechnical Engineering*, India: Springer India, 2016. ↑3
- [15] G. L. S. Babu, "Briefing: Forensic geotechnical engineering," in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Forensic Engineering*, vol. 164, no., 2016, pp. 123-126. <http://dx.doi.org/10.1680/jfoen.16.00025> ↑3, 7
- [16] ASCE, *Guidelines for Failure Investigation*, Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2018. ↑3
- [17] S. P. Brady, "Role of the forensic process in investigating structural failure," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 26, no. 1, pp. 2-6, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000274](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000274) ↑3
- [18] K. L. Carper, Ed., *Forensic engineering*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2000. ↑7
- [19] J. B. Kardon, *Guidelines for forensic engineering practice*, vol. 7, no. 2, VA, USA: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2003. ↑
- [20] R. Noon, *Scientific method: applications in failure investigation and forensic science*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009. ↑3, 4
- [21] R. T. Ratay, Ed., *Forensic structural engineering handbook*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2000. ↑
- [22] K. Terwel, M. Schuurman, and A. Loeve, "Improving reliability in forensic engineering: The Delft approach," *Proc. Inst. Civ. Eng. Forensic Eng.*, vol. 171, no. 3, pp. 99-106, 2018. <https://doi.org/10.1680/jfoen.18.00006> ↑

- [23] H. G. Poulos, "A Framework for Forensic Foundation Engineering," in *Forensic Geotechnical Engineering*, V. V. S. Rao and G. L. Sivakumar Babu, Eds. New Delhi, India: Springer India, 2016, pp. 1-15. ↑3, 4
- [24] J. Spross, F. Johansson, L. K. T. Uotinen, and J. Y. Rafi, "Using observational method to manage safety aspects of remedial grouting of concrete dam foundations," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 34, no. 5, pp. 1613-1630, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0069-8> ↑3
- [25] G. R. Bell, "Engineering investigation of structural failures," in *Forensic Structural Engineering Handbook*, R. T. Ratay, Ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, pp. 211-243, 2000. ↑3
- [26] R. N. Hwang, "Back analyses in forensic geotechnical engineering," in *Forensic Geotechnical Engineering*, V. V. S. Rao and G. L. Sivakumar Babu, Eds. New Delhi, India: Springer India, 2016, pp. 131-143. ↑3
- [27] V. V. S. Rao, "Guidelines for forensic investigation of geotechnical failures," in *Forensic Geotechnical Engineering*, V. V. S. Rao and G. L. Sivakumar Babu, Eds. New Delhi, India: Springer India, 2016, pp. 39-44. ↑4
- [28] M. Holický, J. Marková, and M. Sýkora, "Forensic assessment of a bridge downfall using Bayesian networks," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 30, pp. 1-9, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.12.014> ↑4
- [29] K. K. Phoon, G. L. Sivakumar Babu, and M. Uzielli, "Role of reliability in forensic geotechnical engineering," in *Forensic Geotechnical Engineering*, V. V. S. Rao and G. L. Sivakumar Babu, Eds. New Delhi, India: Springer India, 2016, pp. 467-491. ↑4
- [30] F. V. Jensen and T. D. Nielsen, *Bayesian networks and decision graphs*. New York, NY, USA: Springer, 2007. ↑4, 5
- [31] D. Koller and N. Friedman, *Probabilistic graphical models: principles and techniques*. London, England: The MIT Press, 2009. ↑4
- [32] M. Kwan, K.-P. Chow, L. Frank, and P. Lai, "Reasoning about evidence using Bayesian networks," in *Advances in Digital Forensics IV. DigitalForensics 2008. IFIP — The International Federation for Information Processing*, vol. 285, I. Ray and S. Sheno, Eds., Boston, MA, USA, Springer, 2008, pp. 275-289. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-84927-0\\_22](https://doi.org/10.1007/978-0-387-84927-0_22) ↑4
- [33] N. Fenton and M. D. Neil, *Risk assessment and decision analysis with bayesian networks*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2019. ↑4
- [34] L. M. de Campos, J. A. Gámez, and S. Moral, "Simplifying explanations in Bayesian belief networks," in *International Journal of Uncertainty, Puziness and Knowledge-Based Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 461-489, 2001. <https://doi.org/10.1142/s0218488501000892> ↑6, 7
- [35] J. Pearl, *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1988. ↑6
- [36] B. Seroussi and J. L. Golmard, "An algorithm directly finding the K most probable configurations in Bayesian networks," *Int. J. Approx. Reason.*, vol. 11, no. 3, pp. 205-233, 1994. [https://doi.org/10.1016/0888-613X\(94\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0888-613X(94)90031-0) ↑7
- [37] U. B. Kjærulff, A. L. Madsen, *Bayesian networks and influence diagrams: A guide to construction and analysis*, New York, NY, USA: Springer, 2013. ↑8
- [38] V. K. D. Mohan, P. J. Vardon, M. A. Hicks, and P. H. A. J. M. van Gelder, "Uncertainty tracking and geotechnical reliability updating using Bayesian networks Varenya," in *Proceedings of the 7th International Symposium Geotechnical Safety and Risk (ISGSR)*, 2019, no. December, pp. 978-981. <https://doi.org/10.3850/978-981-11-2725-0> ↑8
- [39] R. van der Meij, "D-Stability. Slope stability software for soft soil engineering," *Deltares*, Sep. 2020. <https://download.deltares.nl/en/download/d-stability/> (accessed Nov. 30, 2020) ↑12

