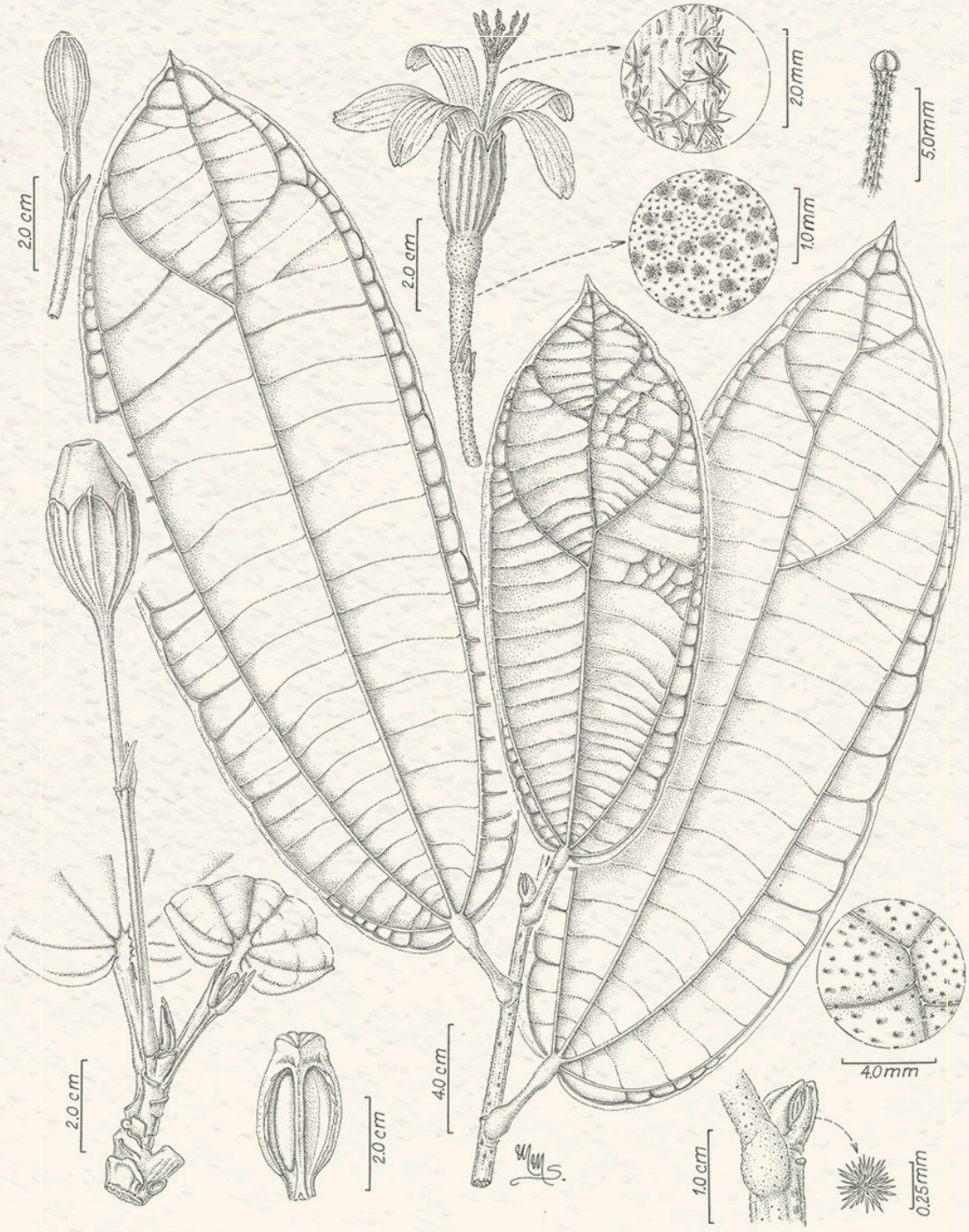
ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

# Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales




Vol. 50 · Número 196 · Págs. 575-924 ·
Julio - Septiembre de 2026 · Bogotá - Colombia

ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

# Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 50 · Número 196 · Págs. 575-924 · Julio - Septiembre de 2026 · Bogotá - Colombia

90 Años
1936 - 2026

## Comité editorial

**Editora**

Elizabeth Castañeda, Ph. D., editora jefe
Investigadora emérita del Instituto Nacional de Salud, Bogotá, Colombia

**Asistente editorial**

Carolina Acosta

**Grupo de apoyo**

Marta Renza, correctora de estilo
Johanna Morales, diagramadora
Bibiana Dimate, Publindex
Pablo Alexander Tenjo, asistente técnico

**Editores asociados**

**Ciencias Biomédicas**

Alberto Gómez, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

John Mario González, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Helena Groot, M.Sc.
Universidad de los Andes, Bogotá

Luis Fernando García, M.D., M. Sc.
Profesor emérito, Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia

Juan G McEwen, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia

Martha Vives, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá

María Mercedes Zambrano, Ph. D.
Corpogen, Bogotá, Colombia

**Ciencias del Comportamiento**

Fernando Cárdenas, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Ana María Groot de Mahecha, M. Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Marisol Lamprea-Rodríguez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

Guillermo Páramo, M.Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

**Ciencias Físicas**

Ángela Stella Camacho-Beltrán, Dr. rer. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Diógenes Campos-Romero, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Román Eduardo Castañeda, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia

Pedro Fernández de Córdoba, Ph. D.
Universidad Politécnica de Valencia, España

María Elena Gómez, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali

Edgar González, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Rafael Julián González-Hernández, Ph. D
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

Juan Gabriel Ramírez, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Jairo Roa-Rojas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Gabriel Téllez, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Horacio Torres, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

**Ciencias Naturales**

Arturo Acero, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Santa Marta, Colombia

Gerardo A. Aymard C, Ph. D.
Universidad Nacional de los Llanos Ezequiel Zamora, Venezuela

Martha R. Campos, M. Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Néstor Hernando Campos-Campos, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe, Colombia

Jaime Cantera, Doctorat d´Etat
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Jairo Castaño-Zapata, Ph. D.
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Juan Manuel Díaz-Merlano, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

John Donato, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

José Luis Fernández-Alonso, Ph. D.
Real Jardín Botánico, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España

Néstor Julio García, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Rocío García-Urueña, Ph. D.
Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

Diego Alonso Giraldo-Cañas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Juan Pablo Gomez-Echeverri, Ph. D.
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

Nicolás Hazzi, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander, Colombia

Álvaro Idárraga-Piedrahita, Ph. D.
Herbario, Fundación Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe De Medellín, Colombia

Luis Eduardo López-Vargas, Ph. D.
Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

Jorge Alberto Molina-Escobar, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

María Eugenia Morales. Ph. D.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja

Natalia Ocampo-Peñuela, Ph. D.
Universidad de California, Santa Cruz, Estados Unidos

Carlos Alberto Parra-Osorio, Ph. D.
Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Jorge Andrés Pérez-Zabala, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Martha Patricia Ramírez-Pinilla, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Orlando Rangel, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Carolina Romero, M. Sc.
Herbarium, Missouri Botanical Garden, Estados Unidos

Silvia Villabona, Ph. D.
Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Antioquia, Colombia

**Ciencias Químicas**

Carmenza Duque-Beltrán, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Luis Fernando Echeverry, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia

Diego Gamba, Ph. D.
Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia

Jesús Humberto Gil-González, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Sonia Moreno-Guaqueta, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Andrés Reyes-Velasco, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Myriam Sánchez de Gómez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

**Ciencias de la tierra**

Germán Bayona, Ph. D.
Corporación Geológica Ares, Bogotá, Colombia

Fabiany Herrera, Ph. D.
Field Museum, Chicago

Carlos Alberto Jaramillo-Muñoz, Ph. D.
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá

Santiago León, Ph. D.
GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, Alemania
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá

Camila Martinez, Ph. D.
Universidad Eafit, Medellín, Colombia

Camilo Montes, Ph. D.
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

José Daniel Pabón, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

José Gregorio Portilla, Ph. D.
Observatorio Astronómico Nacional de Colombia, Bogotá, Universidad Nacional, Colombia

Germán A. Prieto, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Santiago Vargas-Dominguez, Ph. D.
Observatorio Astronómico Nacional de Colombia, Bogotá, Universidad Nacional, Colombia

**Matemáticas**

Luis Carlos Arboleda, Doctor
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Jorge Ivan Cossio-Betancur, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia

Francisco Marcellán, Ph. D.
Escuela Politécnica Superior, Madrid, España

Carlos Enrique Mejía, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia

Fernando León-Saavedra, Ph. D.
Universidad de Cádiz, España

Clara Elena Sánchez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Fernando Zalamea-Traba, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

## Comité científico internacional

- Carlos Jiménez, Ph. D.
  Universidad de La Coruña, España
- Wolfgang Gieren, Ph. D.
  Universidad de Concepción, Chile
- Alfonso Castro, Ph. D.
  Harvey Mudd College, Claremont, CA, EEUU
- Rodolfo Castillo, Ph. D.
  Fort Lauderdale, Florida, EEUU
- José Rubens Pirani Ph. D.
  Universidade de São Paulo, Brazil
- Federico Ardila, Ph. D.
  San Francisco State University, San Francisco, CA, EEUU

  Juan Alfredo Tirao, Ph. D.
  Academia Nacional de Ciencias Córdoba, Argentina
- Pedro Romero, Ph. D.
  Instituto Ludwig de la Universidad de Lausana en Suiza
- Ulrich Paessler, Ph. D.
  Academia de Ciencias de Berlín-Brandenburgo, RFA
- Maria Sagrario Millán, Ph. D.
  Universidad Tecnológica de Tarrasa, España
- Zbigniew Jaroszewicz
  Centro de Fotónica Aplicada, Instituto Tele y Radiotécnico, Instituto Nacional de Telecomunicaciones, Polonia
- José Luis Moran-López, Dr. rer. nat.
  Academia Mexicana de Ciencias, México
- Jean-Pierre Galaup
  Universidad de París Saclay, Francia
- Helena Nader, Ph. D.
  Academia Brasileira de Ciencias, Brasil
- Roberto JJ Williams, Ph. D.
  Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Argentina
- Walter Fernández-Rojas, Ph. D.
  Presidente Academia Nacional de Ciencias, Costa Rica
- Alex Held, Ph. D.
  Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia
- Rafael Radi, M.D.
  Academia de Ciencias de Uruguay

## Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Dialnet
DOAJ
Emerging Sources Citation Index (ESCI)
Latindex
Online Computer Library Center (OCLC)
Publindex, Colciencias
SCOPUS
SciELO, Colombia
Web of Sciences (WoS)
Zentralblatt für Mathematik

Publindex, Minciencias (Convocatoria 977 de 2026), categoría B

**Periodicidad:** trimestral
**Fecha de inicio:** 1936

Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. La Academia no es responsable de las opiniones aquí expresadas.

Reservados todos los derechos. El contenido de la presente publicación no puede ser reproducido integralmente, ni transmitido por ningún procedimiento electrónico, mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética, ni registrado por ningún sistema de recuperación de información, en ninguna forma, ni por ningún medio, sin la autorización por escrito del titular de los derechos de explotación de la misma, y la autorización previa de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.

ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

# Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 50 · Número 196 · Págs. 575-924 · Julio - Septiembre de 2026 · Bogotá - Colombia

90 Años 1936 - 2026

## Contenido - Contents

**Ciencias Biomédicas**
Biomedical Sciences

Original article

***In silico* identification and characterization of transcription factor binding sites upstream of the human PDGF gene**

Identificación y caracterización *in silico* de los sitios de unión a factores de transcripción aguas arriba del gen PDGF humano

*Víctor Eduardo Rojas-Pérez, Eduardo René Parra-Villegas* ..... 582

**Ciencias Físicas**
Physical Sciences

Artículo original

**Influencia del Sol en la clasificación orbital del sistema Tierra-Luna-satélite**

Effect of the Sun on the orbital classification of the Earth-Moon-satellite system

*Fredy L. Dubeibe, Saira F. Mesa, Karen D. Arias-Sandoval* ..... 594

Original article

**Effects of rare-earth and Ca substitution on the structural and electronic properties of *RE*$Ba_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_{7-\delta}$ superconductors**

Efectos de la sustitución de tierras raras y Ca sobre las propiedades estructurales y electrónicas de los superconductores *RE*$Ba_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_{7-\delta}$

*Cesar Camilo Canaria-Camargo, Indry Milena Saavedra-Gaona, Sebastian Amaya-Roncancio, Agueda María Turatti, Jorge Luiz Pimentel-Junior, Carlos Arturo Parra-Vargas, David Arsenio Landinez-Tellez* ..... 610

Artículo original

**Estudio comparativo de la heteroestructura CuO/$CuWO_4$ y los óxidos CuO y $CuWO_4$: validación de aplicaciones fotocatalíticas**

Comparative study of the CuO/$CuWO_4$ heterostructure with CuO and $CuWO_4$ oxides: validating photocatalytic applications

*Angela Mercedes Raba-Páez* ..... 628

**Ciencias Naturales**
Natural Sciences

Artículo original

**Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XIV. Ocho especies nuevas de *Matisia* de Suramérica**

Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XIV. Eight new species of *Matisia* from South America

*José Luis Fernández-Alonso* ..... 645

## Ciencias Naturales
Natural Sciences


Artículo original

**Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XV. Ocho especies nuevas de *Matisia* y *Quararibea* de Suramérica y otras novedades nomenclaturales**

Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XV. Eight new species of *Matisia* and *Quararibea* from South America and other nomenclatural updates

*José Luis Fernández-Alonso* ..... 676

Artículo original

**Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XVI. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia* sect. *Longipedes* y clave para sus especies**

Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XVI. Taxonomic and chorological novelties in *Matisia* sect. *Longipedes* and a key for its species

*José Luis Fernández-Alonso* ..... 708

Artículo original

**Composición taxonómica y riqueza de la avifauna asociada a relictos de bosque seco tropical del departamento de Bolívar, Colombia**

Taxonomic composition and richness of birdlife associated with remnants of tropical dry forest in the department of Bolívar, Colombia

*Giancarlo Romero-Arrieta, Hugo A. Vides-Avilez, Alejandro Henao-Castro* ..... 732

Original article

**Filling gaps in the ornithological knowledge of the south of Serranía de los Yariguíes, Santander, Colombia**

Nuevos aportes al conocimiento ornitológico del sur de la Serranía de los Yariguíes, Santander, Colombia

*Enrique Arbeláez-Cortés, Sergio A. Barreto-Vargas, Laura L. Lozano, Dumar R. Márquez-Correa, Carlos A. Pinto-Quinche, Angélica Rodríguez-Rey, Fernando Rondón González* ..... 747

Artículo original

**Evaluación de impacto en áreas de conservación: retos y una herramienta para aplicar análisis contrafactuales**

Impact evaluation in area-based conservation: challenges and an app for conducting counterfactuals in Colombia

*German Forero-Medina, Felber J. Arroyave, Victor J. Rincón-Parra, Silvia J. Álvarez, Pablo J. Negret* ..... 760

Artículo original

**Composición y distribución vertical de epífitas vasculares, no vasculares y líquenes en el bosque El Mangón, Cauca, Colombia**

Composition and vertical distribution of vascular and non-vascular epiphytes, and lichens in "El Mangón" forest, Cauca, Colombia

*Luis Eduardo López-V, Diego Jesús Macias-Pinto, Yenni Paola Samboni-Ceballos, Daniela Velasco, Jhoy Fleming Córdoba-Calvo* ..... 777

Artículo original

**Evaluación multiparamétrica de la calidad del suelo y la sanidad del cultivo de pitahaya (*Hylocereus megalanthus* y *H. undatus*), sector Huambi, Morona Santiago, Ecuador**

Multiparametric evaluation of soil quality and crop health of pitahaya (*Hylocereus megalanthus* and *H. undatus*), Huambi, Morona Santiago, Ecuador

*Juan Pablo Haro-Altamirano, William Carrillo-Barahona, Carla Haro-Velastegui, Miguel Ángel Osorio-Rivera, José Ángel Antuash-Tsenkush* ..... 790

**Ciencias Naturales**
Natural Sciences

Artículo original
**Estado ecológico del humedal Torca-Guaymaral basado en un índice de integridad biótica desarrollado para la comunidad fitoplanctónica**
Ecological status of the Torca-Guaymaral wetland based on a biotic integrity index developed for the phytoplankton community
*Camilo Fonseca-Barreto, Camilo B. García, Gabriel Pinilla-Agudelo* ..... 804

**Ciencias Químicas**
Chemical Sciences

Original article
**Antioxidant, anti-inflammatory, and antimicrobial activity of a fluid extract and anthocyanidins of *Vaccinium floribundum* Kunth (Mortiño) berries from Cotopaxi**
Actividad antioxidante, antiinflamatoria y antimicrobiana de un extracto fluido y de antocianidinas de bayas de *Vaccinium floribundum* Kunth (Mortiño) de Cotopaxi
*Johana Meneses, Alexis Eras, Dayana Vásquez, María Elena Maldonado* ..... 821

Original article
**Thermodynamic consistency and model correlation of isobaric vapor–liquid equilibria in binary and ternary chloroform, methanol, and benzene systems**
Consistencia termodinámica y correlación de modelos de los equilibrios isobáricos vapor-líquido en sistemas binarios y ternarios de cloroformo, metanol y benceno
*Leonardo Steyman Reyes-Fernández, Elíseo Amado-González, Juan Camilo Restrepo-Vásquez* ..... 837

**Matemáticas**
Mathematics

Artículo original
**Estudio de la estructura y el momento de inercia de los politropos newtonianos**
Study of the structure and moment of inertia of Newtonian polytropes
*Jeisson Armando Cruz-Amaya* ..... 851

Artículo original
**Transformada doble de Laplace *non-conformable* generalizada**
Generalized *non-conformable* double Laplace transform
*Simón Cedeño-Mendoza, Harold David Jarrín, Janneth Velasco-Velasco, Miguel Vivas-Cortez* ..... 873

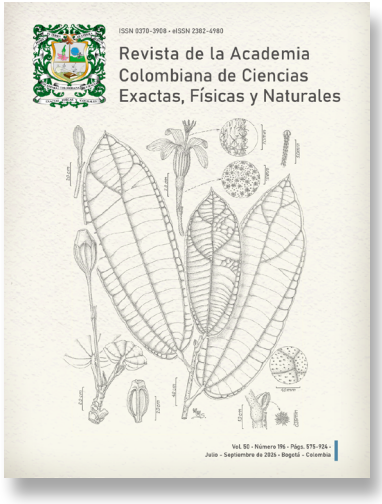
**Ensayo/Assay**
**El renacer del jardín histórico del Observatorio Astronómico Nacional de Colombia**
The revival of the historic garden of the Colombian National Astronomical Observatory
*Germán Darío Álvarez-Lucero, Mario Armando Higuera-Garzón, Santiago Vargas-Domínguez, Julio César Palacios-Rodríguez, Elizabeth Herrera-Nariño, Richard Javier Quitián-Peña, Lizzie Katherine Cordon-López, Gonzalo Jiménez-Vargas, Juan Alexis Acero-Rangel* ..... 896

**Carta a la editora**/Letter to the Editor
**La inteligencia artificial no se ensuciará las manos: ecología, datos y biodiversidad tropical**
Artificial intelligence won't get its hands dirty: ecology, data, and tropical biodiversity
*Alfonso Pineda* ..... 903

**Obituario**/Obituary
Jaime Bernal Villegas, MD PhD ..... 905
Elizabeth Hodson, Ph.D. ..... 907

**Enfoque y alcance**
Focus and Scope ..... 911

## Nuestra portada / Our cover




Se presenta una lámina que ilustra la morfología general de *Matisia sclerophylla* (Malvaceae), un árbol poco conocido, endémico de los bosques pluviales de los departamentos del Cauca y del Valle en el occidente de Colombia. Este hermoso dibujo representado en la portada es un reconocimiento a la gran ilustradora científica colombiana, la bióloga Marcela Morales. En ella se muestran con gran detalle los caracteres distintivos del indumento, las yemas terminales, las hojas coriáceas, las partes florales y los frutos de esta especie, que permiten diferenciarla de sus congéneres de la sección *Longipedes* del género *Matisia*.

Esta especie hace parte de uno de los tres trabajos de avance en la revisión de los géneros *Matisia* y *Quararibea* (Malvaceae) que se incluyen en este número. En ellos se dan a conocer 18 especies nuevas de árboles de Suramérica y se presentan claves para la identificación de las 41 especies conocidas de las secciones *Calyculatae* y *Longipedes* del género *Matisia*.

This publication presents an illustration depicting the general morphology of *Matisia sclerophylla* (Malvaceae), a little-known tree endemic to the rainforests of the Cauca and Valle departments in western Colombia. The beautiful drawing featured on this cover pays tribute to the great Colombian scientific illustrator, biologist Marcela Morales. It shows in great detail the distinctive characteristics of the indumentum, the terminal buds, the leathery leaves, the floral parts, and the fruits of this species, which allow it to be distinguished from its congeners in the section *Longipedes* of the genus *Matisia.*

This species is part of one of the three preliminary studies on the revision of the genera *Matisia* and *Quararibea* (Malvaceae) included in this issue. These studies describe 18 new tree species from South America and present identification keys for the 41 known species in the sections *Calyculatae* and *Longipedes* of the genus *Matisia.*

### Ver artículos/ See articles:

Fernández-Alonso JL. *Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XIV. Ocho especies nuevas de* Matisia *de Suramérica*. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. julio-septiembre 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

Fernández-Alonso JL. *Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XV. Ocho especies nuevas de* Matisia *y* Quararibea *de Suramérica y otras novedades nomenclaturales*. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

Fernández-Alonso JL. *Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XVI. Novedades taxonómicas y corológicas en* Matisia *sect.* Longipedes *y clave para sus especies.* Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4032

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):582-593, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3785

**Biomedical Sciences**

Original article

# *In silico* identification and characterization of transcription factor binding sites upstream of the human PDGF gene

## Identificación y caracterización *in silico* de los sitios de unión a factores de transcripción aguas arriba del gen PDGF humano

**Víctor Eduardo Rojas-Pérez[1,2,*], Eduardo René Parra-Villegas[3]**

[1] Doctorate Program in Translational Biotechnology, Faculty of Agricultural and Forestry Sciences, Catholic University of Maule, Talca, Chile
[2] Department of Biology, Faculty of Science, Velasquez Campus, University of Tarapacá, Arica, Chile
[3] Department of Biomedical Sciences, Faculty of Medicine, Saucache Campus, University of Tarapacá, Arica, Chile

## Abstract

The platelet-derived growth factor (PDGF) and its receptors are vital for a wide range of physiological processes such as development, proliferation, and migration, as well as pathological processes like tumor growth and invasion. Our aim here was to characterize *in silico* novel cis-regulatory elements (CREs) in the promoter sequences of PDGF genes to identify the transcription factors (TFs) associated with these sites. To do so, we retrieved those promoter sequences close to the transcription start site (TSS) from the ExPASy eukaryotic promoter database (EPD) and performed an *in silico* search and prediction of novel CREs in the promoter sequences of PDGF genes; then, we evaluated possible enriched transcription factors for these CREs. Our work demonstrated the co-expression between PDGFB and the transcription factor predicted to bind to the PDGF and POU2F1 in glioblastoma with a moderate correlation between the two ($R^2$=0.24). Similar positive associations were observed for PDGFB with ZNF680 ($R^{2=}$ 0.21) and PDGFB with FOXF1 ($R^{2=}$ 0.32). These findings suggest putative relationships between PDGFB and specific transcription factors in glioblastoma, although functional regulatory interactions remain to be experimentally validated. Overall, the data highlighted selective co-expression patterns involving PDGFB and candidate transcription factors. These observations provide a basis for further investigation of potential transcriptional relationships in glioblastoma biology.