---

## William Mauricio García-Feria

PhD candidate in Civil Engineering, Universidad Nacional de Colombia; Master's in engineering - Geotechnics, Universidad Nacional de Colombia. He belongs to the GENKI (Geotechnical Engineering Knowledge and Innovation) research group.

Email: wmgarciaf@unal.edu.co

---

**Julio Esteban Colmenares-Montañez**

PhD in Engineering, Imperial College of London; Master of Science in Soil Mechanics and Environment, Imperial College of London; professor at Universidad Nacional de Colombia. Director of the GENKI (Geotechnical Engineering Knowledge and Innovation) research group.

Email: jecolmenaresm@unal.edu.co

---

**Germán Jairo Hernández-Pérez**

PhD in Engineering, Computer Science, The University of Memphis; Master's in computer science, The University of Memphis; professor at Universidad Nacional de Colombia. Director of the ALGOS-UN (algorithms and combinatorics) research group.

Email: gjhernandezp@gmail.com

# Instrucciones para los Autores

## Introducción

La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo en una edición futura. Todos los artículos presentados a la revista INGENIERÍA deben ser inéditos. No se publicarán artículos que hayan sido anteriormente publicados o que hubieren sido sometidos por el autor o los autores a otros medios de difusión nacional o internacional para su publicación.

## Clasificación de los artículos

La clasificación de un artículo científico dependerá de la naturaleza del nuevo conocimiento que reporte, lo que nos lleva a plantear la siguiente tipificación:

- **Investigación:** son aquellos que abordan una pregunta sobre un aspecto disciplinar teórico o aplicado, usualmente mediante un estudio científico del comportamiento de un fenómeno o una situación bajo ciertas condiciones de control.
- **Metodología:** estudios enfocados en presentar un nuevo método de solución para una categoría particular de problemas, demostrando resultados favorables en comparación con el estado del arte o de la técnica. Son investigaciones específicamente dedicadas a validar las bondades y desventajas del método que proponen o a realizar caracterizaciones comparativas de varios métodos en dominios disímiles o inexplorados.
- **Revisión:** los que presentan análisis críticos, sistemáticos, delimitados y exhaustivos, sobre los avances, tendencias, resultados positivos y negativos, vacíos y futuras rutas de investigación encontrados en el actual estado del arte o de la técnica.
- **Perspectiva:** aquellos que, recurriendo a fuentes bibliográficas originales y con un discurso argumentativo y controversial, cuestionan el actual estado del arte o de la técnica, proponen visiones alternativas a las corrientes de pensamiento dominantes, critican la vanguardia de la disciplina o instigan un viraje hacia tópicos de investigación abandonados o desentendidos por la comunidad científica. Usualmente más que una reflexión personal, buscan establecer una posición colectiva (de comunidad científica), sustentada en una discusión que combina introspectiva, retrospectiva y prospectiva sobre el asunto en cuestión.
- **Reporte de Caso:** los que buscan divulgar un hallazgo novedoso encontrado durante o posterior a un caso particular de desarrollo tecnológico, que eventualmente podría generalizarse mediante una investigación más amplia (aplicada a más casos) y que por lo tanto ameritan ser conocidos por la comunidad para convocarla en tal sentido. Más que

enfatar en el desarrollo tecnológico o innovación per sé, se enfocan en caracterizar el conocimiento descubierto en el caso de estudio respectivo.

- **Editoriales, Cartas al Editor, Artículo Invitado:** son las únicas categorías que no reportan nuevo conocimiento, sino que discuten temas de interés para la Revista, para su línea editorial o para su comunidad, con un carácter de opinión informada.

Para una mayor información de la explicación y/o diferencias de la anterior clasificación los invitamos a visitar el siguiente enlace “Guía breve de clasificación de artículos en INGENIERÍA”.  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11131/12114>

## Procedimiento para el envío de artículos

Los autores deberán enviar al Editor los siguientes documentos mediante la plataforma Open Journal System (OJS) de la Revista:

- Carta de presentación y originalidad del artículo: el formato de la presente carta se puede descargar en el siguiente enlace:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5087/11961> (Formato PDF)  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11486/12242> (Formato Word)  
La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que aceptan las normas de publicación de la Revista.

- El artículo en formato digital utilizando la plantilla y las normas de presentación que se pueden consultar en el siguiente enlace (instrucciones a los autores):

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/4979/11816> (Formato PDF)  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5233/11815> (Formato Word)  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/9539/10775> (Formato Latex)

- Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

- Debe tener al menos título de maestría.
- Pertener a una institución diferente a la de los autores.
- Haber realizado publicaciones en los últimos tres años.

Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica: [revista\\_ing@udistrital.edu.co](mailto:revista_ing@udistrital.edu.co)

- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5091/6711>

Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>

## **Aspectos a tener en cuenta**

- Se considera un artículo largo cuando tiene más de diez (10) páginas con este formato. Por consiguiente se recomienda tener como límite diez (10) páginas para la elaboración de un artículo. El Comité Editorial podría solicitar a los autores reducir el tamaño del artículo cuando lo considere demasiado largo.
- Los resultados de las evaluaciones de los pares árbitros y las modificaciones que requiera el Comité Editorial serán notificados a los autores a través de la plataforma OJS y al correo electrónico del autor de correspondencia. Los autores deberán enviar nuevamente el artículo con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una, dos o más veces después de presentar el artículo.
- Cuando un artículo no cumple con las condiciones definidas para la revista, el Comité Editorial podría decidir no publicarlo. En este caso, el autor o los autores serán notificados de la decisión.

## **Derechos de autor**

El contenido completo de la licencia Creative Commons, bajo la cual se resguardan los derechos de autor de aquellos que publican en la Revista INGENIERÍA, puede consultarse en: Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0.

# Instructions for authors

## Aim and scope

INGENIERÍA Journal is a scientific publication with a periodicity published every four months by Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Its main goal is to disseminate and discuss advances in research and development in the different areas of engineering through the publication of original unpublished papers.

The intended audience of the Journal is the academic community, researchers, graduates, productive sectors and in general the public interested in all engineering disciplines.

Submitted papers are double-blind peer-reviewed by at least two experts in the field, before being qualified as a candidate to be published. The Editorial Board grounds its acceptance decision on the basis of the recommendations given by the experts and the fulfillment of the editorial policies of the Journal. All papers submitted to INGENIERÍA Journal must be unpublished and not submitted to publication to other journal, although papers previously published in conference proceedings may be considered if substantial extensions are included.

## Types of papers

Papers published in INGENIERIA Journal are classified according to the nature of the new knowledge it reports, as follows:

- **Research:** These are papers that address a question about a theoretical or applied disciplinary aspect, usually through a scientific study of the behaviour of a phenomenon or a situation under certain control conditions.
- **Methodology:** These are papers focusing on presenting a new method of solution for a particular category of problems, demonstrating favorable results compared to the state of the art or technique. They are investigations specifically dedicated to validate the advantages and disadvantages of the method proposed or to perform comparative characterisations of several methods in dissimilar or unexplored domains.
- **Review:** These are papers that present critical, systematic, delimited and exhaustive analyzes on the progress, trends, positive and negative results, gaps and future research routes found in the current state of the art or technique.
- **Perspective:** These are papers that, using original bibliographical sources and argumentative and controversial discourse, question the current state of art or technique, propose alternative visions to dominant currents of thought, criticise the vanguard of the discipline or call for the attention towards research topics abandoned or disregarded by the scientific community. Usually more than a personal reflection, they seek to establish a collective (scientific community) position, based on a discussion that combines introspective, retrospective and prospective on the subject in question.
- **Case Report:** These are papers intending to disclose a novel finding found during or after a particular case of technological development, which could eventually be generalised by a more extensive investigation (applied to more cases) and which therefore deserve to be known by the community. In other words, rather than emphasising on technological development or innovation per se, they focus on characterising preliminary knowledge discovered in the respective case study.