**Keywords:** Cis-regulatory elements; health; bioinformatics; transcription factors; PDGF gene.

## Resumen

El factor de crecimiento derivado de plaquetas (PDGF) y sus receptores son vitales para una amplia gama de procesos fisiológicos como el desarrollo, la proliferación y la migración, así como para procesos patológicos como el crecimiento y la invasión de tumores. El objetivo de nuestro trabajo fue caracterizar *in silico* nuevos elementos reguladores *cis* (CRE) en las secuencias promotoras de genes PDGF para identificar los factores de transcripción (TF) asociados con estos sitios. Para caracterizar los CRE, recuperamos la secuencia promotora cercana al sitio de inicio de la transcripción (TSS) de la base de datos de promotores eucarióticos (EPD) *ExPASy y* realizamos una búsqueda y predicción *in silico* de nuevos CRE en las secuencias promotoras de los genes PDGF. Asimismo, evaluamos posibles factores de transcripción enriquecidos para estos CRE. Nuestro trabajo demostró la coexpresión en el glioblastoma del gen PDGFB y el factor de transcripción POU2F1, el cual se prevé que se una al gen PDGF, con una correlación moderada entre ambos ($R^2$ = 0,24). Se observaron asociaciones positivas similares entre el gen PDGFB y el factor de transcripción ZNF680 ($R^2$ = 0,21) y entre el gen PDGFB y el factor de transcripción FOXF1 ($R^2$ = 0,32). Estos hallazgos sugieren posibles relaciones entre el gen PDGFB y factores de transcripción específicos en el glioblastoma, aunque las interacciones reguladoras funcionales aún deben validarse experimentalmente. En general, los datos ponen de relieve patrones de coexpresión selectivos que involucran al gen PDGFB y a factores de transcripción candidatos. Estas observaciones proporcionan una base para investigar más a fondo las posibles relaciones transcripcionales en la biología del glioblastoma.

**Palabras clave:** elementos reguladores cis; salud; bioinformática; factores de transcripción; genes PDGF.

**Citation:** Rojas-Pérez VE & Parra-Villegas ER. *In silico* identification and characterization of transcription factor binding sites upstream of the human PDGF gene. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):582-593, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3785

**Editor:** Juan McEwen

***Corresponding autor:**
Víctor Eduardo Rojas-Pérez;
victor.rojas.03@alu.ucm.cl

**Received:** December 9, 2025
**Accepted:** June 23, 2026
**Published on line:** August 19, 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

## Introduction

There is considerable evidence that strongly implicates platelet-derived growth factors (PDGFs) as an autocrine and/or paracrine agent in the development of numerous human tumor types (**Chen *et al.***, 2022). PDGFs are potent mitogenic factors (mitogens) that regulate cell growth and division in connective tissue and the developing nervous system. These factors are secreted from many cell types, including platelets, endothelial, epithelial, glial, and inflammatory cells (**Li *et al.***, 2022).

The platelet-derived growth factor (PDGF) family consists of five disulfide-linked dimeric isoforms, PDGF-AA, PDGF-AB, PDGF-BB, PDGF-CC, and PDGF-DD, formed from four polypeptide chains encoded by the genes PDGFA, PDGFB, PDGFC, and PDGFD. These biologically active proteins can exist as homodimers (PDGF-AA, PDGF-BB, PDGF-CC, and PDGF-DD) or heterodimers (PDGF-AB) and share a conserved eight-cysteine residue homology domain known as the PDGF/VEGF homology domain (**Frederike Kramer *et al.***, 2020; **Kardas *et al.***, 2020).

PDGFs exert their biological functions through two class III receptor tyrosine kinases: the platelet-derived growth factor receptors alpha (PDGFRα) and beta (PDGFRβ), displaying distinct binding affinities for receptor combinations (αα, αβ, and ββ). PDGFRα interacts with PDGF-A, -B, and -C isoforms, whereas PDGFRβ preferentially binds PDGF-B and -D, contributing to differences in receptor activation and downstream cellular responses. When these ligands attach to the receptors, they cause their dimerization, and they undergo cross-phosphorylation at intracellular tyrosine residues (**Li *et al.***, 2021).

This phosphorylation event triggers downstream signaling pathways, including PLCγ, PI3K, and JAK-STAT. Through the formation of homo- or heterodimeric receptor complexes, PDGFs promote various cellular responses such as cell proliferation, chemotaxis, actin cytoskeleton reorganization, and the inhibition of apoptosis. In fact, the nuclear factors involved in the gene regulation of PDGFA, PDGFB, PDGFC, and PDGFD genes may vary depending on the cellular context and the type of regulation. However, in the genetic construction of these isoforms, we find some common nuclear factors known to participate in general gene regulation, including the dimeric transcription factor complex activator protein 1 (AP-1), the specific protein 1 (SP1), the nuclear factor kappa B (NF-κB), and other tissue-specific transcription factors (**Parra *et al.***, 2021).

Alternative splicing results in multiple transcript variants, and some miRNAs may regulate the expression of PDGF genes by binding to the 3'UTR regions of their mRNAs. Several reports indicate various anomalies in the PDGF pathway, such as gain-of-function point mutations, activating chromosomal translocations, and overexpression or amplification of PDGF receptors (PDGFRs) (**de Villenfagne *et al.***, 2024). Glioblastoma is a highly aggressive brain tumor where PDGF signaling plays a critical role in tumor progression. Identifying transcription factors that regulate PDGF expression may uncover novel mechanisms sustaining oncogenic pathways.

Our analysis highlights selective co-expression between PDGFB and putative TFs, supporting their consideration as candidate factors for further investigation. These findings provide a rationale for exploring PDGF–TFs networks as therapeutic targets. Thus, our study contributes to understanding transcriptional regulation in glioblastoma and its biomedical relevance.

## Materials and methods

### *Search and promoter regions retrieval*

We retrieved promoter sequences of PDGF-related genes in *Homo sapiens* from EPD, ExPASy eukaryotic promoter database (https://epd.expasy.org/epd) (**Dreos *et al.***, 2017). In the dialogue box on the web page, we selected the PDGFs and the species we searched for (*H. sapiens*). The promoter sequences of PDGF genes (PDGFA: Accession number NM_033023, PDGFB: Accession number NM_033016, PDGFC: Accession number NM_016205, PDGFD: Accession number NM_033135) were extracted using the hg38 version of the human genome as a reference.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):582-593, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3785

To extract the promoter sequence close to the transcription start site (TSS) in PDGF-related genes, we recovered the 1000 bp sequence site close to the TSS. The sequence of interest was located between -700 bp upstream and +300 bp downstream of the TSS site by setting the "Sequence Retrieval Tool" it to -700 bp to +300 pb relative to the TSS and then using the "Get sequence" function on the web page.

***Analysis of regulatory sequences***

To search for cis-regulatory elements (CREs) in the PDGF-related genes' promoter sequences, we used a MEME (Multiple Em for Motif Elicitation) web-based application (http//: memesuite.org/tools/meme) (**Bailey *et al.***, 2015). An expectation maximization algorithm was used to predict cis-regulatory elements, and a position weight matrix model (PWM) was used to determine the frequency of the nucleotides A, C, G, and T at each position in the motif. In the MEME web program, we selected MEME in the section "Motif Discovery", completing the data submission form where we selected the motif discovery mode (Classic mode, in our case); then, we selected the sequence alphabet: DNA, RNA, or Protein and input the primary sequence by copying and pasting the promoter sequence of the PDGFs to be interrogated. We then selected the site distribution using the "Any Number of Repetitions" option to analyze whether there were non-overlapping repeats of the motif sequence. This search yielded more accurate motifs than when using other options of the program. We selected the number of motifs that MEME should find (50 motifs) and pressed the "Start Search" button. We used no additional filters.

In the "Discovered Motifs" section, we submitted the motif to the GOMo program to identify possible roles of the motif using Gene Ontology terms. In the GOMo program, we input the submitted motifs, selected the species *Homo sapiens* (Human), and started the search. GOMo program looks for the enrichment of each motif in the promoters (in regions -1000, +200 bp relative to the TSS) of all the annotated genes in *Homo sapiens* in all promoter sequences in the database using the motif provided to determine whether it is significantly related to genes belonging to one or more Gene Ontology (GO) terms. The resulting significant GO terms can suggest the biological roles of the motif.

Additionally, the response elements obtained were compared with others and analyzed to determine their putative function using the JASPAR database (**Fornes *et al.***, 2020), an open-access database for eukaryotic transcription factor binding profiles (TFBS).

We also used the Tomtom motif comparison tool version 5.1.1 (http://meme-suite.org//tools/tomtom) (**Gupta *et al.***, 2007). This program compares one or more motifs against a database of known transcription factors (e.g., JASPAR). Tomtom ranks the motifs in the database and produces an alignment for each significant match. Finally, the program delivers a result with each motif found to be significantly enriched with some transcription factor.

Briefly, we followed these steps in the Tomtom tool: Step1. The data submission form searched for one or more motifs against a motif database. Step 2. We input query motifs to compare to known motifs and typed in DNA motifs. Step 3. We selected target motifs and a motif database, or provided motifs to compare (JASPAR Non-REDUNDANT DNA and JASPAR CORE 2024 Vertebrates). Step 4. We run the "Search" function for one motif without queuing. Step 5. We input the job details. Step 6 (optional): We chose the advanced search option with Pearson's correlation coefficient and a significance threshold of E-10. Step 7. We started the search.

***Biological validation of the data found***

To demonstrate the biological validity of the transcription factors related to the binding motifs discovered in PDGF genes using this methodology, we added gene expression data in human tissues for the different PDGF genes and predicted transcription factors. These data were retrieved from the public GTEx (The Genotype-Tissue Expression) PORTAL database (https://www.gtexportal.org/home/). In brief, in the 'Expression' tab of the GTEx PORTAL, the 'Search gene/transcript expression' section is displayed, and a 'search gene

ID' dialogue box appears. We typed PDGF and pressed Enter and the gene expression data in tissues for all PDGFs appeared. We also searched in the cBioPortal for Cancer Genomics database (https://www.cbioportal.org/) to demonstrate whether there were correlations between PDGF gene expression and transcription factors predicted to bind to the PDGF motifs found.

On the website, there is a drop-down box labelled 'Data type'. We selected "RNAseq", and there we chose the tissue to search for 'CNS/Brain'; we selected "Glioblastoma (TCGA, cell 2013)" and clicked the "Query By Gene" button. In the section "Select genomic profiles", we ticked the "mRNA expression---enable" first option, i.e., 'mRNA expression z-scores relative to diploid samples (RNA Seq V2 RSEM)' in the "Enter genes" section and wrote PDGFA in the blank space, and then clicked on the "Submit Query" button. On the next page, we selected the 'Co-expression' tab, then entered the name of the transcription factor to search for in the dialogue box (eg: POU2F1).

### *Statistical analysis*

The Tomtom software uses the expected number of false positives in the matches up to this point and estimates the *E*-value by multiplying the *p*-value by the total number of target motifs in all the target databases.

## Results

### *Promoter sequence extraction and analysis of regulatory sequences*

We retrieved the promoter sequences of PDGF-related genes and then analyzed them for cis-regulatory elements (CREs) using a MEME web-based application and the GOMo program to investigate the potential molecular functions of the CREs identified through the enrichment of Gene Ontology (GO) terms. The analysis of these regulatory sequences with the GOMo program revealed 199 CREs in PDGF-related genes, which were identified by searching for the top 50 motifs of each PDGF gene in the MEME program.

The length of the CREs varied between 6 and 15 bp (**Figure 1**). Most of the CREs were 6 bp in length. The CREs found in PDGF-related genes were grouped into different categories according to their predicted term of Gene Ontology and their possible function in some biological process (**Figure 2**). In these categories, olfactory receptor activity was the major process observed, with 18 CREs found, corresponding to 31% of the total, while sensory perception of smell had 16 CREs (27.1%). Other CREs related to tumor processes were found (keratin filament, intermediate filament, positive regulation of protein secretion, calcium-dependent cell-cell adhesion, phosphoinositide 3-kinase activity, and eukaryotic cell surface binding) with an average specificity percentage of 82% (data not shown).

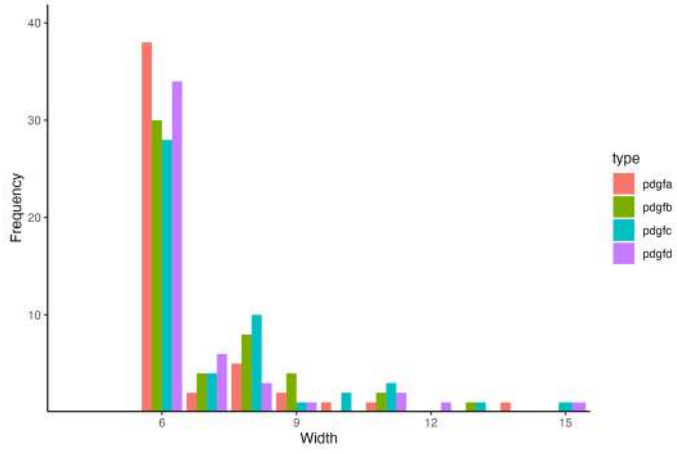



**Figure 1.** Analysis of regulatory sequences in PDGF gene promoters. A total of 199 CREs were found, with lengths varying between 6 and 15 bp.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):582-593, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3785

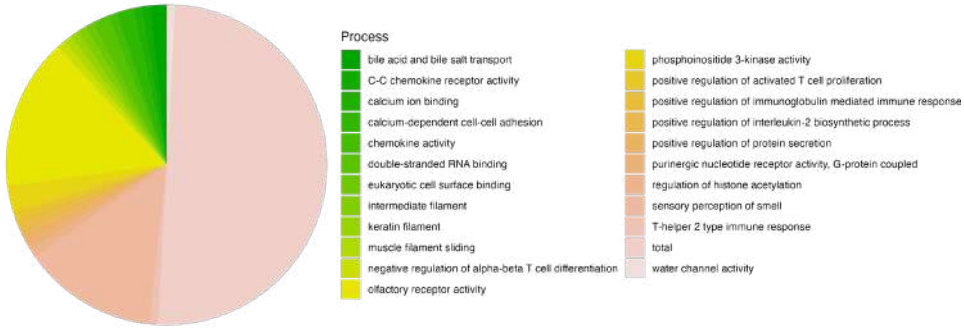



**Figure 2.** Biological processes related to novel CREs found in promoter sequences of human PDGF genes

Many motifs were found in the promoter region of PDGF-related genes, both in the forward (n=299) and reverse (n=106) regions (Figure S1). We also found a repeated pattern of CREs in more than one promoter region of PDGF-related genes. These sites were: GCGGCGGCGGC (position 472 from the forward strand), TCTCCA (position 1 from the forward strand), TCYAGCCT (position -12 from the reverse strand), AGASGGA (position 30 from the forward strand), and AGASSACG (position 207 from the reverse strand).

***Binding sites for transcription factors***

In the comparison of the discovered motifs performed by the Tomtom program, the top five motifs generated by MEME from the promoter sequences of each PDGF gene were selected to search for transcription factors associated with these motifs (**Table 1S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3785/5379). Several transcription factors (TFs) were found to have enrichment in these CREs (**Table 1S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3785/5379). One of these TFs was POU2F1, which has been classified as a homeodomain factor belonging to the *Homo sapiens* species (database: JASPAR2022_CORE_vertebrates_non-redundant_v2). The other transcription factors involved in the CREs discovered are listed below.

***POU2F1***

The UniProt database (https://www.uniprot.org/uniprotkb/P14859/entry) shows that POU2F1 acts as a transcription factor that binds to the octamer motif (5'-ATTTGCAT-3') and activates the promoters of the genes for some small nuclear RNAs (snRNAs) and of genes such as those for histone H2B and immunoglobulins. It modulates transcription transactivation by NR3C1, AR, and PGR (**Préfontaine *et al.***, 1999; **Strubin *et al.***,1995). In the case of human herpes simplex virus (HSV) infection, POU2F1 forms a multiprotein-DNA complex with the viral transactivator protein VP16 and HCFC1, thereby enabling the transcription of the viral immediate early genes (**Wysocka & Herr**, 2003).

***ZNF680***

ZNF680 is a transcription factor classified among the C2H2 zinc finger factors, and it belongs to the species *Homo sapiens* (JASPAR 2022 database). As for its function, it may be involved in DNA binding and transcriptional regulation (**Gaudet *et al.***, 2011).

***HSF1***

The human heat shock factor protein 1, HSF1, functions as a stress-inducible and DNA-binding transcription factor that plays a central role in the transcriptional activation of the heat shock response (HSR), leading to the expression of a large class of molecular chaperones, heat shock proteins (HSPs) that protect cells from cellular insult damage

(**Asano *et al.***, 2016; **Xu *et al.***, 2008). This transcription factor also plays a role in the regulation of mitotic progression (**Y.-J. Lee *et al.***, 2008) and as a negative regulator of non-homologous end joining (NHEJ) repair activity in a DNA damage-dependent manner (**Kang *et al.***, 2015). In relation to tumor biology, HSF1 is involved in stress-induced cancer cell proliferation in an IER5-dependent manner (**Asano *et al.***, 2016).

***POU5F1***

POU5F1 is a transcription factor that binds to the octamer motif (5'-ATTTGCAT-3'). It forms a trimeric complex with SOX2 or SOX15 on DNA and controls the expression of a number of genes involved in embryonic development, such as YES1, FGF4, UTF1, and ZFP206, and it is critical for early embryogenesis and for embryonic stem cell pluripotency (**Takahashi *et al.***, 2007).

***DMRT3***

DMRT3 is a probable transcription factor that plays a role in configuring the spinal circuits controlling stride in vertebrates. It is involved in neuronal specification within a specific subdivision of spinal cord neurons and in the development of a coordinated locomotor network controlling limb movements. It may regulate transcription during sexual development. Besides, DMRT3 is a marker for a subset of spinal cord neurons (**Aleksander *et al.***, 2023).

***Foxf1***

Foxf1 is a fork head/winged helix factor and a probable transcription activator for several lung-specific genes in *Mus musculus* (**Aleksander *et al.***, 2023).

***Elf5***

Elf5 is a tryptophan cluster factor in *Mus musculus*. It is a transcriptional activator that may play a role in regulating the later stages of keratinocytes' terminal differentiation. It binds to DNA sequences containing the consensus nucleotide core sequence GGA[AT]. It also transcriptionally activates the TK promoter (**Zhou *et al.***, 1998; **Choi & Sinha**, 2006).

***Validation of predicted transcription factors and interaction with PDGFs***

The GTEx PORTAL database was used for the biological validation of the relationships between the predicted transcription factors and PDGF genes. The graph in **Figure 3** shows the expression level of PDGF genes expressed in transcripts per million in different human tissues. There is high expression of PDGF genes in tissues of the circulatory system, but there is also significant expression of these genes in nervous tissue, especially when the expression of PDGFA is observed. **Figures 4** and **5** show the level of mRNA expression of transcription factors predicted to bind to PDGF genes in different human tissues. It can be seen that the transcription factors DMRT3, FOXF1, HSF1, POU2F1, POU5F1, and ZNF680 predicted to bind to PDGF genes are significantly expressed in both circulatory system and nervous system tissues, with transcription factors POU2F1 and ZNF680 showing the highest level of transcript expression in the nervous system compared to the other TFs.