- **Editorials:** Letters to the Editor, Guest Article: These are the only contributions that do not report new knowledge, but discuss topics of interest for the Journal, for its editorial line or for its community, with an informed opinion style.

## Procedure for the submission of papers

Authors should submit to the Editor the following documents using our Open Journal System (OJS) platform:

- Cover letter and originality statement: a template can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5087/11961> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/11486/12242> (Word format)

- The manuscript formatted according to the template and style of the instructions to authors:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/4979/11816> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5233/11815> (Word Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/9539/10775> (Latex Format)

- (Optional) Suggestions of two candidate experts for peer review, complying with:

– Must have a PhD. Degree

– Must belong to an institution other than the authors’

– Have publications in recognised journals in the last two years

- If accepted for publication, the authors must agree with and submit a copyright form that transfers rights for publication. This form can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5091/6711>

## Additional considerations

- Recommended paper length is ten (10) pages. If authors require more pages, they should inform the Editor in advance during the submission process.
- The result of the review process and the reviewers comments would be notified to the authors through the OJS platform and by email to the correspondence author. The result can be “Major correction”, “Minor corrections” or “Rejected”. When corrections are required, authors should resubmit a corrected anonymous manuscript and a companion document explaining the changes made in reply to what comments. Usually, a submitted manuscript would undertake at least two rounds of review. Statistics of average review and production times and other Journal indicators can be seen at:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/index>
- When a submission does not meet the conditions defined for the journal, the Editorial Committee may decide not to publish it. In this case, the authors will be notified of the decision within two (2) weeks from the date of submission.

## **Copyright and publishing cost**

INGENIERÍA Journal distributes the full content of its printed and digital version under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License. No publication costs are charged to the author or author's institutions, nor any payment are made to expert peer reviewers or associated or adjunct editors. INGENIERÍA Journal is funded by Universidad Distrital Francisco José de Caldas, its School of Engineering and its Central Research Office.

## **Code of good conduct in scientific publishing**

INGENIERÍA Journal advocates and defends the universal principles of good conduct in scientific publication, in particular, those referring to respect for the community, respect for the selfless and voluntary work of peer reviewers and editors, as well as respect to intellectual property. Regarding the latter, INGENIERÍA Journal does not tolerate behaviours related to plagiarism of previously published material and strives to honor to the maximum extent the copyrights and patents and reproduction rights. Likewise, the Journal seeks to observe the moral rights of third parties, in addition it will establish the necessary processes to avoid and to resolve the possible conflicts of interest that can exist in the publications.

## **Inappropriate behaviour not tolerated by the journal**

1. Wrongly addressed submission intended to other journal different to INGENIERIA Journal.
2. Plagiarism or self-plagiarism.
3. Simultaneous submission of a manuscript to several journals.
4. Unjustified withdraw of a submitted manuscript due to unfavourable reviews.
5. Unjustified abandonment of submission at any stage of the process: verification of submission conditions, peer-review process or layout and final proof adjustments.

## **Penalties for inappropriate behaviour**

1. Official communication sent to the authors indicating the misconduct, requesting a letter of apology addressed to the Editorial Committee, Scientific and/or peer reviewers.
2. Notification sent to the Colombian Network of Engineering Journals (Red Colombiana de Revistas de Ingeniería) reporting the case of misconduct with evidences.
3. Official communication sent to author's affiliated or financing institutions informing about the misconduct.
4. Retraction of the paper in case it has been published, notifying this decision publicly in the editorial pages of the Journal and in an official letter addressed to the entities of institutional affiliation of the authors.
5. Application of a publication veto to the authors in the Journal during a period determined by the Editorial Board according to the seriousness of the misconduct.
6. Notification of the case and the result of the investigation to the competent authorities, in case the good will of the Universidad Distrital FJC or the INGENIERIA Journal is compromised.

## **Procedure in case of suspicion of plagiarism and duplicate publication**

INGENIERIA Journal will follow the guidelines established by the Publications Ethics Committee (COPE) to handle unethical issues or behaviours:

Suspicion of plagiarism in a submitted manuscript  
<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20A.pdf>

Suspicion of plagiarism in a published paper  
<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20B.0.pdf>

Suspicion of duplicate publication in a submitted manuscript  
<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20A.pdf>  
Suspicion of a duplicate publication in a published paper  
<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20B.0.pdf>

For more information on non-ethical conduct and/or penalties please see:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/7784/11818>