We performed an analysis using the cBioPortal for Cancer Genomics to explore potential correlations between PDGF gene expression and transcription factors predicted to interact with the identified PDGF motifs. The search aimed to find correlations in human glioblastoma cells. The database was able to find mRNA expression of PDGFs and predicted TFs in 152 human glioblastoma samples. **Figure 6A** shows the co-expression of mRNA from the PDGFB gene and the transcription factor POU2F1, predicted to bind to PDGF genes, in human glioblastoma cells. A positive correlation was observed between the expression of PDGFB and POU2F1, with a coefficient of determination ($R^2$) of 0.24. This same trend was observed for the co-expression of PDGFB and ZNF680 ($R^{2=}$ 0.21) (**Figure 6B**) and PDGFB and FOXF1 ($R^{2=}$ 0.32) (**Figure 6C**). The remaining transcription factors and PDGFB genes did not show positive correlations in their expression at the mRNA level (data not shown).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):582-593, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3785

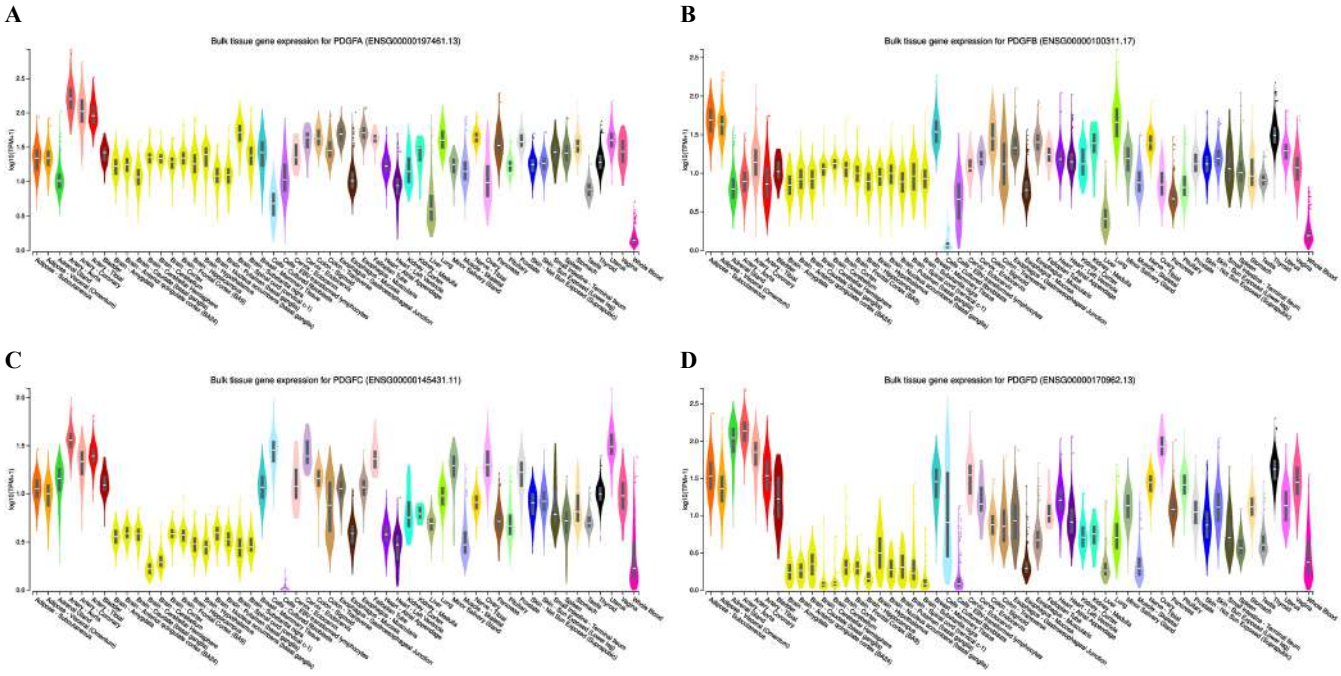



**Figure 3.** Level of mRNA expression of PDGF genes in human tissues. Gene expression RNA-sequence data comes from the public GTEx (The Genotype-Tissue Expression) PORTAL database and are expressed in transcripts per million in different human tissues. **A)** PDGFA, **B)** PDGFB, **C)** PDGFC, **D)** PDGFD

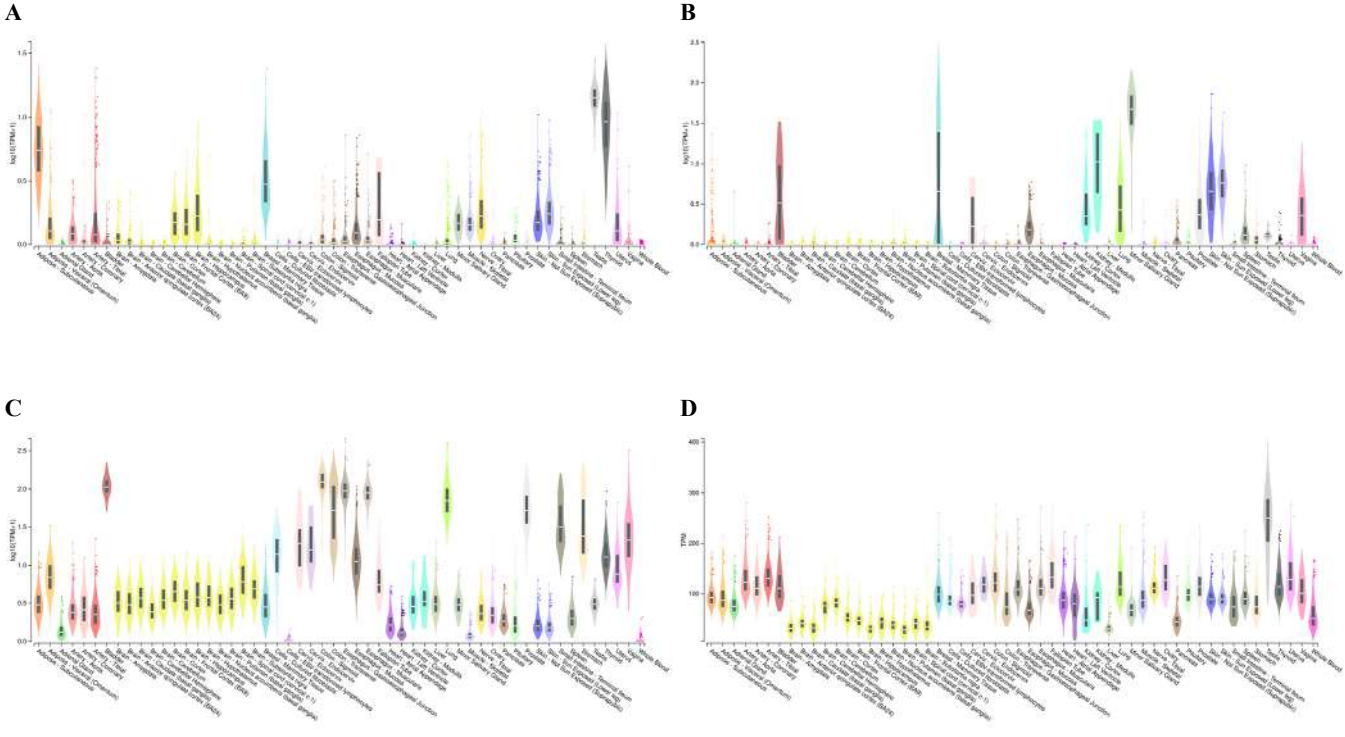



**Figure 4.** Level of mRNA expression of transcription factors predicted to bind to PDGF genes in different human tissues. Gene expression RNA-sequence data come from the public GTEx PORTAL database, and are expressed in transcripts per million. **A)** DMRT3 **B)** ELF5 **C)** FOXF1 **D)** HSF1

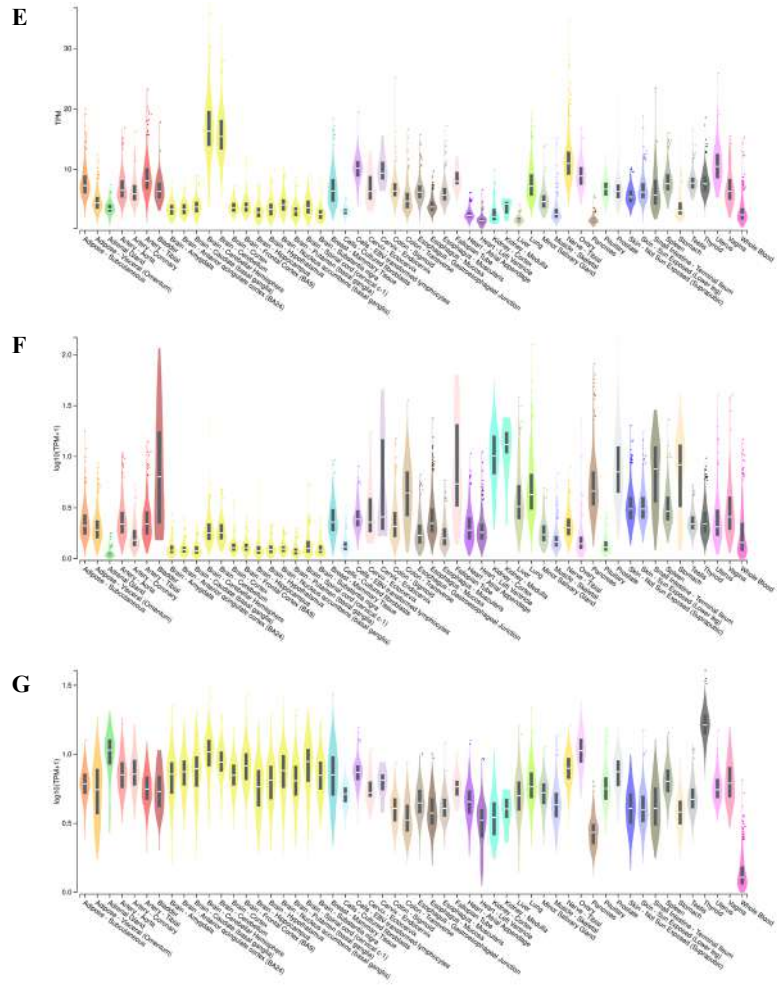



**Figure 5.** Level of mRNA expression of transcription factors predicted to bind to PDGF genes in different human tissues. Gene expression RNA-sequence data come from the public GTEx PORTAL database and are expressed in transcripts per million. **E)** POU2F1 **F)** POU5F1 **G)** ZNF680

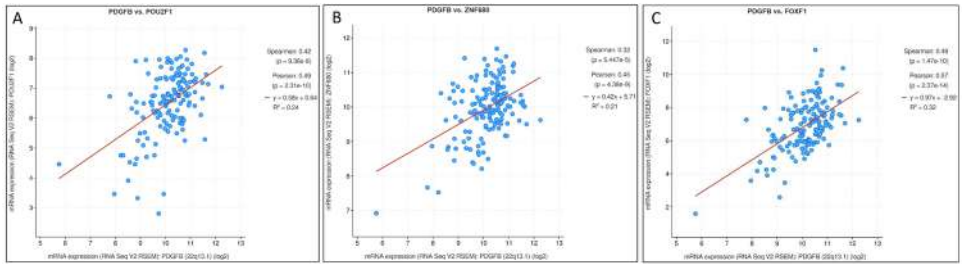



**Figure 6.** Co-expression at the mRNA level (RNA Seq) between PDGFB gene and the transcription factor predicted to join PDGF genes. A) PDGFB v/s POU2F1 B) PDGFB v/s ZNF680 C) PDGFB v/s FOXF1.

Although motif matches identified by Tomtom (**Table 1S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3785/5379) did not meet conventional statistical significance thresholds (E-value < 0.05), these transcription factors were retained as exploratory candidates because independent transcriptomic evidence from GTEx

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):582-593, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3785

demonstrated positive co-expression of POU2F1, ZNF680, and FOXF1 with PDGF (**Figure 6 A-C**). Therefore, motif similarity was not interpreted as confirmatory evidence of TF binding, but rather as a complementary hypothesis-generating approach. The motif enrichment alone was not statistically significant, but the biological plausibility of these TFs was supported by concordant expression patterns in GTEx, where TF expression positively correlated with PDGF expression across relevant tissues.

## Discussion

Platelet-derived growth factors (PDGFs) and platelet-derived growth factor receptors (PDGFRs) play a crucial role in neuronal survival and the growth of the nervous system, and they are expressed in various cell types (**Li *et al.***, 2022). This may explain the presence of CREs with olfactory receptor activity and sensory perception of smell. Moreover, it has been found that PDGFC, a transcription factor expressed in the surface ectoderm and in the germinal layer of the skin, in the olfactory and otic placode and their derivatives, and in the lining of the oral cavity, plays an important role in development (**Ding *et al.***, 2000). On the other hand, the expression of the rat alpha-PDGF receptor in cells other than neuronal cells, such as the olfactory epithelium and the olfactory bulb, has also been reported, which suggests a role of PDGF in glial cell generation (**Lee *et al.***, 1990).

Some motifs found in the PDGF promoter region (**Figure 3**) are repeated in more than one promoter, which may indicate their functional importance. One of the most frequently observed motifs in PDGF promoter sequences is TCYAGCCT, associated with extracellular components that are secreted by the cell (**Aleksander *et al.***, 2023). Another repeated sequence in more than one PDGF promoter is AGASGGA, with the molecular function of DNA-binding transcription factor activity. GACTCA motif, also involved in up-regulation of STAT protein tyrosine phosphorylation, has the potential to activate gene transcription. STAT proteins are known to be involved in the development, progression, and metastasis of several types of cancer, including prostate cancer (**Ebersbach *et al.***, 2021). In this sense, the interaction between PDGF and STAT proteins has been reported: PDGF-BB and PDGF-DD activate the JAK/STAT1/3 cell signaling pathway via PDGFRβ, promoting tumoral growth and invasion through STAT3 protein activation (**Pandey *et al.***, 2023).

As for the CREs associated with cytoskeletal functions found, it has been described that PDGF can alter the flow of calcium into cells, such as human epidermoid carcinoma A431 cells, and produce activation of the cytoskeleton and changes in surface adhesion molecules; the binding of these tumor cells to fibrinogen induces the formation of mixed aggregates that could increase the potential for invasion (**Pulcinelli *et al.***, 1995). In this mechanism, PDGF is released by platelets, and there is an increase in intracytoplasmic Ca2+ content in human epidermoid carcinoma A431 cells that leads to the activation of microfilaments and the emission of membrane extensions, as well as the exposure of integrin molecules. It is believed that this process may unleash a mechanism of cooperation and interaction between A431 cells and platelets. The subsequent binding of fibrinogen or fibronectin to this complex would lead to mixed aggregates of tumor cells and platelets, allowing the transport of tumor cells into the bloodstream (**Pulcinelli *et al.***, 1995). During development, soluble growth factors such as PDGF have a strong effect on mesenchymal cells that causes them to produce extracellular matrix molecules, changing the composition of this tissue and affecting the epithelium in a palate development context (**Ferguson**, 1988).

Regarding the CREs found and their relationship with PI3K activity, we can mention that in rat models of myocardial infarction (MI), *in vitro* results demonstrated that the treatment of bone marrow mesenchymal stem cells (MSCs) with PDGF-BB enhanced the migration of these cells and protected them from hydrogen peroxide ($H_2O_2$)-induced apoptosis. On the other hand, in the *in vivo* rat model of acute myocardial infarction

(AMI), the treatment of MSCs with PDGF-BB and the subsequent transplantation of these cells reduced myocardial apoptosis, promoted neovascularization and tissue repair, and increased cardiac function 30 days after MI. From the molecular point of view, pretreatment with PDGF-BB promoted MSC migration and inhibited $H_2O_2$-induced apoptosis, an effect produced by the activation of the phosphatidylinositol 3-kinase/serine-threonine kinase (PI3K/Akt) pathway (**Sun *et al.***, 2023).

The analysis conducted using the GTEx PORTAL database showed that PDGF genes exhibit strong expression in circulatory tissues and notable expression in nervous tissues. Consistently, transcription factors predicted to bind PDGF motifs (DMRT3, FOXF1, HSF1, POU2F1, POU5F1, ZNF680) are expressed across both systems, with POU2F1 and ZNF680 showing the highest transcript levels in nervous tissue. This demonstrates that PDGF genes and TFs predicted to bind to PDGF are active in different human tissues.

Ultimately, in glioblastoma, PDGFB expression was positively correlated with POU2F1, ZNF680, and FOXF1, suggesting that these transcription factors may contribute to the regulation of PDGF signaling in tumor cells. The absence of significant correlations with other predicted TFs suggests a selective pattern of association, which may be relevant for further investigation of PDGF-related biological processes in glioblastoma.

The transcription factors POU2F1, ZNF680, and FOXF1 emerged as potential regulators of PDGFB, despite the absence of statistically significant motif matches in the Tomtom analysis (Table 1S). While the motif comparison results alone did not provide sufficient evidence to support direct DNA binding, their selection was reinforced by independent expression data obtained from GTEx, which showed positive associations between the expression levels of these transcription factors and PDGFB (**Figure 6A–C**).

Consequently, the motif similarities should be regarded as preliminary observations that may help identify candidate regulatory mechanisms rather than as definitive proof of transcriptional control. The convergence of motif-based predictions and co-expression patterns suggests a possible involvement of these transcription factors in PDGFB-associated regulatory processes in glioblastoma. However, establishing a causal regulatory relationship will require additional experimental studies, including chromatin-binding analyses and functional transcriptional assays, to verify whether these factors directly interact with regulatory regions of PDGFB and influence its expression.

## Conclusions

Our findings indicate selective co-expression patterns between PDGFB and transcription factors such as POU2F1, ZNF680, and FOXF1 in glioblastoma, supporting their consideration as candidate factors for further investigation. However, these observations do not establish direct regulatory interactions, and functional validation through experimental approaches, such as chromatin immunoprecipitation sequencing (ChIP-seq) or promoter reporter assays, will be necessary to determine whether these transcription factors directly regulate PDGFB expression.

## Acknowledgements

The authors would like to thank Universidad de Tarapacá, Project-UTA-Mayor-7707-24, for funding this work.

## Author contributions

Conception and contextualization of the study: VR, EP. Study design: VR, EP. Writing and editing: VR, EP. Data analysis and visualization: VR.

## Conflicts of interest

The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

The data used for the analyses described in this manuscript were obtained from the GTEx Portal on 01/11/2025 and/or CBioPortal on 101/11/2025.

## Availability of data

Figshare repository:
https://doi.org/10.6084/m9.figshare.32519628
https://doi.org/10.6084/m9.figshare.32518158

## Supplementary information

See the supplementary information in https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3785/5379

## References

**Aleksander, S. A., Balhoff, J., Carbon, S., Cherry, J. M., Drabkin, H. J., Ebert, D., Feuermann, M., Gaudet, P., Harris, N. L., Hill, D. P., Lee, R., Mi, H., Moxon, S., Mungall, C. J., Muruganugan, A., Mushayahama, T., Sternberg, P. W., Thomas, P. D., Van Auken, K., Ramsey, J., Siegele, D. A., Chisholm, R. L., Fey, P., Aspromonte, M. C., Nugnes, M. V., Quaglia, F., Tosatto, S., Giglio, M., Westerfield, M.** (2023). The Gene Ontology knowledgebase in 2023. *Genetics*, *224*(1), 1-14. https://doi.org/10.1093/genetics/iyad031

**Asano, Y., Kawase, T., Okabe, A., Tsutsumi, S., Ichikawa, H., Tatebe, S., Kitabayashi, I., Tashiro, F., Namiki, H., Kondo, T., Semba, K., Aburatani, H., Taya, Y., Nakagama, H., & Ohki, R.** (2016). IER5 generates a novel hypo-phosphorylated active form of HSF1 and contributes to tumorigenesis. *Scientific Reports*, *6*, 19174. https://doi.org/10.1038/srep19174

**Bailey, T. L., Johnson, J., Grant, C. E., Noble, W. S.** (2015). The MEME Suite. *Nucleic Acids Research*, *43*(W1), W39-W49. https://doi.org/10.1093/nar/gkv416

**Chen, X., Liu, L., Liu, P., Chen, Y., Lin, D., Yan, H., Yan, Q., Wang, Y., Qiu, Y., Fang, B., Huang, H., Qian, J., Zhao, Y., Du, Z., Zhang, Q., Li, X., Zheng, X., & Liu, Z.** (2022). Discovery of Potent and Orally Bioavailable Platelet-Derived Growth Factor Receptor (PDGFR) Inhibitors for the Treatment of Osteosarcoma. *Journal of Medicinal Chemistry*, *65*(7), 5374-5391. https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.1c01732

**Choi, Y. S. & Sinha, S.** (2006). Determination of the consensus DNA-binding sequence and a transcriptional activation domain for ESE-2. *The Biochemical Journal*, *398*(3), 497-507. https://doi.org/10.1042/BJ20060375

**de Villenfagne, L., Sablon, A., Demoulin, J.-B.** (2024). PDGFRA K385 mutants in myxoid glioneuronal tumors promote receptor dimerization and oncogenic signaling. *Scientific Reports*, *14*(1), 7204. https://doi.org/10.1038/s41598-024-57859-5

**Ding, H., Wu, X., Kim, I., Tam, P. P. L., Koh, G. Y., Nagy, A.** (2000). The mouse PDGFC gene: Dynamic expression in embryonic tissues during organogenesis. *Mechanisms of Development*, *96*(2), 209-213. https://doi.org/10.1016/S0925-4773(00)00425-1

**Dreos, R., Ambrosini, G., Groux, R., Perier, R. C., Bucher, P.** (2017). The eukaryotic promoter database in its 30th year: Focus on non-vertebrate organisms. *Nucleic Acids Research*, *45*(D1), D51-D55. https://doi.org/10.1093/nar/gkw1069

**Ebersbach, C., Beier, A. M. K., Thomas, C., Erb, H. H. H.** (2021). Impact of STAT proteins in tumor progress and therapy resistance in advanced and metastasized prostate cancer. *Cancers*, *13*(19), 1-20. https://doi.org/10.3390/cancers13194854

**Ferguson, M. W. J.** (1988). Palate development. *Development*, *103*(SUPPL.), 41-60. https://doi.org/10.1242/dev.103.supplement.41

**Fornes, O., Castro-Mondragon, J. A., Khan, A., Van Der Lee, R., Zhang, X., Richmond, P. A., Modi, B. P., Correard, S., Gheorghe, M., Baranašić, D., Santana-Garcia, W., Tan, G., Chèneby, J., Ballester, B., Parcy, F., Sandelin, A., Lenhard, B., Wasserman, W. W., & Mathelier, A.** (2020). JASPAR 2020: Update of the open-Access database of transcription factor binding profiles. *Nucleic Acids Research*, *48*(D1), D87-D92. https://doi.org/10.1093/nar/gkz1001

**Frederike Kramer, Jens Dernedde, Artur Mezheyeuski, Rudolf Tauber, Patrick Micke, Kai Kappert.** (2020). Platelet-derived growth factor receptor β activation and regulation in murine myelofibrosis. *Haematologica*, *105*(8 SE-Articles), 2083-2094. https://doi.org/10.3324/haematol.2019.226332

**Gaudet, P., Livstone, M. S., Lewis, S. E., Thomas, P. D.** (2011). Phylogenetic-based propagation of functional annotations within the Gene Ontology consortium. *Briefings in Bioinformatics*, *12*(5), 449-462. https://doi.org/10.1093/bib/bbr042

**Gupta, S., Stamatoyannopoulos, J. A., Bailey, T. L., Noble, W. S.** (2007). Quantifying similarity between motifs. *Genome Biology*, *8*(2), article number R24. https://doi.org/10.1186/gb-2007-8-2-r24

**Kang, G.-Y., Kim, E.-H., Lee, H.-J., Gil, N.-Y., Cha, H.-J., Lee, Y.-S.** (2015). Heat shock factor 1, an inhibitor of non-homologous end joining repair. *Oncotarget*, *6*(30), 29712-29724. https://doi.org/10.18632/oncotarget.5073

**Kardas, G., Daszyńska-Kardas, A., Marynowski, M., Brząkalska, O., Kuna, P., Panek, M.** (2020). Role of Platelet-Derived Growth Factor (PDGF) in Asthma as an Immunoregulatory Factor Mediating Airway Remodeling and Possible Pharmacological Target. *Frontiers in Pharmacology*, *11*. https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00047

**Lee, K.-H., Bowen-Pope, D. F., Reed, R. R.** (1990). Isolation and Characterization of the α Platelet-Derived Growth Factor Receptor from Rat Olfactory Epithelium. *Molecular and Cellular Biology*, *10*(5), 2237-2246. https://doi.org/10.1128/mcb.10.5.2237-2246.1990

**Lee, Y.-J., Kim, E.-H., Lee, J. S., Jeoung, D., Bae, S., Kwon, S. H., Lee, Y.-S.** (2008). HSF1 as a mitotic regulator: phosphorylation of HSF1 by Plk1 is essential for mitotic progression. *Cancer Research*, *68*(18), 7550-7560. https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-08-0129

**Li, D., Huang, L. T., Zhang, C. P., Li, Q., Wang, J. H.** (2022). Insights Into the Role of Platelet-Derived Growth Factors: Implications for Parkinson's Disease Pathogenesis and Treatment. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *14*, 1-30. https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.890509

**Li, T., Guo, T., Liu, H., Jiang, H., Wang, Y.** (2021). Platelet-derived growth factor-BB mediates pancreatic cancer malignancy via regulation of the Hippo/Yes-associated protein signaling pathway. *Oncology Reports*, *45*(1), 83-94. https://doi.org/10.3892/or.2020.7859

**Pandey, P., Khan, F., Upadhyay, T. K., Seungjoon, M., Park, M. N., Kim, B.** (2023). New insights about the PDGF/PDGFR signaling pathway as a promising target to develop cancer therapeutic strategies. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, *161*, 114491. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.114491

**Parra, E., Rojas, V., Ferreira, J., Hecht, P.** (2021). Differential effects of Platelet-derived growth factor on c-Jun-N-Terminal Kinase and AP-1/ NF-kB activities in human glioblastoma T98G cells. *Trends in Medicine*, *21*(4), 1-7. https://doi.org/10.15761/tim.1000277

**Préfontaine, G. G., Walther, R., Giffin, W., Lemieux, M. E., Pope, L., Haché, R. J.** (1999). Selective binding of steroid hormone receptors to octamer transcription factors determines transcriptional synergism at the mouse mammary tumor virus promoter. *The Journal of Biological Chemistry*, *274*(38), 26713-26719. https://doi.org/10.1074/jbc.274.38.26713

**Pulcinelli, F. M., Manzari, G., Bartoli, M., Faggioni, A., Mancusa, R. La, Pavan, A., Sansolini, T., Torrisi, M. R., & Gazzaniga, P. P.** (1995). Mechanisms of the platelet proaggregating activity of human carcinoma a431 cells. *Platelets*, *6*(4), 213-220. https://doi.org/10.3109/09537109509078458

**Strubin, M., Newell, J. W., Matthias, P.** (1995). OBF-1, a novel B cell-specific coactivator that stimulates immunoglobulin promoter activity through association with octamer-binding proteins. *Cell*, *80*(3), 497-506. https://doi.org/10.1016/0092-8674(95)90500-6

**Sun, Z., Cai, Y., Chen, Y., Jin, Q., Zhang, Z., Zhang, L., Li, Y., Huang, L., Wang, J., Yang, Y., Lv, Q., Han, Z., Xie, M., & Zhu, X.** (2023). Ultrasound-targeted microbubble destruction promotes PDGF-primed bone mesenchymal stem cell transplantation for myocardial protection in acute Myocardial Infarction in rats. *Journal of Nanobiotechnology*, *21*(1), 1-20. https://doi.org/10.1186/s12951-023-02204-7

**Takahashi, K., Tanabe, K., Ohnuki, M., Narita, M., Ichisaka, T., Tomoda, K., Yamanaka, S.** (2007). Induction of pluripotent stem cells from adult human fibroblasts by defined factors. *Cell*, *131*(5), 861-872. https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.11.019

**Wysocka, J. & Herr, W.** (2003). The herpes simplex virus VP16-induced complex: the makings of a regulatory switch. *Trends in Biochemical Sciences*, *28*(6), 294-304. https://doi.org/10.1016/S0968-0004(03)00088-4

**Xu, D., Zalmas, L. P., La Thangue, N. B.** (2008). A transcription cofactor required for the heat-shock response. *EMBO Reports*, *9*(7), 662-669. https://doi.org/10.1038/embor.2008.70

**Zhou, J., Ng, A. Y., Tymms, M. J., Jermiin, L. S., Seth, A. K., Thomas, R. S., Kola, I.** (1998). A novel transcription factor, ELF5, belongs to the ELF subfamily of ETS genes and maps to human chromosome 11p13-15, a region subject to LOH and rearrangement in human carcinoma cell lines. *Oncogene*, *17*(21), 2719-2732. https://doi.org/10.1038/sj.onc.1202198

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):594-609, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4049



Artículo original

# Influencia del Sol en la clasificación orbital del sistema Tierra-Luna-satélite

## Effect of the Sun on the orbital classification of the Earth-Moon-satellite system

**Fredy L. Dubeibe[1,*], Saira F. Mesa[1], Karen D. Arias-Sandoval[1,2]**

[1]Grupo de Investigación Cavendish, Facultad de Ciencias Humanas y de la Educación, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia
[2]Laboratorio Nacional de Computaçao Científica, Petrópolis, RJ, Brasil

## Resumen

En este trabajo se examina hasta qué punto el problema restringido y circular de los tres cuerpos proporciona un marco fiable para la clasificación orbital en el sistema Tierra-Luna-satélite sin incorporar explícitamente la influencia gravitacional del Sol. Con este objetivo, se compararon tres modelos dinámicos: el problema restringido y circular de los tres cuerpos (P3CRC), el problema restringido y bicircular de los cuatro cuerpos (P4CRB) y una formulación aproximada de este último, denominada P4CRB-A. Las trayectorias se clasificaron mediante métodos numéricos cualitativos y cuantitativos de acuerdo con su comportamiento asintótico, incluidos el escape al infinito, el movimiento acotado y la colisión con un cuerpo primario. Los resultados numéricos revelaron diferencias sustanciales entre los modelos en los resultados orbitales, lo que demuestra que las perturbaciones solares pueden modificar de manera significativa el comportamiento dinámico previsto. Aunque el P4CRB-A reprodujo las características principales del P4CRB completo en la vecindad de la región Tierra-Luna, los efectos solares se tornaron dominantes para las órbitas circumbinarias que se extienden más allá de dos distancias lunares aproximadamente. El análisis comparativo de un rango de valores de la constante de Jacobi mostró que, por fuera de la distancia umbral, el P3CRC sobreestimó de forma sistemática la persistencia del movimiento acotado, mientras que el P4CRB-A proporcionó una descripción más precisa de las dinámicas de escape y colisión.

**Palabras clave:** problema restringido de cuatro cuerpos; problema restringido de tres cuerpos restringido; dinámica no lineal; clasificación orbital.

## Abstract

In this paper, we examine the extent to which the circular restricted three-body problem provides a reliable framework for the orbital classification in the Earth-Moon-satellite system without explicitly integrating the gravitational influence of the Sun. To this end, we compared three dynamical models: the circular restricted three-body problem (CR3BP), the bicircular restricted four-body problem (BCR4BP), and an approximate formulation of the latter, denoted as BCR4BP-A. Trajectories were classified using qualitative and quantitative numerical methods according to their asymptotic behavior, including escape to infinity, bounded motion, and collision with a primary. The numerical results revealed substantial differences in orbital outcomes among the models, demonstrating that solar perturbations can significantly alter the predicted dynamical behavior. While the BCR4BP-A reproduced the main features of the full BCR4BP in the vicinity of the Earth-Moon region, solar effects became dominant for circumbinary orbits extending beyond approximately two lunar distances. A comparative analysis over a range of Jacobi constant values showed that, beyond this threshold distance, the CR3BP systematically overestimated the persistence of bounded motion, whereas the BCR4BP-A provided a more accurate description of escape and collision dynamics.

**Keywords:** Restricted 4-body problem; Restricted 3-body problem; Nonlinear dynamics; Orbital classification.

**Citación:** Dubeibe FL, et al. Influencia del Sol en la clasificación orbital del sistema Tierra-Luna-satélite. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):594-609, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4049

**Editor:** Santiago Vargas Dominguez

***Correspondencia:**
Fredy Leonardo Dubeibe;
fdubeibe@unillanos.edu.co

**Recibido:** 17 de febrero de 2026
**Aceptado:** 24 de marzo de 2026
**Publicado en línea:** 24 de julio de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

## Introduction

El problema de los tres cuerpos restringido y circular (P3CRC) constituye uno de los pilares de la mecánica celeste, cuyos orígenes que se remontan a las teorías lunares de Euler. Las contribuciones de Jacobi, Levi-Civita, Birkhoff, Delaunay y Hill permitieron consolidar y ampliar este marco teórico, el cual es hoy ampliamente utilizado en teorías lunares y planetarias, así como en aplicaciones de la astronáutica (**Wintner**, 2014; **Broucke**, 1968). En este modelo, dos cuerpos masivos denominados primarios se mueven en órbitas circulares alrededor de su baricentro, mientras que un tercer cuerpo de masa despreciable (en comparación con la de los cuerpos primarios) evoluciona bajo su influencia gravitacional sin afectar su movimiento. A pesar de su larga historia, la dinámica del problema restringido de tres cuerpos sigue siendo un área activa de investigación, con numerosos estudios dedicados al análisis de variantes y extensiones del problema original (véase, por ejemplo, **Murray** (1994); **Albers, Frauenfelder, Koert, and Paternain** (2012); **Dubeibe, Lora-Clavijo, and González** (2017); **Zotos and Dubeibe** (2018); **Suraj, Aggarwal, Asique, and Mittal** (2021); **Elipe** (2024)).

Al considerar problemas de cuatro cuerpos, surgen modelos simplificados diseñados para capturar algunas de las particularidades de este tipo de sistemas. Entre ellos se encuentra el problema de los cuatro cuerpos restringido (P4CR), que contempla configuraciones colineales y triangulares, como las configuraciones de Euler y Lagrange, así como el problema de los cuatro cuerpos restringido tipo Hill (véase, por ejemplo, **Scheeres** (1998); **Leandro** (2006); **Hamilton** (2016)). No obstante, estos modelos excesivamente simplificados no logran siempre describir con precisión el movimiento real de los cuerpos. Un enfoque más refinado es el problema de los cuatro cuerpos restringido y bicircular (P4CRB), propuesto originalmente por **Huang** (1960), en el cual un tercer primario se mueve en una órbita circular alrededor de otros dos primarios que, a su vez, orbitan en círculos alrededor de su baricentro. Aunque sigue siendo una idealización, el P4CRB proporciona una aproximación más realista y ofrece información valiosa sobre configuraciones específicas de sistemas de cuatro cuerpos (**de Almeida Junior & de Almeida Prado**, 2022).

Una parte considerable de la literatura se ha centrado en las configuraciones de Euler y Lagrange del P4CR, abarcando desde el cálculo de puntos de equilibrio hasta el estudio detallado de la dinámica orbital (**Simo**, 1978; **Michalodimitrakis**, 1981; **Maranhão & Llibre**, 1998; **Medvedev & Perov**, 2008; **Baltagiannis & Papadakis**, 2011a, 2011b; **Burgos-García & Delgado**, 2013a, 2013b; **Alvarez-Ramírez & Barrabés**, 2015; **Zotos**, 2016). Sin embargo, el P4CRB ha recibido una atención relativamente menor. En este contexto, **Abouelmagd and Ansari** (2019) estudiaron las propiedades del movimiento en el sistema Tierra-Luna perturbado por el Sol, con énfasis en los puntos de equilibrio y su estabilidad, mientras que **Singh and Omale** (2020) incorporaron fuerzas disipativas en el marco del P4CRB. Asimismo, **de Almeida Junior and de Almeida Prado** (2022) compararon el P3CRC y el P4CRB en términos de costos de transferencia entre primarios secundarios, evidenciando efectos perturbativos significativos, en particular en sistemas como Sol-Tierra-Luna y Sol-Marte-Fobos. Más recientemente, **Qian, Yang, Yang, and Zhang** (2018) introdujeron una versión aproximada del modelo P4CRB, analizando condiciones de estabilidad asociadas a resonancias paramétricas principales y validando sus resultados mediante simulaciones numéricas.

En el presente trabajo, nos proponemos examinar la precisión de modelos aproximados en el contexto de problemas de pocos cuerpos. En particular, investigamos la relevancia de

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):594-609, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4049

despreciar la influencia del Sol en el sistema Tierra-Luna-satélite (véase, por ejemplo, **Zotos** (2015a); **Heiligers, Hiddink, Noomen, and McInnes** (2015)) y evaluamos la capacidad de estos modelos para clasificar órbitas de manera fiable, destacando las diferencias observadas entre ellos. Siguiendo estudios similares realizados en otros sistemas planetarios (véase, por ejemplo, **Zotos** (2015b, 2015c)), nuestro análisis se apoya en el P3CRC (**Szebehely**, 1967), el P4CRB (**de Almeida Junior & de Almeida Prado**, 2022) y el P4CRB aproximado (**Qian et al.**, 2018).

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la siguiente sección se presenta una formulación concisa del problema y se introducen las ecuaciones de movimiento correspondientes a los tres modelos considerados. Posteriormente, se describe la metodología numérica empleada para la clasificación y el análisis de trayectorias. Con esta información, se muestran los resultados de la clasificación orbital en el sistema Sol-Tierra-Luna mediante mapas bidimensionales codificados por color para los tres modelos. Finalmente, se resumen las conclusiones principales de este estudio.

## Formulación del problema y ecuaciones de movimiento

Se estudia la dinámica de una partícula de prueba (satélite) en presencia del sistema Tierra-Luna utilizando tres modelos: el P3CRC, el P4CRB y el P4CRB-A. En los párrafos siguientes se introducen los modelos matemáticos empleados en nuestro análisis de manera detallada.

### *Movimiento del satélite en el P3CRC*

En el primer escenario se considera que la influencia del Sol sobre el satélite dentro del sistema Tierra-Luna-Satélite es despreciable. En consecuencia, se emplea el P3CRC para examinar el movimiento del satélite (**Szebehely**, 1967). La Figura 1 muestra la configuración de este problema, donde $m_1$, $m_2$ y $m$ representan las masas de la Tierra, la Luna y el satélite, respectivamente. Además, $\vec{r}_1$ y $\vec{r}_2$ denotan los vectores de posición de $m$ con respecto a $m_1$ y $m_2$, respectivamente, mientras que $\vec{r}$ representa el vector de posición de $m$ con respecto al origen $O$. En esta configuración, $m_1$ y $m_2$ describen un movimiento orbital circular con velocidad angular constante alrededor del baricentro.

En este y en los modelos subsecuentes, se asume que el movimiento del satélite se desarrolla en el plano $xy$, el cual coincide con el plano orbital de los primarios. En consecuencia, se impone la restricción $z = \dot{z} = \ddot{z} = 0$, lo que elimina el grado de libertad asociado a la coordenada vertical y reduce el sistema dinámico a dos grados de libertad. Bajo esta hipótesis, las ecuaciones de movimiento pueden expresarse únicamente en términos de las coordenadas $(x, y)$ del sistema de referencia sinódico.

Las ecuaciones de movimiento del P3CRC en forma vectorial están dadas por

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} + 2\vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) = -\sum_{i=1}^{2} \frac{m_i}{r_i^3}\vec{r}_i. \tag{1}$$

En este trabajo se emplean unidades canónicas. En particular, la constante de gravitación universal se fija como $G = 1$, la distancia entre los dos primarios se adopta como unidad de longitud y la masa total del sistema se normaliza a la unidad, $m_1 + m_2 = 1$. Bajo esta normalización, la velocidad angular del sistema de referencia sinódico se toma como $\omega = 1$, lo que permite expresar las coordenadas de los primarios únicamente en términos del parámetro de masa $\mu$, como se indica a continuación: $m_1 = 1 - \mu$, $m_2 = \mu$, $x_1 = -\mu$ y

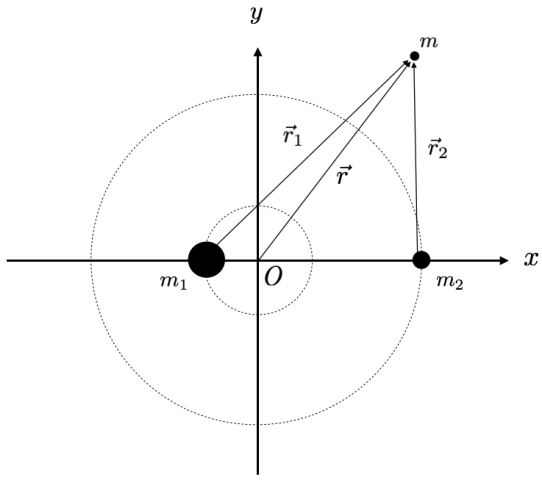



**Figura 1.** Representación esquemática del problema de los tres cuerpos restringido y circular que involucra a la Tierra ($m_1$), la Luna ($m_2$) y un satélite ($m$).

$x_2 = 1-\mu$, con $\mu = m_2/(m_1+m_2)$, garantizando que el baricentro coincida con el origen. Esta elección de unidades conduce a la forma adimensional estándar de las ecuaciones del problema de los tres cuerpos restringido y circular.

La condición de $G = \omega = 1$ implica que la unidad de tiempo canónica corresponde al inverso de la velocidad angular media de la Luna. En unidades físicas, una unidad de tiempo canónica equivale aproximadamente a 4.34 días.

La posición del satélite $m$ con respecto a $m_1$ (Tierra) y $m_2$ (Luna) puede expresarse como

$$r_1 = \sqrt{(x+\mu)^2+y^2}, \quad r_2 = \sqrt{(x+\mu-1)^2+y^2}. \tag{2}$$

De este modo, las ecuaciones de movimiento para la partícula de prueba (satélite) en el sistema de referencia sinódico son

$$\ddot{x} - 2\dot{y} = \frac{\partial U_1}{\partial x}, \tag{3}$$

$$\ddot{y} + 2\dot{x} = \frac{\partial U_1}{\partial y}, \tag{4}$$

donde la función potencial efectivo $U_1(x,y)$ está dada por

$$U_1(x,y) = \frac{1}{2}(x^2+y^2) + \frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2}. \tag{5}$$

El sistema dinámico (3)-(4) admite una integral de movimiento conocida como la constante de Jacobi, denotada por $C_1$:

$$C_1 = 2U_1 - (\dot{x}^2+\dot{y}^2). \tag{6}$$

Esta constante restringe el movimiento de la partícula de prueba a la región donde $C_1 \leq 2U_1$.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):594-609, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4049

*Movimiento del satélite en el P4CRB*

El P4CRB incorpora la presencia de un tercer primario, $m_3$, al P3CRC (ver **de Almeida Junior and de Almeida Prado** (2022)). Se asume que $m_3$ se mueve a lo largo de una órbita circular alrededor del baricentro $O$ del sistema Tierra-Luna con una velocidad angular constante $\omega'$. La Figura 2 muestra la configuración correspondiente al problema P4CRB, ilustrando las órbitas de los cuerpos y su disposición dentro del sistema. Aquí, $m_1$, $m_2$, $m_3$ y $m$ representan las masas de la Tierra, la Luna, el Sol y el satélite, respectivamente, mientras que $\vec{r}_1$, $\vec{r}_2$, $\vec{r}_3$ y $\vec{r}$ denotan los vectores de posición de $m$ con respecto a $m_1$, $m_2$, $m_3$ y al origen $O$, respectivamente.

Las ecuaciones de movimiento del P4CRB en forma vectorial están dadas por

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} + 2\vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) = -\sum_{i=1}^{3} \frac{m_i}{r_i^3}\vec{r}_i - \frac{m_3}{\rho^2}\vec{h}, \tag{7}$$

donde $\vec{h} = (\cos\theta, \sin\theta, 0)$, $\rho$ representa la distancia desde el origen de coordenadas $O$ hasta el tercer primario $m_3$, mientras que $\theta$ denota el ángulo entre $\rho$ y el eje $x$ del sistema sinódico. Este ángulo varía con el tiempo y está directamente relacionado con la velocidad angular de $m_3$ alrededor del baricentro de $m_1$ y $m_2$.

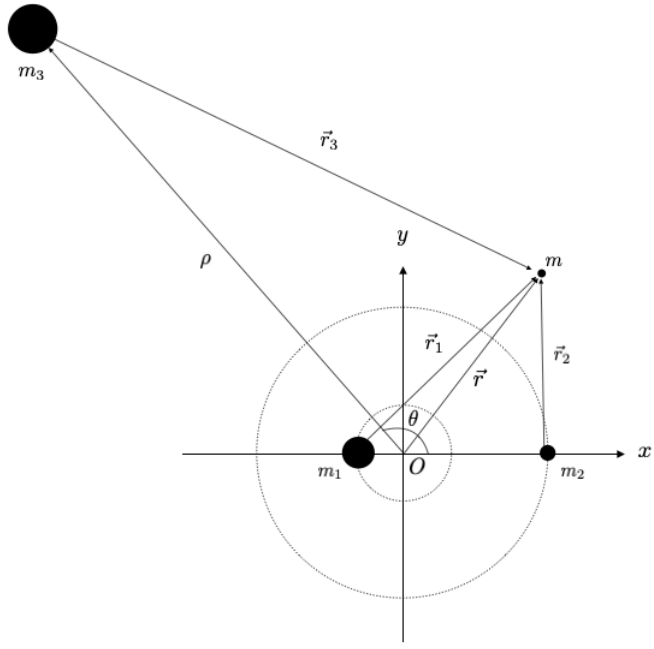



**Figura 2.** Representación esquemática del problema de los cuatro cuerpos restringido y bicircular que involucra al Sol ($m_3$), la Tierra ($m_1$), la Luna ($m_2$) y un satélite ($m$).

La posición del satélite $m$ con respecto a $m_1$ y $m_2$ está dada por la Ec. (2), mientras que la posición de $m$ con respecto a $m_3$ puede expresarse como

$$r_3 = \sqrt{(x - \rho\cos\theta)^2 + (y - \rho\sin\theta)^2}. \tag{8}$$

Con esta información, el nuevo sistema de ecuaciones de movimiento puede escribirse en

forma compacta como

$$\ddot{x} - 2\dot{y} = \frac{\partial U_2}{\partial x}, \tag{9}$$

$$\ddot{y} + 2\dot{x} = \frac{\partial U_2}{\partial y}, \tag{10}$$

donde el potencial dependiente del tiempo $U_2(x,y,t)$ está dado en términos de la función de potencial efectivo $U_1(x,y)$ como

$$U_2(x,y,t) = U_1(x,y) + \frac{m_3}{r_3} - \frac{m_3}{\rho^2}\left(x\cos\theta + y\sin\theta\right), \tag{11}$$

con $\theta = \omega' t$, donde $\omega'$ denota la velocidad angular media del Sol alrededor del baricentro Tierra-Luna en coordenadas sinódicas.

El sistema de ecuaciones (9-10) posee una cuasi-integral de movimiento, denotada por $C_2$, la cual puede expresarse en términos de la constante de Jacobi del P3CRC clásico (véase la Ec. (11) en **Abouelmagd and Ansari** (2019))

$$C_2 = 2U_2 - (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) - 2\int_{t_0}^{t} \frac{\partial (U_2 - U_1)}{\partial t} dt. \tag{12}$$

*Movimiento del satélite en el P4CRB-A*

Las ecuaciones de movimiento del P4CRB pueden simplificarse utilizando el enfoque propuesto por **Qian et al.** (2018). Este método emplea un desarrollo en serie de potencias, asumiendo que la distancia entre el Sol y el baricentro del sistema Tierra-Luna es mucho mayor que la escala característica de longitud del sistema ($\rho \gg 1$). Usando la Ec. (8), se aproxima el recíproco de $r_3^3$ de la siguiente manera

$$\frac{1}{r_3^3} \approx \frac{1}{\rho^3}\left[\frac{r^2}{\rho^2} - 2\left(\frac{x\cos(\omega' t) + y\sin(\omega' t)}{\rho}\right) + 1\right]^{-3/2}, \tag{13}$$

donde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ representa la distancia de $m$ al baricentro de $m_1$ y $m_2$. Dado que $x, y \ll \rho$, los dos primeros términos entre corchetes constituyen una pequeña perturbación

$$\frac{r^2}{\rho^2} - 2\frac{(x\cos(\omega' t) + y\sin(\omega' t))}{\rho} \ll 1, \tag{14}$$

lo que permite emplear una expansión en series de Taylor de primer orden

$$\frac{1}{r_3^3} \approx \frac{1}{\rho^3}\left[1 + \frac{3(x\cos(\omega' t) + y\sin(\omega' t))}{\rho}\right]. \tag{15}$$

Introduciendo el parámetro $k = m_3/\rho^3$, el cual depende de la masa del tercer primario y de su distancia relativa, las ecuaciones de movimiento del P4CRB pueden reescribirse en una forma aproximada e independiente del tiempo, como[1]

$$\ddot{x} - 2\dot{y} = \frac{\partial U_3}{\partial x}, \tag{16}$$

$$\ddot{y} + 2\dot{x} = \frac{\partial U_3}{\partial y}, \tag{17}$$

[1] Para una derivación detallada de las ecuaciones de movimiento independientes del tiempo (aproximadas) del P4CRB, remitimos al lector a **Qian et al.** (2018).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):594-609, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4049

donde el potencial independiente del tiempo $U_3(x,y)$ está dado, en términos del nuevo parámetro, por

$$U_3(x,y) = \frac{1}{2}\left(1+\frac{k}{2}\right)\left(x^2+y^2\right) + \frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2}. \tag{18}$$

Por lo tanto, el sistema de ecuaciones (16-17) admite la integral de movimiento

$$C_3 = 2U_3 - (\dot{x}^2+\dot{y}^2). \tag{19}$$

Cabe mencionar que las ecuaciones de movimiento y la integral de movimiento del modelo P4CRB-A se reducen directamente a las del P3CRC cuando el parámetro $k$ tiende a cero, dando como resultado $U_3(x,y) \to U_1(x,y)$ y $C_3 \to C_1$.

*Parámetros físicos del sistema Tierra-Luna-Sol*

Los parámetros físicos empleados en este estudio se obtienen siguiendo la metodología de normalización descrita en **Simó, Gómez, Jorba, and Masdemont** (1995). El parámetro de masa del sistema Tierra-Luna, denotado por $\mu$, toma el valor $\mu = 1.21506683 \times 10^{-2}$. Dado que en este sistema de unidades la masa combinada de la Tierra y la Luna es igual a la unidad, la masa del Sol resulta $m_3 = 3.28900541 \times 10^5$. La distancia entre el Sol y el baricentro del sistema Tierra-Luna, denotada por $\rho$, se establece como $\rho = 3.88811143 \times 10^2$, considerando que la distancia Tierra-Luna es la unidad de longitud. Además, al tomar como unidad la velocidad angular media de la Luna alrededor de la Tierra, la velocidad angular media del Sol alrededor del baricentro Tierra-Luna en coordenadas sinódicas es $\omega' = -9.25195985 \times 10^{-1}$. Finalmente, la constante $k$ toma el valor $k = 5.59562341 \times 10^{-3}$.

## Metodología

Con el fin de comparar las estructuras orbitales en distintos escenarios, empleamos un enfoque numérico para clasificar trayectorias y estudiar su comportamiento. Como se indicó previamente, consideramos tres casos principales:

**Caso 1:** En ausencia de la influencia del Sol, analizamos el movimiento del satélite utilizando el P3CRC. Este escenario sirve como referencia para comparar cómo la ausencia del Sol modifica la dinámica orbital del satélite.

**Caso 2:** Para incorporar la influencia del Sol manteniendo la eficiencia computacional, utilizamos el P4CRB-A independiente del tiempo. Este modelo captura el efecto del Sol de manera simplificada, facilitando el análisis de la estructura orbital.

**Caso 3:** Mediante el uso del P4CRB, se tiene en cuenta el efecto completo del Sol sobre el movimiento del satélite. Las trayectorias se clasifican en función del comportamiento del satélite bajo los campos gravitacionales combinados de la Tierra, la Luna y el Sol.

Nuestro estudio tiene como objetivo clasificar las trayectorias en categorías distintas según su comportamiento dentro del sistema dinámico:

1. **Escape al infinito:** Trayectorias en las que el satélite eventualmente escapa al infinito. Esto se determina mediante el seguimiento del comportamiento del satélite durante un tiempo de integración determinado. Si el satélite sale de una región de interés predefinida (un círculo centrado en el origen del sistema sinódico con radio $R_{\text{esc}} =$

$10^4$) sin regresar dentro del tiempo de integración $t_{\max} = 10^4$, se clasifica como una trayectoria de escape.[2]

2. **Movimiento acotado:** El movimiento acotado ocurre cuando el satélite permanece dentro de una región espacial predefinida ($R_{\text{esc}}$) durante todo el tiempo de integración ($t_{\max}$), sin escapar ni colisionar con los primarios.

3. **Colisión con los primarios:** Las trayectorias que resultan colisionando con alguno de los primarios se identifican mediante el monitoreo de la proximidad del satélite a cada primario. Definimos una colisión como el cruce por parte del satélite de una frontera predefinida ($R_{\text{col}} = 10^{-4}$) alrededor de cada primario, con dirección radial entrante, durante la integración ($t < t_{\max}$).

Las simulaciones numéricas se realizan utilizando técnicas de integración apropiadas para cada caso. Para órbitas de colisión y de escape, empleamos un algoritmo adaptativo de Bulirsch-Stoer en doble precisión. Las órbitas acotadas se integran mediante un método de Runge-Kutta Prince-Dormand 8(7). Además, se emplea la técnica de regularización de Levi-Civita para mitigar las singularidades que surgen en las ecuaciones de movimiento, particularmente cuando la partícula de prueba atraviesa la región de radio $r < R_{\text{col}}$ alrededor de cada uno de los primarios. Estas singularidades, que ocurren cuando la partícula de prueba se aproxima excesivamente a uno de los cuerpos primarios, pueden dar lugar a inestabilidades numéricas e imprecisiones en el proceso de integración (véase **Benest and Froeschlé** (2002) para más detalles). La regularización de Levi-Civita transforma las ecuaciones de movimiento para suavizar las singularidades cuando la partícula de prueba se aproxima a un primario, garantizando la estabilidad numérica durante la integración.

Las ecuaciones de movimiento (Ecs. (3-4), (9-10) y (16-17)) se integran numéricamente utilizando una malla de $1000 \times 1000$ condiciones iniciales para la integral de movimiento ($C_i$, con $i = 1,2,3$) y una coordenada de posición, $x$ o $y$. Cada parámetro se discretiza dentro de rangos e intervalos predefinidos, lo que permite una exploración sistemática de las configuraciones orbitales. Esto garantiza la cobertura del espacio de parámetros relevante manteniendo la viabilidad computacional. Los diagramas en el espacio de configuración $(x,y)$ se omiten debido a su especificidad para cada caso particular.

Para mantener la consistencia, las integrales de movimiento $C_1$, $C_2$ y $C_3$ se denotan mediante un único parámetro, $J$, en todas las figuras. En los diagramas $(x,J)$, el valor inicial de la coordenada $y$ se fija como $y_0 = 0$, y el valor inicial del momento en la coordenada $x$ se establece como $p_{x0} = 0.1$. El valor inicial del momento en la coordenada $y$ se determina a partir de la correspondiente integral de movimiento. Para los diagramas $(y,J)$, el valor inicial de la coordenada $x$ se fija como $x_0 = 0$, el valor inicial del momento en la coordenada $x$ se mantiene como $p_{x0} = 0.1$, y el valor inicial del momento en la coordenada $y$ se determina a partir de la integral de movimiento correspondiente.

Es importante resaltar que los criterios de clasificación y los parámetros de integración, incluyendo $t_{\max}$, $R_{\text{esc}}$ y $R_{\text{col}}$, se mantienen constantes en todos los escenarios con el fin de garantizar la comparabilidad entre los modelos. Además, se utilizan diagramas codificados por colores para representar visualmente las estructuras orbitales en cada caso. Los distintos colores corresponden a diferentes tipos de trayectorias, lo que facilita la comparación: blanco $\rightarrow$ región prohibida; verde $\rightarrow$ colisión con $m_1$ (Tierra); amarillo $\rightarrow$ colisión con $m_2$ (Luna); rojo $\rightarrow$ escape al infinito; azul $\rightarrow$ órbita acotada.

[2] Un tiempo máximo $t_{\max} = 10^4$ en unidades canónicas, corresponde aproximadamente a $4.34 \times 10^4$ días, es decir, $\approx 119$ años en unidades físicas.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):594-609, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4049

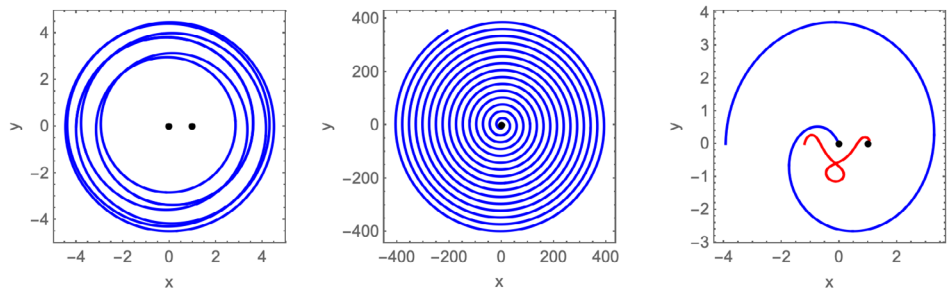



**Figura 3.** (Color en línea). Órbitas representativas en el plano $(x, y)$: movimiento acotado (izquierda), escape al infinito (centro) y colisión con los primarios (derecha). La figura resalta las posiciones de los primarios (Tierra y Luna), indicadas por puntos negros en $x_1 = -\mu$ y $x_2 = 1 - \mu$, respectivamente.

## Resultados

Una vez establecidos los criterios de clasificación para los distintos tipos de trayectorias, presentamos ejemplos de órbitas integradas numéricamente para ilustrar dichas categorías. Como referencia, la Figura 3 muestra órbitas representativas en el espacio de configuración $(x, y)$ dentro del marco del P3CRC. En esta figura se exhiben los tres posibles resultados: movimiento acotado (izquierda), escape al infinito (centro) y colisión con los primarios (derecha). Estos ejemplos proporcionan una visualización directa de los distintos desenlaces orbitales, facilitando la interpretación de los resultados de clasificación posteriores.

La Figura 4 ilustra la clasificación orbital del satélite en el plano $(x, J)$ para los tres modelos considerados: P3CRC (izquierda), P4CRB-A (centro) y P4CRB (derecha). Cada panel muestra la distribución de los distintos tipos de trayectorias, incluyendo colisiones con $m_1$ (Tierra) y $m_2$ (Luna), escape al infinito y órbitas acotadas. Las líneas verticales discontinuas indican las posiciones de la Tierra ($m_1$) y la Luna ($m_2$), y sirven como puntos de referencia para el análisis de trayectorias. Como se mencionó previamente, el esquema de colores diferencia los diversos resultados orbitales.

El análisis de la Figura 4 revela que las colisiones con la Luna (amarillo) son poco frecuentes en comparación con las colisiones con la Tierra (verde). En los paneles izquierdo y central, correspondientes a los modelos P3CRC y P4CRB-A, estas órbitas se concentran principalmente en la región $J \in [-3, 3]$. Sin embargo, para valores mayores fuera de este intervalo, solo se observan órbitas acotadas y de escape (azul y rojo, respectivamente). Dado que el modelo P4CRB-A es válido bajo la suposición $\rho \gg 1$, se esperan desviaciones con respecto al modelo P4CRB a mayores distancias del origen del sistema de referencia sinódico, mientras que cerca del origen se anticipa una mejor concordancia entre los modelos.

Una vista ampliada de la clasificación orbital cerca de $m_1$ y $m_2$ se presenta en la Figura 5, proporcionando información detallada del comportamiento de las trayectorias en las cercanías de estos cuerpos primarios. Cabe destacar que, aunque la Figura 4 pone de manifiesto diferencias significativas entre los modelos P3CRC y P4CRB-A frente al P4CRB, en la región cercana al origen ($x \in [-1, 2]$) los diagramas de clasificación orbital son bastante similares. En particular, las regiones más grandes correspondientes al escape, la colisión con la Tierra y el movimiento acotado muestran una fuerte concordancia, con discrepancias menores que se manifiestan como pequeños conglomerados de condiciones iniciales que conducen a órbitas acotadas en el P3CRC. Estas discrepancias disminuyen en el modelo P4CRB-A.

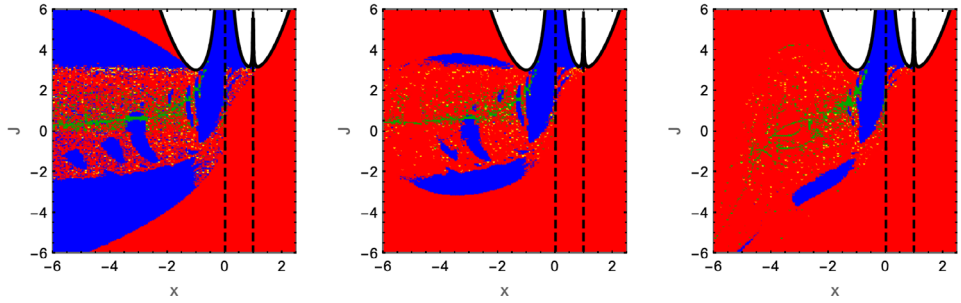



**Figura 4.** (Color en línea). Clasificación orbital del satélite en el plano $(x, J)$ usando tres modelos: P3CRC (izquierda), P4CRB-A (centro) y P4CRB (derecha). Las líneas verticales discontinuas indican las posiciones de $m_1$ y $m_2$. El código de colores es el siguiente: verde $\rightarrow$ colisión con $m_1$; amarillo $\rightarrow$ colisión con $m_2$; rojo $\rightarrow$ escape al infinito; azul $\rightarrow$ órbita acotada; blanco $\rightarrow$ región prohibida.

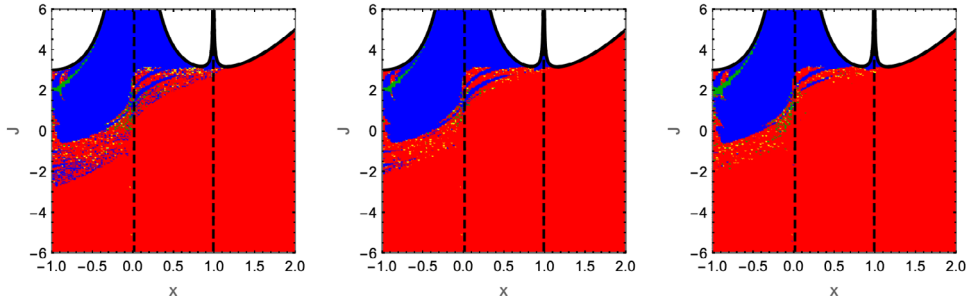



**Figura 5.** (Color en línea). Vista ampliada de la clasificación orbital del satélite en el plano $(x, J)$ mostrada en la Fig. 4, enfocada en la región cercana a las líneas verticales discontinuas que representan las posiciones de $m_1$ y $m_2$. El código de colores es el mismo que en la Fig. 4.

Extendiendo este análisis al plano $(y, J)$, la Figura 6 presenta la clasificación orbital del satélite bajo los mismos tres modelos: P3CRC (izquierda), P4CRB-A (centro) y P4CRB (derecha). El esquema de colores para la clasificación de trayectorias se mantiene consistente con las Figuras 4 y 5, garantizando una interpretación uniforme en los distintos planos orbitales.

Los resultados de la Figura 6 indican que en los intervalos $J \in [4,6]$ y $J \in [-2,0]$ las configuraciones orbitales permanecen en gran medida consistentes entre los tres modelos. No obstante, surgen discrepancias entre el P3CRC (izquierda) y el P4CRB (derecha) en el intervalo $J \in [0,4]$, particularmente cerca de $y = 0$. La principal diferencia es la presencia de una región más amplia de condiciones iniciales que conducen a colisiones con la Tierra en el modelo P4CRB, región que está ausente en el P3CRC. Las discrepancias entre los modelos P3CRC y P4CRB en el intervalo $J \in [0,4]$, especialmente cerca de $y = 0$, pueden atribuirse a diferencias en las condiciones iniciales. En particular, la distribución de condiciones iniciales que conducen a órbitas acotadas en el P3CRC difiere de la del P4CRB, donde influencias gravitacionales adicionales modifican los resultados de las trayectorias. La similitud entre los modelos P4CRB-A y P4CRB sugiere que el P4CRB-A captura de manera efectiva aspectos clave de la dinámica completa del P4CRB. Para cuantificar estas diferencias, se calculó el porcentaje de cada tipo de trayectoria (escape al infinito, movimiento acotado y colisiones con la Tierra o la Luna) en los tres modelos considerados: P3CRC, P4CRB-A y P4CRB. Los resultados se basan en las clasificaciones presentadas en las Figuras 4, 5 y 6.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):594-609, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4049

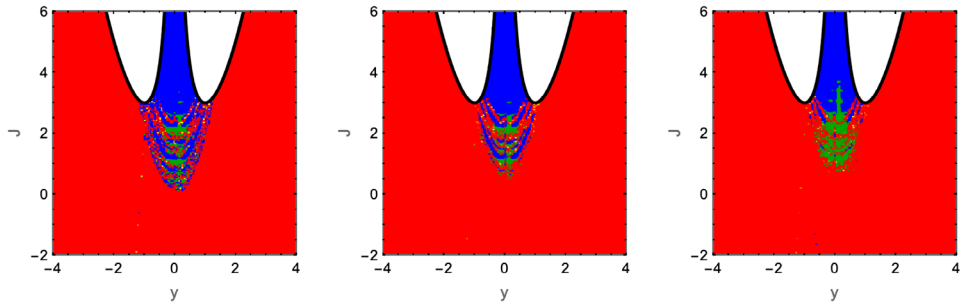



**Figura 6.** (Color en línea). Clasificación orbital del satélite en el plano $(y, J)$ usando tres modelos: P3CRC (izquierda), P4CRB-A (centro) y P4CRB (derecha). El código de colores es el mismo que en la Fig. 4.

La Figura 7 presenta los porcentajes de órbitas de la clasificación en el plano $(x, J)$ correspondientes a la Figura 4. En el modelo P3CRC (panel izquierdo), el 38.4% de las órbitas se clasifica como movimiento acotado, el 2.8% corresponde a colisiones con la Tierra, el 1.2% a colisiones con la Luna y el 57.6% escapa al infinito. En el modelo P4CRB-A (panel central), la fracción de órbitas acotadas disminuye de manera significativa hasta el 13.9%, mientras que las colisiones con la Tierra y la Luna se reducen ligeramente al 1.7% y 0.8%, respectivamente. En este caso, las órbitas de escape dominan la dinámica, representando el 83.6%. Finalmente, en el modelo P4CRB (panel derecho), las órbitas acotadas se reducen aún más hasta el 7.8%, las colisiones con la Tierra permanecen relativamente similares en el 2.5% y las órbitas de escape aumentan hasta el 89%. Estos resultados indican que el modelo P4CRB muestra una tendencia aún mayor a la fuga orbital frente al movimiento acotado, lo que pone de manifiesto el efecto desestabilizador del Sol en esta configuración.

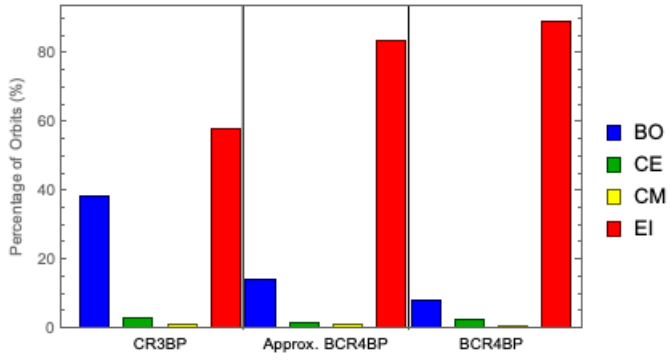



**Figura 7.** (Color en línea). Porcentaje de órbitas acotadas (BO), colisiones con la Tierra (CE), colisiones con la Luna (CM) y órbitas de escape al infinito (EI) para la clasificación orbital en el plano $(x, J)$ mostrada en la Fig. 4. Las barras del panel izquierdo corresponden al modelo P3CRC, el panel central representa el P4CRB-A y el panel derecho muestra los resultados del modelo P4CRB.

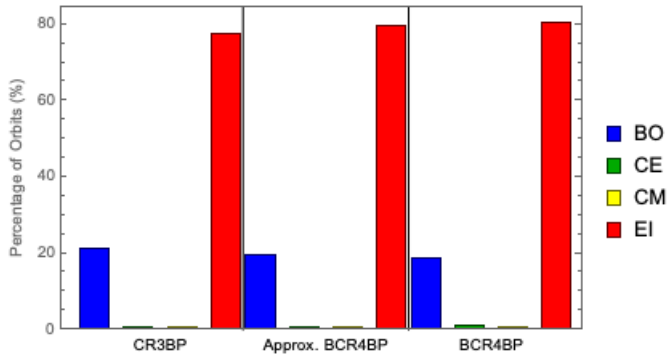



**Figura 8.** (Color en línea). Porcentaje de órbitas para la clasificación orbital en el plano $(x, J)$ en las cercanías de los cuerpos primarios, mostrada en la Fig. 5. El código de colores y la disposición de los paneles son los mismos que en la Fig. 7.

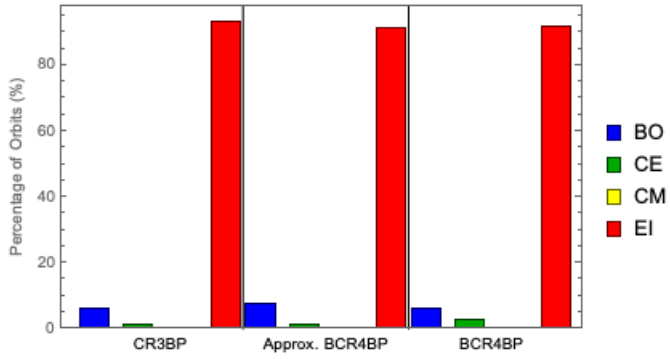



**Figura 9.** (Color en línea). Porcentaje de órbitas para la clasificación orbital en el plano $(y, J)$ mostrada en la Fig.6. El código de colores y la disposición de los paneles son los mismos que en la Fig. 7.

La Figura 8 muestra los resultados de la clasificación orbital en el plano $(x, J)$ en las cercanías de los cuerpos primarios (Tierra y Luna). En el modelo P3CRC (panel izquierdo), se observa una fracción moderada de órbitas acotadas (21.2%), junto con una baja incidencia de colisiones con la Tierra (0.7%) y con la Luna (0.6%). No obstante, las órbitas de escape dominan el conjunto, representando el 77.5% del total. El modelo P4CRB-A (panel central) muestra una ligera reducción de las órbitas acotadas hasta el 19.6%, con una disminución de las colisiones con la Tierra al 0.5%, mientras que las órbitas de escape aumentan hasta el 79.5%. Finalmente, el modelo P4CRB (panel derecho) presenta una tendencia similar, con una reducción de las órbitas acotadas al 18.4%, un ligero incremento de las colisiones con la Tierra hasta el 0.9% y un aumento de las órbitas de escape hasta el 80.3%. Por lo tanto, en las proximidades de los cuerpos primarios, la inclusión de la perturbación gravitacional del Sol en los modelos P4CRB-A y P4CRB reduce la estabilidad del movimiento acotado en comparación con el modelo P3CRC. Las diferencias mínimas observadas entre los modelos P4CRB-A y P4CRB en esta región sugieren que el P4CRB-A captura adecuadamente los efectos solares en las cercanías de la Tierra y la Luna.

La Figura 9 presenta los resultados de la clasificación orbital en el plano $(y, J)$. En el modelo P3CRC (panel izquierdo), las órbitas de escape dominan claramente (93.1%), con una pequeña fracción de órbitas acotadas (5.8%) y colisiones mínimas con la Tierra (0.9%) y la Luna (0.2%). El modelo P4CRB-A (panel central) presenta un ligero aumento en las órbitas

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):594-609, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4049

acotadas (7.4%) y en las colisiones con la Tierra (1.1%), mientras que las órbitas de escape disminuyen marginalmente hasta el 91.3%. En el modelo P4CRB (panel derecho), las colisiones con la Tierra aumentan aún más hasta el 2.3%, mientras que las órbitas de escape se mantienen dominantes con un 91.6%, y la tasa de colisiones con la Luna permanece muy baja (0.1%). Los resultados de la Figura 9 sugieren que las tendencias generales de clasificación se mantienen consistentes, siendo las órbitas de escape el resultado predominante en todos los casos.

| Modelo | Tiempo promedio de ejecución (s) |
|---|---|
| P3CRC | 41.3042 |
| P4CRB-A | 43.5858 |
| P4CRB | 64.1519 |

**Table 1.** Comparación de los tiempos promedio de ejecución para los tres modelos.

Como análisis final, se cuantificó el costo computacional de los tres modelos mediante la comparación de sus tiempos medios de ejecución para una trayectoria individual, considerando 100 órbitas acotadas por modelo. La integración se realizó durante $t = 10^4$ unidades de tiempo en un computador MacBook Air (chip Apple M2, CPU de 8 núcleos, GPU de 8 núcleos y 8 GB de memoria RAM).

Las simulaciones numéricas se implementaron en Wolfram Mathematica 12.0.0 utilizando la función NDSolve. En este trabajo, se definieron e implementaron métodos de integración personalizados dentro del entorno de NDSolve, siguiendo su arquitectura de extensión basada en la inicialización del método y la definición explícita de procedimientos de avance (**Sofroniou & Knapp**, 2008).

Los resultados se presentan en la Tabla 1 y muestran que el modelo P3CRC es el más eficiente desde el punto de vista computacional debido a su formulación simplificada, mientras que el P4CRB-A introduce solo un incremento marginal en el tiempo de ejecución. Por su parte, el modelo P4CRB completo, que incorpora explícitamente la influencia gravitacional del Sol, requiere aproximadamente un 55% más de recursos computacionales que el P3CRC. Este balance entre precisión y eficiencia debe considerarse al realizar análisis de trayectorias a gran escala.

## Conclusiones

Este estudio presenta un análisis numérico de la dinámica orbital en el sistema Tierra-Luna-satélite utilizando tres modelos: el problema de los tres cuerpos restringido y circular (P3CRC), el problema de los cuatro cuerpos restringido y bicircular (P4CRB) y una versión aproximada del P4CRB. Se examinó cómo la presencia del Sol afecta la clasificación de órbitas y se evaluó el costo computacional de cada modelo.

Nuestros resultados muestran diferencias claras en los resultados de las trayectorias entre estos modelos. El P3CRC y el P4CRB-A producen clasificaciones similares en algunas regiones, especialmente para órbitas acotadas y trayectorias que colisionan con la Tierra. Sin embargo, a medida que las trayectorias se extienden más lejos de los cuerpos primarios, las perturbaciones solares se vuelven más significativas, dando lugar a diferencias notables. Estos hallazgos permiten delimitar los rangos de validez de cada modelo y determinar el umbral a partir del cual la influencia del Sol comienza a dominar la clasificación orbital.

La clasificación comparativa en los planos $(x, J)$ y $(y, J)$ revela patrones consistentes. El P3CRC tiende a sobreestimar la estabilidad de las órbitas acotadas debido a que ignora el

efecto gravitacional del Sol. En contraste, tanto el P4CRB-A como el P4CRB completo capturan los efectos desestabilizadores de las perturbaciones solares, lo que conduce a un mayor número de trayectorias de escape. El P4CRB-A reproduce adecuadamente estas tendencias, aunque subestima ligeramente las trayectorias que colisionan con la Tierra cerca del eje $x$ en el plano $(y, J)$.

A pesar de estas diferencias, una comparación detallada de los porcentajes de trayectorias muestra que, en la mayoría de los casos, las variaciones entre los modelos son pequeñas. La diferencia más significativa se observa en las trayectorias que colisionan con la Tierra, donde el P4CRB completo predice una frecuencia aproximadamente 1.2% mayor que el P4CRB-A. Aunque este último subestima ligeramente las colisiones, proporciona una aproximación razonable del comportamiento del modelo completo en las cercanías de los cuerpos primarios.

Desde el punto de vista computacional, el análisis muestra que el P4CRB completo, aunque es el más preciso, también es el más costoso, con un tiempo de ejecución promedio aproximadamente 55% mayor que el del P3CRC. El P4CRB-A representa un punto medio adecuado, ya que conserva las características dinámicas esenciales introducidas por las perturbaciones solares, manteniendo tiempos de cómputo cercanos a los del P3CRC. Este balance lo convierte en una opción práctica para aplicaciones que requieren eficiencia y precisión en la clasificación orbital.

En resumen, el estudio numérico realizado conduce a dos conclusiones principales sobre el papel de las perturbaciones solares en las órbitas de satélites en el sistema Tierra–Luna:

- A pesar de su formulación simplificada, el modelo P4CRB-A propuesto por **Qian et al.** (2018) muestra una estrecha concordancia con los resultados del P4CRB completo, particularmente en regiones del sistema Tierra-Luna de aproximadamente dos distancias lunares medidas desde el baricentro del sistema.
- Para órbitas circumbinarias, la influencia del Sol altera significativamente la estabilidad orbital, lo que hace necesario el uso del modelo P4CRB en lugar del P3CRC para obtener predicciones de trayectorias precisas.

Trabajos futuros podrían extender este análisis incorporando efectos perturbativos adicionales, como la presión de radiación solar y términos gravitacionales no esféricos, con el fin de refinar aún más las evaluaciones de estabilidad.

## Agradecimientos

FLD agradece el apoyo financiero otorgado por la Dirección General de Investigaciones de la Universidad de los Llanos (Colombia) en el marco del proyecto C07-04-2026-033. Los autores agradecen a los revisores anónimos por la lectura cuidadosa del manuscrito y por sus valiosas sugerencias y comentarios, los cuales contribuyeron de manera significativa a mejorar la calidad y la claridad del trabajo.

## Contribución de los autores

Todos los autores realizaron contribuciones sustanciales a la concepción, diseño, análisis e interpretación de los datos. Todos participaron en la redacción del artículo y revisaron la versión final del manuscrito.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

## References

**Abouelmagd, E. I., & Ansari, A. A.** (2019). The motion properties of the infinitesimal body in the framework of bicircular sun perturbed earth–moon system. *New Astronomy*, ***73***(1), 101282.

**Albers, P., Frauenfelder, U., Koert, O. V., & Paternain, G. P.** (2012). Contact geometry of the restricted three-body problem. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, ***65***(2), 229-263.

**Alvarez-Ramírez, M., & Barrabés, E.** (2015). Transport orbits in an equilateral restricted four-body problem. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, ***121***(2), 191–210.

**Baltagiannis, A., & Papadakis, K.** (2011b). Families of periodic orbits in the restricted four-body problem. *Astrophysics and Space Science*, ***336***(2), 357–367.

**Baltagiannis, A., & Papadakis, K. E.** (2011a). Equilibrium points and their stability in the restricted four-body problem. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, ***21***(8), 2179–2193.

**Benest, D., & Froeschlé, C.** (2002). *Singularities in gravitational systems: applications to chaotic transport in the solar system* (Vol. 590). Springer Science & Business Media.

**Broucke, R. A.** (1968). *Periodic orbits in the restricted three body problem with earth-moon masses* (Tech. Rep. No. JPL-TR-32-1168). Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory.

**Burgos-García, J., & Delgado, J.** (2013a). On the "blue sky catastrophe" termination in the restricted four-body problem. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, ***117***(2), 113–136.

**Burgos-García, J., & Delgado, J.** (2013b). Periodic orbits in the restricted four-body problem with two equal masses. *Astrophysics and Space Science*, ***345***(2), 247–263.

**de Almeida Junior, A. K., & de Almeida Prado, A. F. B.** (2022). Comparisons between the circular restricted three-body and bi-circular four body problems for transfers between the two smaller primaries. *Scientific Reports*, ***12***(1), 4148.

**Dubeibe, F., Lora-Clavijo, F., & González, G. A.** (2017). Pseudo-newtonian planar circular restricted 3-body problem. *Physics Letters A*, ***381***(6), 563–567.

**Elipe, A.** (2024). Wrong hypotheses in the generalized RTBP. *Astrophysics and Space Science*, ***369***(2), 22.

**Hamilton, D. P.** (2016). Fresh solutions to the four-body problem. *Nature*, ***533***(7602), 187–188.

**Heiligers, J., Hiddink, S., Noomen, R., & McInnes, C. R.** (2015). Solar sail lyapunov and halo orbits in the earth–moon three-body problem. *Acta Astronautica*, ***116***(), 25–35.

**Huang, S.** (1960). *Very restricted four-body problem*. Publications of Goddard Space Flight Center.

**Leandro, E. S.** (2006). On the central configurations of the planar restricted four-body problem. *Journal of Differential Equations*, ***226***(1), 323–351.

**Maranhão, D. L., & Llibre, J.** (1998). Ejection-collision orbits and invariant punctured tori in a restricted four-body problem. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, ***71***(1), 1–14.

**Medvedev, Y. D., & Perov, N. I.** (2008). Restricted four-body problem. the case of a central configuration: libration points and their stability. *Astronomy Letters*, ***34***(5), 357–365.

**Michalodimitrakis, M.** (1981). The circular restricted four-body problem. *Astrophysics and Space Science*, ***75***(2), 289–305.

**Murray, C. D.** (1994). Dynamical effects of drag in the circular restricted three-body problem: I. location and stability of the lagrangian equilibrium points. *Icarus*, ***112***(2), 465–484.

**Qian, Y.-J., Yang, L.-Y., Yang, X.-D., & Zhang, W.** (2018). Parametric stability analysis for planar bicircular restricted four-body problem. *Astrodynamics*, ***2***(2), 147–159.

**Scheeres, D. J.** (1998). The restricted hill four-body problem with applications to the earth–moon–sun system. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, ***70***(2), 75–98.

**Simo, C.** (1978). Relative equilibrium solutions in the four body problem. *Celestial Mechanics*, ***18***(2), 165–184.

**Simó, C., Gómez, G., Jorba, Á., & Masdemont, J.** (1995). The bicircular model near the triangular libration points of the rtbp. In *From newton to chaos: modern techniques for understanding and coping with chaos in n-body dynamical systems* (pp. 343–370). Springer.

**Singh, J., & Omale, S. O.** (2020). A study on bi-circular R4BP with dissipative forces: Motion of a spacecraft in the earth-moon-focused view. *Few-Body Systems*, ***61***(2), 15.

**Sofroniou, M., & Knapp, R.** (2008). Advanced numerical differential equation solving in mathematica. wolfram mathematica tutorial collection. wolfram research. *Inc.: Champaign, IL, USA*,(), .

**Suraj, M. S., Aggarwal, R., Asique, M. C., & Mittal, A.** (2021). On the modified circular restricted three-body problem with variable mass. *New Astronomy*, ***84***(1), 101510.

**Szebehely, V.** (1967). *Theory of orbit: The restricted problem of three bodies*. Academic Press.

**Wintner, A.** (2014). *The analytical foundations of celestial mechanics*. Courier Corporation.

**Zotos, E. E.** (2015a). Classifying orbits in the restricted three-body problem. *Nonlinear Dynamics*, ***82***(3), 1233–1250.

**Zotos, E. E.** (2015b). Orbital dynamics in the planar Saturn-Titan system. *Astrophysics and Space Science*, ***358***(1), 4.

**Zotos, E. E.** (2015c). Orbit classification in the planar circular pluto-charon system. *Astrophysics and Space Science*, ***360***(1), 7.

**Zotos, E. E.** (2016). Escape and collision dynamics in the planar equilateral restricted four-body problem. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, ***86***(), 66–82.

**Zotos, E. E., & Dubeibe, F. L.** (2018). Orbital dynamics in the post-newtonian planar circular restricted sun–jupiter system. *International Journal of Modern Physics D*, ***27***(4), 1850036.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):610-627, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4046

**Physical Sciences**

Original article

# Effects of rare-earth and Ca substitution on the structural and electronic properties of *RE*$Ba_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_{7-\delta}$ superconductors

## Efectos de la sustitución de tierras raras y Ca sobre las propiedades estructurales y electrónicas de los superconductores *RE*$Ba_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_{7-\delta}$

**Cesar Camilo Canaria-Camargo[1], Indry Milena Saavedra-Gaona[1], Sebastian Amaya-Roncancio[1], Agueda María Turatti[2], Jorge Luiz Pimentel-Junior[2], Carlos Arturo Parra-Vargas[1,*], David Arsenio Landinez-Tellez[3]**

[1] Grupo de Física de Materiales, Escuela de Física, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia
[2] Instituto de Matemática, Estatística e Física, Universidade Federal Do Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brazil
[3] Grupo de Física de Nuevos Materiales, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

## Abstract

We present a combined theoretical and experimental investigation of the structural, energetic, and electronic properties of *RE*$Ba_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_{7-\delta}$ (*RE*Ba1.9) superconducting systems, where *RE* = Ho, Dy, Gd, and Sm. Calculations based on density functional theory (DFT) revealed that lattice parameters decreased systematically as *RE* ionic radii decreased, consistent with structural contraction. All compounds exhibited negative formation energies, confirming their thermodynamic stability. $RE^{3+}$ substitutions were energetically favorable, particularly for heavier rare-earth elements, thereby enhancing lattice stabilization. Partial $Ba^{2+} \rightarrow Ca^{2+}$ substitution was also energetically viable and preserved structural integrity, whereas full substitution turned unfavorable due to increased lattice strain. The density of states (DOS) analysis showed that Ca incorporation modified the electronic structure by introducing Ca-*d* states near the Fermi level, potentially influencing superconducting behavior. Experimentally, *RE* and Ca substitutions strongly influenced critical superconducting parameters such as the critical current density ($J_c$), the coherence length ($\xi_c$), and the magnetic penetration depth ($\lambda_{ab}$) due to modified microstructures and vortex pinning mechanisms. The upper critical field $H_{c2}(T)$, estimated via Hao–Clem and two-fluid model fits, showed a clear enhancement with partial Ca doping and *RE* substitution. This increase in $H_{c2}(0)$ suggests an enhanced tolerance to external magnetic fields and improved superconducting stability. The reduced critical-field-density $H_{c2}(0)/T_{c0}$ was notably higher in Sm-based compounds, confirming their enhanced superconducting performance under applied fields.

**Keywords:** $REBa_2Cu_3O_7$, critical fields ($H_{c1}$, $H_{c2}$), current density ($J$), penetration depth ($\lambda$), coherence length ($\xi$), calcium doping, high-$T_c$ superconductors.

## Resumen

Se presenta aquí una investigación combinada, teórica y experimental, de las propiedades estructurales, energéticas y electrónicas de sistemas superconductores *RE*$Ba_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_{7-\delta}$ (*RE*Ba1.9), donde RE = Ho, Dy, Gd y Sm. Los cálculos basados en la teoría del funcional de la densidad (DFT) revelaron que los parámetros de red disminuyeron sistemáticamente al reducirse el radio iónico del elemento de tierras raras, lo que se ajustó a la contracción estructural esperada. Todos los compuestos presentaron energías de formación negativas, lo que confirmó su estabilidad termodinámica. Las sustituciones de $RE^{3+}$ fueron energéticamente favorables, especialmente para los elementos de tierras raras más pesados, contribuyendo así a una mayor estabilización de la red cristalina. La sustitución parcial de $Ba^{2+}$ por $Ca^{2+}$ también resultó energéticamente viable y preservó la integridad estructural, en tanto que la sustitución total se tornó desfavorable debido al aumento de la deformación de la red.

**Citation:** Canaria-Camargo CC, et al. Effects of rare-earth and Ca substitution on the structural and electronic properties of *RE*$Ba_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_{7-\delta}$ superconductors. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):610-627, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4046

**Editor:** Rafael González Hernández

***Corresponding autor:**
Carlos A. Parra Vargas;
carlos.parra@uptc.edu.co

**Received:** February 10, 2026
**Accepted:** May 5, 2026
**Published on line:** July 8, 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

El análisis de la densidad de estados (DOS) evidenció que la incorporación de Ca modificó la estructura electrónica al introducir estados Ca-d cerca del nivel de Fermi, lo que puede influir en el comportamiento superconductor. Experimentalmente, las sustituciones de RE y Ca influyeron de manera significativa en parámetros superconductores críticos como la densidad de corriente crítica ($J_c$), la longitud de coherencia ($\xi_c$) y la profundidad de penetración magnética ($\lambda_{ab}$), debido a microestructuras modificadas y a mecanismos de anclaje de vórtices. El campo crítico superior $H_{c2}(T)$, estimado mediante ajustes con el modelo de Hao–Clem y el modelo de dos fluidos, mostró una clara mejora con el dopaje parcial con Ca y la sustitución de RE. Este aumento de $H_{c2}(0)$ sugiere una mayor tolerancia a campos magnéticos externos y una mejor estabilidad superconductora. El campo crítico reducido $H_{c2}(0)/T_{c0}$ fue notablemente mayor en los compuestos basados en Sm, lo que confirmó su mejor desempeño superconductor bajo campos aplicados.

**Palabras claves:** REBa$_2$Cu$_3$O$_7$, campos críticos ($H_{c1}$, $H_{c2}$), densidad de corriente ($J$), profundidad de penetración ($\lambda$), longitud de coherencia ($\xi$), dopaje de calcio, superconductores de alta $T_c$.

## Introduction

The lower critical field, $H_{c1}$, represents one of the key parameters in describing the mixed state in type II superconductors. Its experimental determination is usually relatively straightforward, as it manifests itself as an abrupt change in magnetization when transitioning from the Meissner regime to the reversible behavior characteristic of the mixed state, at least in ideal superconductors. This field is closely linked to the free energy associated with a flux line and provides relevant information on fundamental properties such as the penetration depth, $\lambda$, and the Ginzburg-Landau parameter, $\kappa$ (**Tinkham**, 2004). By measuring $H_{c1}$ together with the upper critical field, $H_{c2}$, which is directly related to the coherence length, $\xi$, a comprehensive characterization of the parameters describing the mixed state of the superconductor is obtained (**Maki & Beal-Monod**, 1997).

In recent years, significant progress has been made in the development of super-magnets based on superconducting materials such as $RE$Ba$_2$Cu$_3$O$_y$ ($RE$-123), where $RE$ can be Nd, Sm, Gd, and Dy, among others. Several fundamental challenges have been successfully addressed, focusing on optimizing both the magnetic flux retention and the mechanical strength of these compounds. In parallel, a production-scale process has been implemented by synthesizing $RE$-123 pellets in air or Ar with 1% $O_2$ atmospheres, using innovative seeds in the form of thin films of Nd$_3$O deposited on MgO crystals, which has improved the reproducibility and growth efficiency of these materials (**Muralidhar *et al.***, 2010).

In cuprate superconductors, the pronounced two-dimensional (2D) nature of their electronic structure, along with the low superfluid density, favors the emergence of a vortex liquid phase that lies between the vortex solid phase (below $H_{vs}(T)$) and the normal state (above $H_{c2}(T)$ (**Grissonnanche *et al.***, 2014). Here, $H_{vs}(T)$ refers to the vortex solid melting field, the boundary separating the solid vortex phase, where vortices are pinned and ordered, from the vortex liquid phase, where thermal fluctuations lead to vortex motion and dissipation. It has been proposed that, in the underdoped regime, this vortex liquid phase can extend even down to zero temperature ($T = 0$) (**Riggs S. *et al.***, 2011), implying an extended region in the phase diagram with no true long-range vortex order. Despite various measurements, a clear and direct observation of the upper critical field $H_{c2}$ i in these systems remains elusive. For example, superconducting signals have been detected via the Nernst effect (**Wang Y.**, 2003) and magnetization measurements (**Gu *et al.***, 2010) at high magnetic fields, yet there remains uncertainty as to whether these signals originate from vortex excitations below $H_{c2}$ or from superconducting fluctuations above this critical field (**Koshelev**, 1994).

Thus, exploring superconducting fluctuations is essential for precisely identifying critical fields, particularly $H_{c1}$, which signals the onset of magnetic flux penetration into the superconductor. This parameter offers key insights into the nature and robustness of the superconducting state (**Sarıtekin *et al.***, 2016).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):610-627, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4046

From a computational perspective, the study of superconducting materials such as Y-123 allows us to explore in greater detail how chemical and structural modifications influence their fundamental electronic properties (**Zhang & Xu**, 2020). In particular, calcium (Ca) doping at the barium (Ba) site has been extensively investigated experimentally due to its effect on the critical temperature ($T_c$), carrier content, and structural stability. However, the electronic mechanism underlying these changes is not fully understood.

In this context, we combined experimental and computational approaches. On the theoretical side, we performed first-principles calculations to analyze two key aspects: (1) the electronic density of states (DOS), which reveals the availability of energy levels near the Fermi level, and (2) the impact of Ca doping on the electronic structure and superconducting parameters. These calculations allowed us to explore how subtle chemical substitutions affect the crystal structure and electronic behavior, offering insights into the tuning of superconducting properties in *RE*-123 systems.

Our results showed that rare-earth substitution, combined with carefully controlled Ca doping, significantly enhanced the thermodynamic, structural, and functional characteristics of high-$T_c$ cuprates. This approach is a promising route for optimizing next-generation superconducting materials.

***Experimental details***

The superconductor samples *RE*$Ba_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_{7-\delta}$ (*RE*Ba1.9), with *RE* = Ho, Dy, Gd, and Sm, were synthesized using the solid-state reaction (SSR) method, as described in the study by **Camargo *et al.*** (2025). The sintering temperatures varied among the four samples depending on the *RE* and the ionic radius of the $RE^{3+}$ ion (**Table 1**).

X-ray diffraction (XRD) patterns taken at room temperature were used to identify the crystalline structure of the four samples. The XRD pattern was obtained using a Panalytical X'pert PRO-MPD instrument with an ultrafast X'Celerator detector in a Bragg-Brentano configuration, employing CuKα radiation ($\lambda$ = 1.5418 Å). The XRD patterns were analyzed with the General Structure Analysis System (GSAS) software.

Formation energies, intercalation energies, and density of states for the different *RE*Ba1.9 compounds were calculated through density functional theory using the Quantum-ESPRESSO package (**Giannozzi *et al.***, 2009). The electron–ion interaction was described by ultrasoft pseudopotentials generated using the Rappe–Rabe–Kaxiras–Joannopoulos method (PSlibrary - QuantumESPRESSO, https://pseudopotentials.quantum-espresso.org/legacy_tables). The van der Waals interactions were estimated using the DFT-D3 semiempirical method (**Grimme *et al.***, 2010). The cutoff energy that we chose was 60 Ry for all atoms involved. We implemented the DFT+U (U for Cu 3*d* of 7.0 eV). The threshold for self-consistency was 1×10−5 Ry. Brillouin zone integration was defined in 4×4×12 k-points. For the calculations of variable cell relaxation, we used the quasi-Newton Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno algorithm until the forces on each atom were less than $10^{-3}$ eV $Å^{-1}$ and the energy difference between consecutive steps was less than $10^{-6}$ eV. In every *RE*Ba1.9 calculation, all the atoms were free to relax. All molecular and density plots were made with the VESTA package (**Momma & Izumi**, 2011). The formation energy ($E_f$) was calculated using the equation

$$E_f = E_{REBa1.9} - nE_{RE} - mE_{Ba} - lE_{Ca} - pE_{Cu} - qE_{O} \quad (1),$$

where $E_{REBa1.9}$ is the total energy of all the compound after geometry, relaxation, $nE_{RE}$ is the energy of the n RE atoms, $mE_{Ba}$ is the energy of the m Ba atoms, $lE_{Ca}$ is the energy of the l Ca atoms, $pE_{Cu}$ is the energy of the p isolated Cu atoms, and $qE_O$ is the energy of the q isolated O atoms. The energy required to substitute a Ba for a Ca atom was calculated using the replacement energy ($E_{int}$) as described by the equation

$$E_r = E_{REBa1.9} - E_{RE-123} - nE_{Ca} + mE_{Ba} \quad (2)$$

**Table 1.** Calcination and sintering temperatures of the $REBa_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_{7-\delta}$ (RE = Ho, Dy, Gd, and Sm) compounds

| Sample | Calcination temperature (°C) | Sintering temperature (°C) |
|---|---|---|
| HoBa1.9 | 840 | 915 |
| DyBa1.9 | 840 | 905 |
| GdBa1.9 | 840 | 900 |
| SmBa1.9 | 840 | 870 |

where $E_{REBa1.9}$ is the total energy of the system after the substitution of the Ba atom for Ca, $E_{RE-123}$ is the total energy of the system before the substitution, $nE_{Ca}$ is the energy of the *n* Ca atoms that were introduced to the system, and $mE_{Ba}$ is the energy of the m Ba atoms extracted from the system (**Ziemke *et al.***, 2025). The morphological properties of the compounds were evaluated by SEM using a JSM 6610-LV JEOL equipment. Magnetization measurements as a function of temperature were taken with a Quantum Design Versalab magnetometer for a temperature range of 50–300 K, with the zero field cooled/field cooled (ZFC/FC) method in several applied fields.

## Results and discussion

### *Structural analysis*

**Figure 1A** shows the XRD patterns of each *RE* ion element in the *RE*Ba1.9 system, synthesized using the SSR method. These patterns were compared with the theoretical pattern of the *RE*-123 phase. The Miller indices (*hkl*) of this phase, corresponding to the orthorhombic space group *Pmmm* (47), are also shown. We expected differences in synthesis temperatures based on previous studies that have demonstrated that the crystallization temperatures of *RE*-123 compounds vary depending on the ionic radius of the substituting $RE^{3+}$ ion (**Saavedra-Gaona *et al.***, 2020; **Topal & Akdogan**, 2012). The XRD peak positions remained unchanged for the samples prepared, suggesting that no orthorhombic to tetragonal structural phase transition occurred in *RE*Ba1.9. A reflection at $2\theta = 29.79°$ was identified and marked with the symbol (♦), corresponding to the non-superconducting $BaCuO_2$ phase with cubic symmetry and space group *Im-3m* (229). This phase is typically formed during the thermal processes involved in the SSR route. Its presence is attributed to the absence of the $RE^{3+}$ substituent in certain structural planes and to the limited inherent atomic interdiffusion (**Pinmangkorn *et al.***, 2020; **Wang *et al.***, 2025)we tried to improve the superconducting performance of bulk YBa2Cu3Oy (Y123. The absence of peaks associated with Ca-containing secondary phases indicates that calcium was successfully incorporated into the *RE*Ba1.9 crystal lattice. While Ca predominantly substitutes at the Ba site, there is a considerable possibility of partial substitution at the $RE^{3+}$ site, due to the multiple oxidation states that calcium can exhibit. To confirm the crystal structure and quantify the phase composition of the samples, the XRD patterns were refined using the Rietveld method with the GSAS software. The refined patterns for *RE*Ba1.9 are shown in **Figure 1 B-C**. In these graphs, the experimental pattern is indicated by the symbol (•), the calculated pattern is shown as a cyan line, the background as a pink line, the difference between the experimental and calculated data as a yellow line, and the Bragg positions of the identified phases are represented by vertical bars.

The agreement between the theoretical and experimental profiles confirmed that all samples crystallized in an orthorhombic structure with *Pmmm* (47) symmetry, corresponding to a superconducting phase. This was further supported by the low reliability factors obtained from the refinements ($\chi^2$ and $R(F^2)$). The results indicated that the crystal structure was preserved when the Y atom was substituted with trivalent $RE^{3+}$ ions. The *a*, *b*, and *c* lattice parameters shown in **Figure 1D** increased with larger ionic radii, along with

the unit cell volume, as observed in the magnified view of the main XRD peak (**Figure 1A**, inset). All XRD patterns exhibited a shift toward lower angles as the ionic radius of the *RE* element increased (with coordination number VIII: $Ho^{3+}$ = 1.015 Å, $Dy^{3+}$ = 1.027 Å, $Gd^{3+}$ = 1.053 Å, and $Sm^{3+}$ = 1.079 Å). No diffraction peaks corresponding to Ca-containing secondary phases were detected, indicating that Ca was incorporated into the *RE*-123 lattice structure. Although $Ca^{2+}$ (0.99 Å) primarily substitutes at the $Ba^{2+}$ (1.42Å) site, there is a high probability that it also substitutes at the $RE^{3+}$ site due to the multiple oxidation states of Ca (**Laval & Orlova**, 2002).

The phase content W (%) showed values of 9.8% and 10.9% for the $BaCuO_2$ phase in the HoBa1.9 and DyBa1.9 samples, respectively. The structural anisotropy percentage of the *RE*Ba1.9 samples was calculated using the relation $(\Delta = 100(b - a))/[0.5(b + a)]$, as shown in **Table 2**. These results indicate that, although there are changes in the lattice parameters a and b, the structural anisotropy of the *RE*Ba1.9 compounds decreases as the ionic radius of the *RE* element increases, exhibiting high planar anisotropy with $a \ll c$.

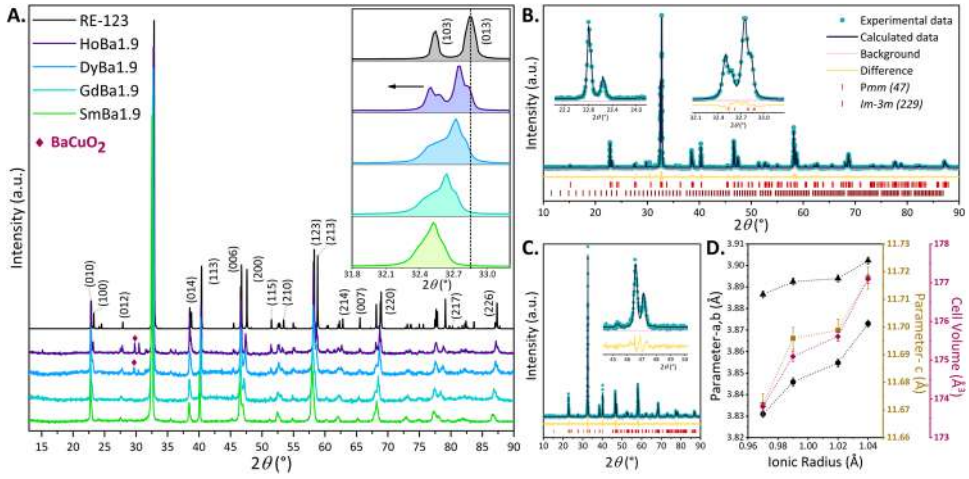



**Figure 1. (A)** Measured XRD pattern for the $REBa_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_{7-\delta}$ superconductor as a function of the incidence angle 2θ. The inset shows a zoomed view of the 2θ range [31°, 33°]. Peaks corresponding to the theoretical 123 phase with space group Pmmm (47) are indicated. Rietveld refinement results for samples **(B)** HoBa1.9 and **(C)** GdBa1.9. **(D)** Dependence of lattice parameters (a, b, and c) and unit cell volume on the ionic radius

**Table 2.** Structural parameters, phase content, orthorhombicity, and reliability factors obtained from the Rietveld refinement

| Sample | Phase | Lattice parameters | | | Cell volume | Cristallite size | Phase content | Anisotropy | c/a ratio | Reliability parameters | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *a* (Å) | *b* (Å) | *c* (Å) | (Å³) | *nm* | W (%) | Δ=(100(b-a))/(0.5(b+a)) | | $\chi^2$ | R(F²) |
| HoBa1.9 | Ho-123 | 3.831(1) | 3.886(6) | 11.672(1) | 173.796(7) | 50.3±20.4 | 90.2 | 1.44 | 3.047 | 1.41(1) | 0.131(1) |
| | $BaCuO_2$ | 18.850 (5) | | | | | 9.8 | | | | |
| DyBa1.9 | Dy-123 | 3.845(9) | 3.892(5) | 11.695(9) | 175.097(4) | 54.6±37.6 | 89.1 | 1.204 | 3.041 | 1.34(5) | 0.100(1) |
| | $BaCuO_2$ | 18.452(3) | | | | | 10.9 | | | | |
| GdBa1.9 | Gd-123 | 3.854(8) | 3.894(1) | 11.698(8) | 175.612(9) | 65.1 ± 46.3 | 100 | 1.011 | 3.035 | 1.35(7) | 0.097(2) |
| SmBa1.9 | Sm-123 | 3.873(1) | 3.902(3) | 11.717(7) | 177.100(2) | 56.9 ± 25.9 | 100 | 0.753 | 3.025 | 1.36(9) | 0.041(8) |

This suggests a correlation between the $RE^{3+}$ ionic size and the structural symmetry of the system, possibly due to a more uniform accommodation of the crystal lattice as the ionic radius increases.

The crystallite size of all obtained samples was determined using the Scherrer equation: $L = \kappa\lambda/\beta \cos\theta$ where $\lambda$ is the wavelength of the incident beam, $\beta$ is the full width at half maximum (FWHM), θ is the Bragg angle of the most intense peak, and $\kappa$ is the shape factor, taken as 0.9 (**Fatimah *et al.***, 2022). The results in **Table 2** indicate that variations in the ionic radii led to changes in bond distances, which are reflected in the formation of crystallites of different sizes, as well as slight modifications in peak broadening.

### *Electronic structure analysis*

**Figure 2** shows the three structures, *RE*-123, *RE*Ba1.9, and *RE*Ca-123, studied to determine the energies of *RE* and Ca in the *RE*-123-type structure. The calculated lattice parameters for the *RE*-123 superconductors (*RE* = Sm, Ho, Gd, Dy) revealed a variation consistent with ionic radius changes of the rare-earth ions. The parameter *a* decreased progressively from Sm-123, with a lattice parameter a calculated at 3.8451 Å, to Ho-123, with a lattice parameter a calculated at 3.7998 Å, correlated with the decreasing ionic radius from Sm to Ho. A similar trend was seen for parameter *b*, from 3.9477 Å for Sm to 3.9277 Å for Ho. The *c* lattice constant exhibited a slight but consistent reduction, from 11.790 Å for Sm to 11.7474 Å for Ho. The reduction in lattice parameters was consistent for all the materials studied compared with the Sm case (**Table 3**). The parameters calculated were in good agreement with the experimental values reported for Ho, Gd, Dy, and Sm.

The formation energy for all the involved Sm-123 species calculated from Eq. 1 is presented in **Table 3**. The calculated $E_f$ value was -5.64 eV per atom, while for SmBa1.9 and SmCa-123, the formation energies were -5.64 eV and -5.53 eV, respectively. These results evidenced that the three systems studied remained energetically stable but that the high values of Ca replacements, as in the case of SmCa-123, were not as energetically favorable as SmBa1.9. The replacement energy $E_r$ calculated from Eq. 2 showed that, for SmBa1.9, replacing one Ba atom with one Ca atom releases 1.18 eV, indicating that the substitution is exothermic. In contrast, for SmCa-123, high Ca contents require 0.69 eV per substituted atom, indicating that extensive Ca substitution is energetically unfavorable because the process is endothermic.

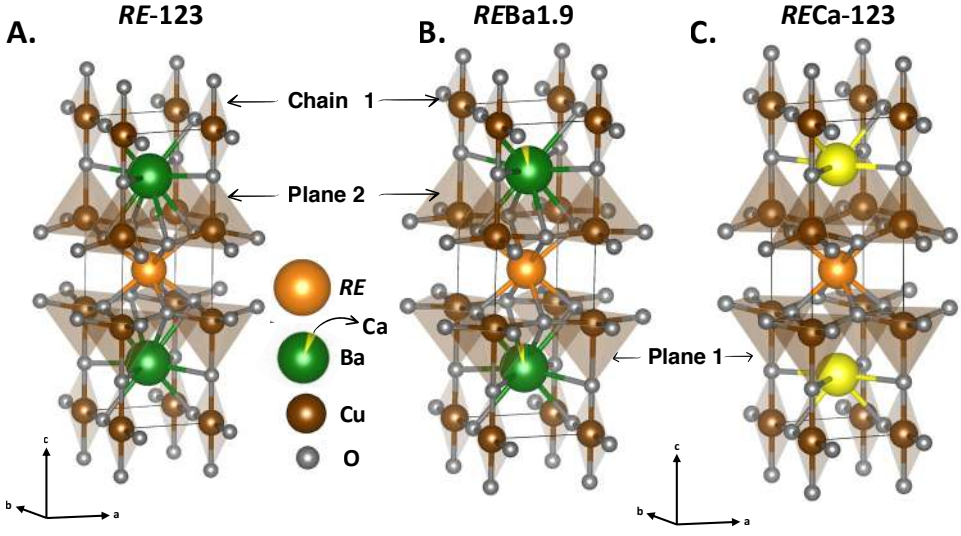



**Figure 2.** Superconductors unit cells: **(A)** $REBa_2Cu_3O_7$ (RE-123), **(B)** $REBa_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_7$ (REBa1.9), and **(C)** $RECa_2Cu_3O_7$ (RECa-123), constructed from the refined structural parameters

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):610-627, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4046

**Table 3.** Lattice parameters a, b, c, formation energy $E_f$, and intercalation energy $E_{int}$ for $REBa_2Cu_3O_7$ (RE-123), $REBa_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_7$ (REBa1.9), and $RECa_2Cu_3O_7$ (RECa-123) superconductor systems with RE = Ho, Dy, Gd, and Sm

| System | Lattice vectors | | | Formation energy | Replacement energy | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *a* | *b* | *c* | $E_f$ / *atom* (eV/atom) | $E_r$ / *atom* (eV/atom) | |
| $HoBa_2Cu_3O_7$ | 3.7998 | 3.9277 | 11.7474 | -5.64 | Sm → Ho | -0.11 |
| $DyBa_2Cu_3O_7$ | 3.8074 | 3.9327 | 11.7532 | -5.65 | Sm → Dy | -0.17 |
| $GdBa_2Cu_3O_7$ | 3.8261 | 3.9422 | 11.7716 | -5.65 | Sm → Gd | -0.15 |
| $SmBa_2Cu_3O_7$ | 3.8451 | 3.9477 | 11.790 | -5.64 | -- | -- |
| $HoBa_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_7$ | 3.831 | 3.886 | 11.672 | -5.65 | Ba→ Ca | -0.21 |
| $DyBa_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_7$ | 3.845 | 3.892 | 11.695 | -5.65 | Ba→ Ca | -0.56 |
| $GdBa_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_7$ | 3.854 | 3.894 | 11.698 | -5.66 | Ba→ Ca | -1.03 |
| $SmBa_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_7$ | 3.873 | 3.902 | 11.717 | -5.64 | Ba→ Ca | -1.18 |
| $HoCa_2Cu_3O_7$ | 3.5486 | 3.8602 | 11.5757 | -5.55 | Sm → Ho | -0.33 |
| | | | | | Ba→ Ca | 0.58 |
| $DyCa_2Cu_3O_7$ | 3.5538 | 3.8693 | 11.5625 | -5.56 | Sm→ Dy | -0.36 |
| | | | | | Ba→ Ca | 0.59 |
| $GdCa_2Cu_3O_7$ | 3.5685 | 3.8874 | 11.5687 | -5.55 | Sm → Gd | -0.24 |
| | | | | | Ba→ Ca | 0.64 |
| $SmCa_2Cu_3O_7$ | 3.581 | 3.9092 | 11.556 | -5.53 | -- | -- |
| | | | | | Ba→ Ca | 0.69 |

For Ho-123, the formation energy was calculated at -5.64 eV, and the replacement energy of the Sm→Ho process was an exothermic process, giving -0.11 eV per atom to the system. The HoBa1.9 remained stable, with a formation energy of 5.65 eV per atom, while the Ba→Ca substitution energy was calculated at -0.21 eV. In this case, if the amount of Ca replaced into the structure is increased, the replacement energy becomes positive, showing the endothermic nature of replacing high CA values, with a calculated value of 0.58 eV per atom.

Gd-123 had an $E_f$ (calculated with Eq. 1) of -5.65 eV; the replacement of an Sm atom with a Gd one was calculated at -0.24 eV. On the other hand, for GdBa1.9 and GdCa-123, the formation energy was -5.65 eV and -5.55 eV, respectively. As in other cases, the high amount of Ca in the structure is less energetically favorable. The replacement energy of Ba→Ca in GdBa1.9 was calculated at -1.03 eV, while for GdCa-123, the energy was 0.64 eV. Again, the calculated energies suggested that Ca incorporation in the structure may be energetically favorable, in agreement with the experimental formulation. For Dy-123, DyBa1.9, and DyCa-123, the formation energy was calculated at -5.64 eV, -5.65 eV, and 5.56 eV per atom, respectively. The replacement energy of Ba→Ca in the $DyBa_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_7$ was calculated at -0.56 eV, while for DyCa-123, the replacement energy was calculated at 0.59 eV per atom. As in the other cases, the calculations predicted that for the experimental proportions to be energetically favorable and the high amounts of Ca in the structure stable, the substitution of energy from the system is required.

**Figure 3** shows the comparative density of states (DOS) analysis for the series of *RE*-123-based superconductors (*RE* = Sm, Eu, Gd, Dy, Ho) and their calcium-substituted

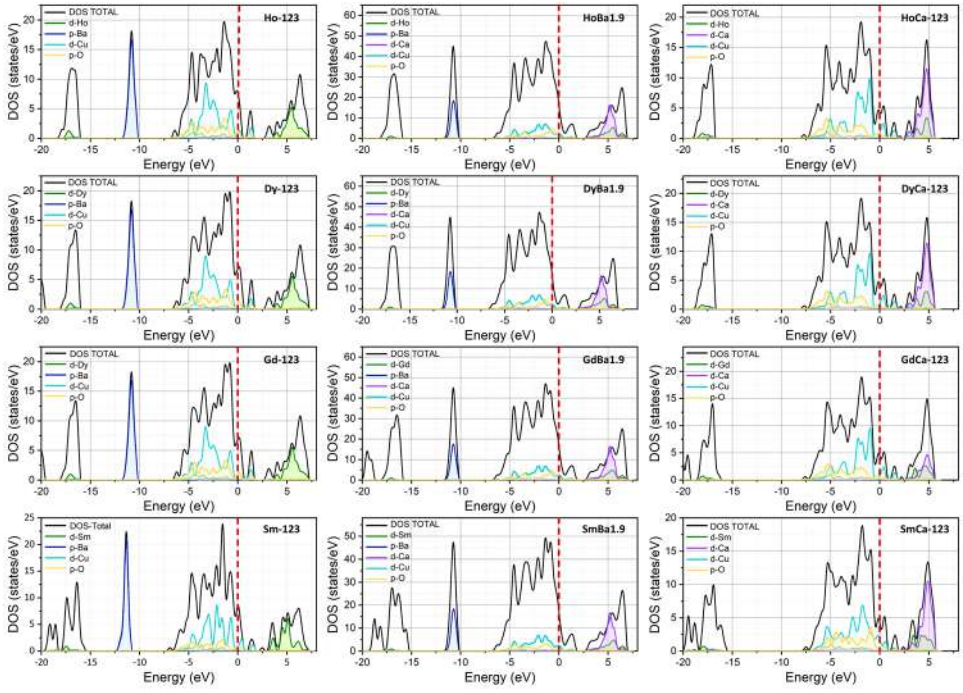



**Figure 3.** Density of states calculated for $REBa_2Cu_3O_7$ (RE-123), $REBa_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_7$ (REBa1.9), and $RECa_2Cu_3O_7$ (RECa-123) superconductor systems with RE = Ho, Dy, Gd, and Sm

derivatives. The calculated DOS indicated systematic electronic modifications related to elemental substitution at the Ba site. In all pristine compounds, i.e., with no Ca intercalation, the states below the Fermi level predominantly originate from Cu-3*d* orbitals complemented by significant contributions from O-2*p* orbitals. States above the Fermi energy mainly reflect *RE d*-states and partially Ba-derived orbitals located at higher energies, about 4 eV to 6 eV. Upon gradual Ca substitution, a notable redistribution of electronic states occurs. Here, Ca substitution systematically introduced distinct Ca-*d* states into the higher-energy region, clearly evident between 4 and 6 eV above the Fermi level. Although these Ca-induced states were energetically distant from the Fermi level, their presence markedly altered the local chemical environment, resulting in subtle yet observable shifts in the electronic distribution of Cu-3*d* and O-2*p* orbitals around the Fermi region. Specifically, the progressive increase in Ca content consistently reduced the relative contribution of *RE*-derived states and modified Ba/Ca balance, suggesting structural and electronic alterations that potentially affect superconducting properties indirectly. It was observed that even minor chemical modifications, such as Ba → Ca replacement, induced significant electronic changes that influenced the structural stability, electron-phonon interactions, and ultimately, the superconducting transition characteristics of this high-temperature superconductor family.

### *Morphological analysis*

The micrographs obtained from the secondary electrons shown in **Figure 4** correspond to SEM images of the fractured surfaces of ceramic samples HoBa1.9 **(A)**, DyBa1.9 **(B)**, GdBa1.9 **(C)**, and SmBa1.9 **(D)**. All images were obtained at 1000x magnification, with insets at 3500x to highlight fine morphological details. In micrograph **(A)**, corresponding to the HoBa1.9 sample, relatively dense areas and lamellar surfaces can be observed, suggesting a partially compact microstructure. Some dispersed cavities or pores are visible, as well as regions with trans-granular fracture, indicating a certain degree of grain cohesion. The inset reveals a more detailed surface, with irregular pores and well-defined edges,

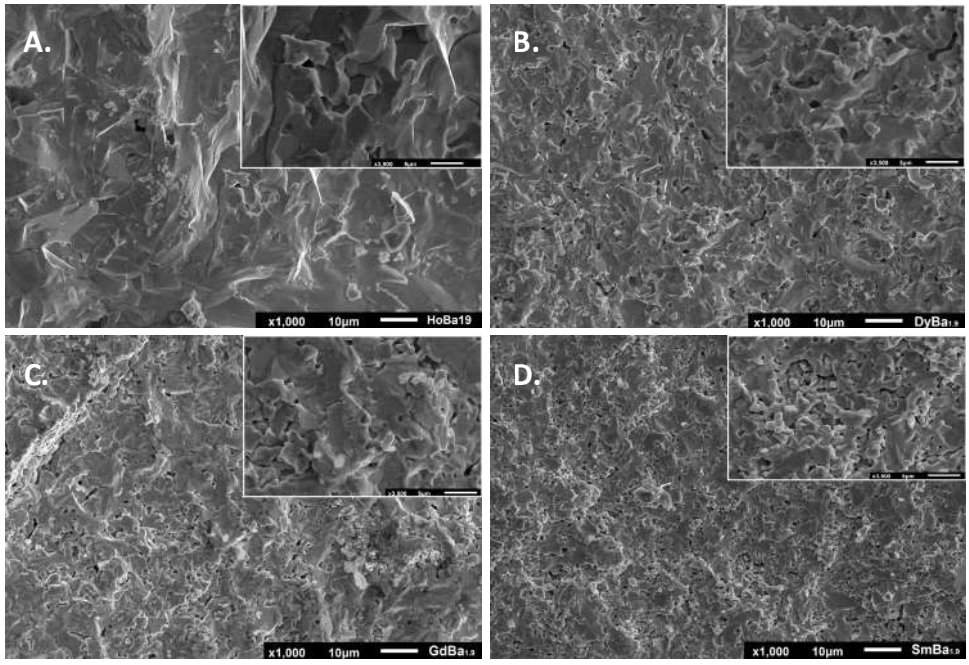



**Figure 4.** SEM images taken with the secondary electrons of the granule surface of the $REBa_{1.9}Ca_{0.1}Cu_3O_{7-\delta}$ (REBa1.9) superconductors (magnification: 1 k×). There is a 3.5 k micrograph in each inset. **(A)** HoBa1.9, **(B)** DyBa1.9, **(C)** GdBa1.9, and **(D)** SmBa1.9

suggesting incomplete or heterogeneous sintering compared to the other compositions.

In contrast, the micrographs of the DyBa1.9 (B), GdBa1.9 (C), and SmBa1.9 **(D)** samples reveal more porous surfaces and a less dense morphological texture. The DyBa1.9 sample exhibits an open microstructure, with numerous interconnected pores and a homogeneous distribution, indicating a lower degree of sintering. The GdBa1.9 sample shows a rougher surface with high porosity, although some regions of greater densification are observed, which may be attributed to local variations in the thermal process. Finally, the micrograph corresponding to the SmBa1.9 sample reveals a highly porous structure, with rounded and uniformly distributed cavities. These morphological differences highlight how the nature of the rare earth cation influences the final microstructure of the material, affecting both densification and pore connectivity.

The morphology of these materials significantly affected both current flow and magnetic field behavior. In samples with higher porosity and lower densification (DyBa1.9, GdBa1.9, and SmBa1.9), the presence of interconnected pores could have acted as scattering centers and weak links, hindering the continuous flow of charge carriers. This may result in reduced electrical conductivity and a lower critical current density ($J_c$) (**Salama *et al.***, 1989). Furthermore, the irregular distribution of pores and grain boundary defects can serve as magnetic flux pinning centers, which may either enhance or impair the pinning capability depending on their size and distribution (**Slimani *et al.***, 2019). In contrast, the observed HoBa1.9 sample's more compact and lamellar morphology is likely to promote better grain connectivity and fewer weak links, thus enabling more efficient current transport and potentially improving flux pinning performance (**Matsushita**, 2000). Overall, the microstructural differences induced by the choice of a rare earth cation play a crucial role in the electromagnetic behavior of these materials.

### *Critical magnetic parameters*

*Critical temperature ($T_c$) and irreversibility temperature ($T_{irr}$).* The typical behavior of a superconductor is characterized by the clear presence of $T_c$, which marks the transition

between the normal and superconducting phases, as evidenced by the onset of the diamagnetic response observed below $T_c$. The $T_c$ values for the *RE*Ba1.9 compounds were determined from the intersection of the extrapolated magnetization curves corresponding to the normal and superconducting phases in the Zero Field Cooling (ZFC) mode (**Figure 1**). The irreversibility temperature ($T_{irr}$) was determined by accurately identifying the bifurcation point between the ZFC and FC curves (**Figure 5**). This parameter is significant, as it provides information on the stability of the superconducting state against thermal fluctuations. According to the values presented in **Table 4**, the materials studied exhibited Tc values above 30 K and can, therefore, be classified as high-temperature superconductors (HTcS, Type II) (**Sunku Prasad *et al.***, 2019). The $T_{irr}$ is consistently lower than $T_c$, as expected in high-temperature superconductors, due to the presence of flux creep and thermal fluctuations. Additionally, $T_c$ showed a strong dependence on the ionic radius of the substituent ion $RE^{3+}$. In this context, $T_c$ increased as the ionic radius of $RE^{3+}$ decreased, a trend that suggests that smaller $RE^{3+}$ ions may induce less structural distortion or favor more efficient charge carrier distribution within the $CuO_2$ planes, which in turn enhances the superconducting properties.

Based on the ionic radii of $Ba^{2+}$ (1.35 Å) and $Ca^{2+}$ (0.99 Å), the smaller size of $Ca^{2+}$ suggests that it can substitute into the $Ba^{2+}$ site within the crystal lattice. From a charge compensation perspective, both $Ca^{2+}$ and $Ba^{2+}$ are divalent cations, making such a substitution chemically favorable. When $Ca^{2+}$ replaces $Ba^{2+}$, it acts as a hole dopant and induces the formation of vacancies at $Ba^{2+}$ sites. This substitution reduces the overall positive charge within the unit cell, thereby increasing the hole carrier concentration. As a

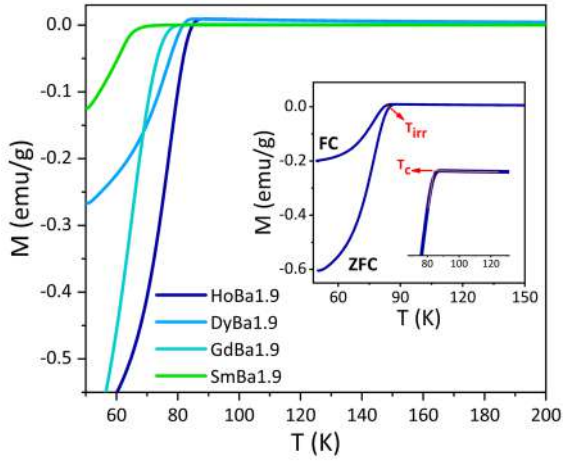



**Figure 5.** Magnetization curves as a function of temperature in ZFC mode for the REBa$_{1.9}$Ca$_{0.1}$Cu$_3$O$_{7-\delta}$ (REBa1.9) superconductor systems. The inset illustrates the criteria used to determine $T_c$ and $T_{irr}$.

**Table 4.** Thermodynamic parameters for REBa$_{1.9}$Ca$_{0.1}$Cu$_3$O$_{7-\delta}$ (REBa1.9) superconductors systems.

| System | $T_c$ (K) | $T_{c0}$ (K) | $A_S$ (×10$^{-9}$) (1/K) | $B_{LD}$ (×10$^{-3}$) | $\xi_{ab}$ (Å) | $\xi_c$ (Å) | $T_{irr}$ (K) | $\lambda_{ab}(0)$ (Å) | $\xi_{Hc2}(0)$ (Å) | $\kappa$ | $H_{c1}(0)$ (Oe) | $H_{c2}(0)$ (Oe) | $J_c(0)$ (1×10$^6$) (A/cm$^2$) | $H_{c2}(0)/T_{c0}$ (Oe/K) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HoBa1.9 | 85.75 | 83.89 | 5.37 | 1.19 | 12.15 | 1.19 | 85.51 | 2390 | 304.47 | 7.84 | 183 | 3550 | 5.79 | 42.31 |
| DyBa1.9 | 82.42 | 81.39 | 5.23 | 0.95 | 12.00 | 0.95 | 82.36 | 2460 | 333.44 | 7.37 | 211 | 2960 | 4.99 | 36.36 |
| GdBa1.9 | 71.57 | 70.58 | 6.53 | 0.85 | 13.51 | 0.85 | 71.27 | 2840 | 312.96 | 9.07 | 191 | 3360 | 3.95 | 47.60 |
| SmBa1.9 | 68.06 | 66.42 | 10.41 | 1.63 | 16.94 | 1.63 | 67.75 | 3120 | 68.56 | 45.50 | 178 | 70000 | 15.10 | 1053.89 |

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):610-627, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4046

consequence, $T_c$ tends to decrease with increasing $Ca^{2+}$ content due to the modification of the charge carrier balance. Furthermore, a decrease in the ionic radius of the *RE* element also leads to a reduction in Tc. This behavior is commonly attributed to increased lattice distortion and modified electronic structure, both of which affect the superconducting properties (**Jin *et al.,*** 2009; **Noudem *et al.***, 2003).

Mid-field transition temperature value ($T_{c0}$), penetration length ($\lambda_{ab}$), and critical current density ($J_c$). $T_{c0}$ is the mean-field transition temperature, i.e., the temperature at which the material becomes superconducting according to the mean-field model (**Mosqueira *et al.***, 1996). In this model, interactions and thermal fluctuations are assumed to be negligible or minimized. The model is based on theories such as the Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) theory, or more complex models adapted to the systems analyzed in this study (**van Otterlo *et al.***, 1999). **Figure 6A** shows how we determined the Tc0 value by extrapolating the linear region $-T/\Delta\chi$ to its intersection with the temperature axis. The analysis of the excess diamagnetism ($\Delta\chi$) above $T_{c0}$ was done in terms of thermal fluctuations in the amplitude of the order parameter, characterized by $\xi_{ab}(0)$ and $\xi_c(0)$. Equation 3 represents a quadratic function. When plotting $(-T/\Delta\chi)^2$ as a function of the reduced temperature ($\varepsilon$), a parabolic region was observed for positive values of $\varepsilon$ (**Figure 6B**). The data we obtained fit a second-degree polynomial, allowing for the determination of the parameters $B_{LD}$ (Lawrence Doniach parameter) and $A_s$ (Schmidt diamagnetism) (**Table 4**). The inset in **Figure 6B** shows a log-log plot of the excess diamagnetism as a function of temperature, which allows for the determination of the system's dimensionality ($x$). From the slope of the linear fit, denoted as $x$, one can infer the dimensionality of the system: $x = -1$, indicating a two-dimensional (2D) regime, while $x = -0.5$ corresponds to a three-dimensional (3D) regime. The extracted values range from −0.97 (for SmBa1.9) to 1.01 (for DyBa1.9) confirmed the two-dimensional nature of the superconducting systems under study.

$$\left(\frac{T}{\Delta\chi}\right)^2 = \frac{1}{4A_s^2}\varepsilon^2 + \frac{B_{LD}}{A_S^2}\varepsilon \tag{3}$$

To determine the coherence length associated with the fluctuation regime in the *ab* planes, $\xi_{ab}(0)$, and along the *c*-axis, $\xi_c(0)$, we used Equation 4 in the MKS system, where $\phi$ is the magnetic flux quantum, $s$ is the periodicity length of the superconducting $CuO_2$ layers, and the synthesized samples are orthorhombic with two $CuO_2$ planes per unit cell, with $s = d_1 + d_2 \approx c$, and $K_B$ is the Boltzmann constant, while $\mu_0$ is the permeability of free space.

$$\xi_{ab}(0) = \sqrt{\frac{3A_s\phi^2 s}{\mu_0 \pi K_B}};\ \xi_c(0) = \frac{s\sqrt{B_{LD}}}{2} \tag{4}.$$

When the magnetic field $H$ is applied perpendicular to the $CuO_2$ planes, it has a significant effect on the values of the penetration depth, $\lambda_{ab}(T)$, the Ginzburg–Landau (GL) parameter, and the upper critical field $H_{c2}$. These values can be extracted from reversible magnetization data below $T_{c0}$. Since $\lambda_{ab}(T)$ varies with temperature, we selected several temperatures below $T_{c0}$ at which $\lambda_{ab}(T)$ can be considered fixed. Based on these values, an extrapolation to T = 0 K was performed, yielding the zero-temperature penetration depth $\lambda_{ab}(0)$. It was evident that $\Delta M_{ab}$ exhibited a linear dependence on $Ln(H)$, with a slope given by $\lambda_{ab}(T) = \sqrt{s\phi_0^2/64\pi^2(2s\phi_0 C + k_B T)}$. Therefore, plots of $\Delta M_{ab}$ as a function of $LnH$ were constructed for each selected temperature (**Figure 6C**). These isotherms correspond to the reversible magnetization regime. The detailed procedure can be found in **Camargo *et al.*** (2025).

$$\Delta M_{ab} = \left(\frac{\phi_0}{64\pi^2\lambda_{ab}^2(T)} - \frac{k_B T}{2s\phi_0^2}\right) Ln(H) \tag{5}$$

**Figure 6D** shows the variation in penetration depth with temperature, compared with different theoretical models. The red solid line represents the result from the two-fluid

model (Eq. 6), the black solid line corresponds to BCS calculations (Eq. 7), and the blue solid line shows the result from the quadratic model (Eq. 6). In the two-fluid model, $\lambda ab$ (0) was treated as a free parameter, and the exponent was fixed at $n = 4$. For the quadratic model, $\lambda ab$ (0) was again a free parameter with $n = 2$. In the BCS model, $\lambda ab$ (0) was the only fitting parameter. In all cases, the critical temperature $T_c$ had the same value. The fits obtained from each model for the HoBa1.9 sample are also shown. The two-fluid model provided the best agreement with the experimental data, for which we chose it to perform a reliable extrapolation at zero temperature and determine $\lambda ab$ (0) for each system.

$$\lambda_{ab}(T) = \frac{\lambda_{ab}(0)}{\left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^n\right]^{1/2}} \quad (6),$$

$$\lambda_{ab}(T) = \frac{\lambda_{ab}(0)}{\left[1 - \left(\frac{T}{T_C}\right)^{3-\frac{T}{T_c}}\right]^{1/2}} \quad (7).$$

The contribution of thermal fluctuations of the order parameter to the London term of the magnetization was evaluated to determine the upper critical field $H_{c2}(0)$ (**Vidal *et al.***, 1988), as defined by Equation 8. This expression is a linear function of $\Delta M_{ab}$. To apply this method, the function $y = Ln(\eta H_{c2}/eH)$ was plotted versus $Ln\ H$, and the resulting straight lines were extrapolated to the $y$-axis, as shown in the inset of **Figure 7A**. From these extrapolations, $H_{c2}$ (T) was easily determined. For all samples, the same value of the parameter $\eta = 1.4$, associated with the vortex lattice structure, was used as proposed in the Hao–Clem theory. The values of

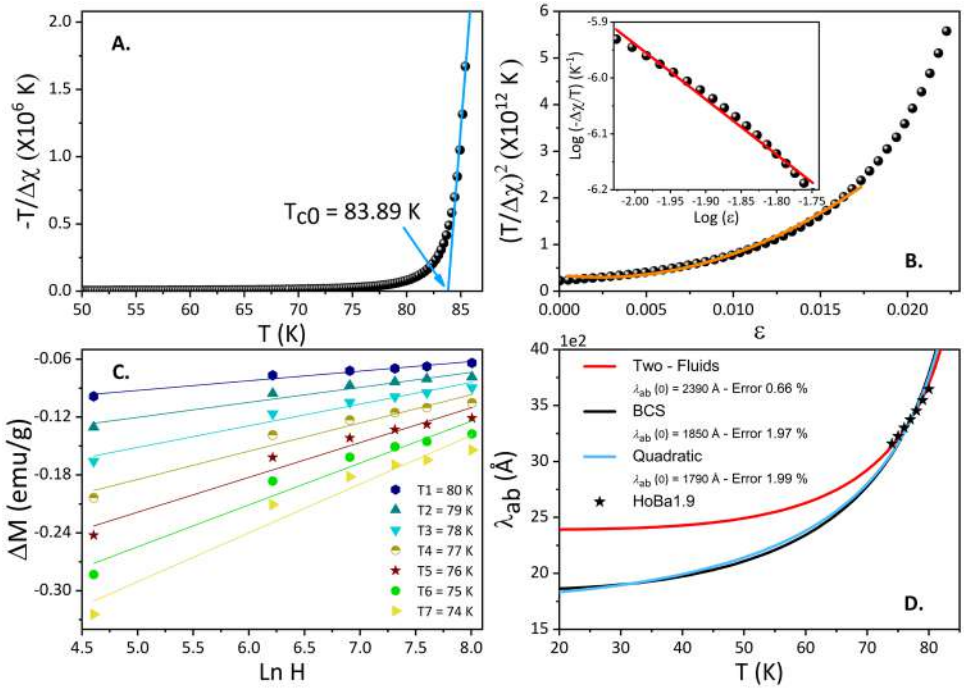



**Figure 6. (A)** Method used to determine the reduced temperature ($T_{c0}$). **(B)** Excess diamagnetism as a function of reduced temperature. **(C)** Isotherms of excess magnetization as a function of Ln H in the low-temperature regime (79.2 – 89.5 K). **(D)** Magnetic penetration depth as a function of temperature for the HoBa1.9 superconductor system

$H_{c2}$ (T) were then plotted as a function of temperature, resulting in a straight line with a slope $dH_{c2}/dT$ intercepting the temperature axis near $T_{c0}$. The value of $dH_{c2}/dT$ allowed us to estimate $H_{c2}(0)$ using Equation 9. By substituting the $H_{c2}(0)$ value into the equation $\xi_{Hc2} = \sqrt{\phi_0/2\pi H_{c2}(0)}$, we calculated the coherence length $\xi_{Hc2}(0)$. The values for each of the systems are presented in **Table 4**.

$$n\frac{\rho H_{c2}}{eH} = -\frac{32\pi^2\lambda_{ab}^2}{\phi_0(1-g)}\Delta M_{ab} + \frac{g}{1-g}Ln\frac{g}{e}; g(T) = \frac{32\pi^2\lambda_{ab}^2 k_B T}{\phi_0^2} \quad (8),$$

$$H_{c2}(0) = 0.7T_{c0}[dH_{c2}/dT]_{\approx T_c} \quad (9).$$

Several studies on the $J_c$ in polycrystalline samples have highlighted the strong granularity of these compounds, which significantly limits the global values to very low levels (**Yamamoto *et al.***, 2008). Using theoretical models, it is possible to calculate the value of $J_c$, but it must be noted that the superconducting state requires the temperature, magnetic field, and current density to remain below their respective critical parameters; therefore, determining these values is essential. To estimate the order of magnitude of $J_c$ (0), we used Equation 10 ( **Shams & Ranjbar**, 2022), taking into account different $\xi_{Hc2}(0)$ and $\lambda_{ab}$ (0) for each of the synthesized system values (**Table 3**). The order of magnitude of $J_c(0)$ for each of the superconducting samples was approximately $1\times10^6$ A/cm$^2$, which is a notably high value for a type-II superconductor, and may be attributed to the high densification of the material, as well as to the epitaxial growth observed in the micrographs. This suggests that the grains and crystals within the material are well-packed and partially biaxially oriented, reducing the void space between them. Such structural improvement resulted in enhanced electrical conductivity and a higher capacity to carry current without resistance. Using the obtained $J_c$ (0) value, it was possible to model the temperature dependence of the critical current density as $J_{c,ab}(0)$. **Figure 7C** shows the critical current

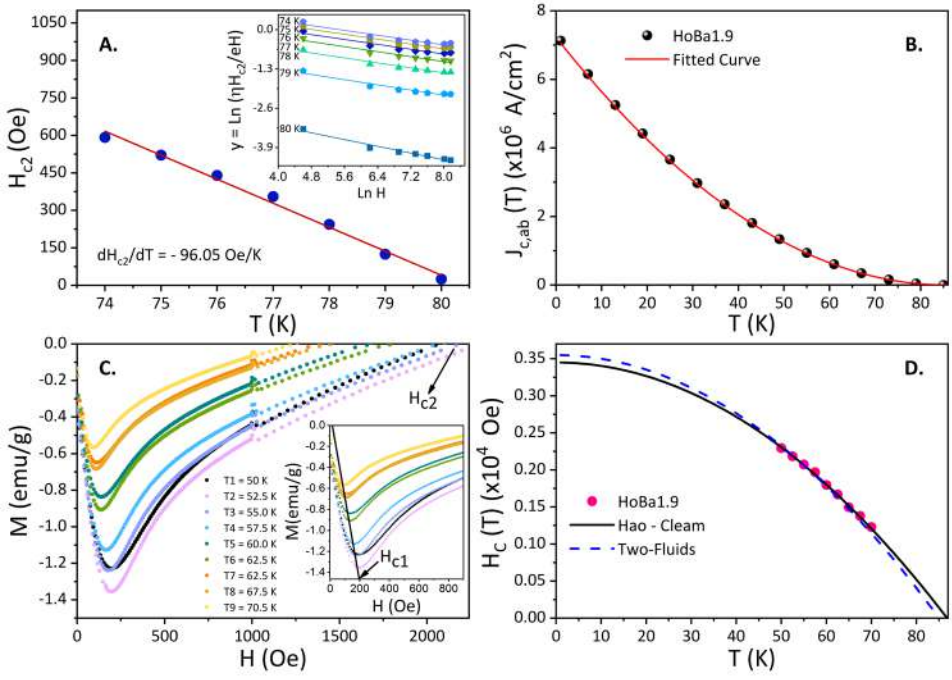



**Figure 7. (A)** Critical magnetic field ($H_{c2}$) as a function of temperature ($T$). **(B)** Critical current density ($J_c$) versus $T$ curve. **(C)** Hysteresis loops measured at 50 K for different temperatures. **(D)** Thermodynamic critical field ($H_c$) as a function of T, determined in different ways for the HoBa1.9 superconductor system

density as a function of temperature for the polycrystalline HoBa1.9 sample, which was obtained by comparing magnetization data, as described in Equation 11. $J_{c,ab}(0)$ tends to decrease as the temperature approaches $T_c$. (**Matsushita *et al.***, 2002); this is attributed to the increase in thermal vibrations at higher temperatures, which disrupts the orderly motion of Cooper pairs responsible for superconductivity. As a result, the material's ability to carry electrical current without resistance decreases (**Yamamoto *et al.***, 2008).

$$J_c(0) = \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{\xi_{Hc2}}{\lambda_{ab}^2(0)} H_{c2} \quad (10)$$

$$J_c(T) = J_c(0)\left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)\right]^2 \quad (11)$$

**Critical fields ($H_{c1}$, $H_{c2}$)**

High-temperature superconducting materials exhibit type-II behavior, characterized by the presence of two critical fields, $H_{c1}$ and $H_{c2}$, as observed in magnetization measurements as a function of an applied magnetic field. Here, we measured at various fixed temperatures in the 50 to 70 K range, while varying the magnetic field between –30 and 30 kOe. $H_{c1}$ and $H_{c2}$ experimental values for the *RE*Ba1.9 samples are presented in **Table 4**. These values were extracted from the magnetization versus applied magnetic field $M(H)$ curves for each superconducting sample (**Figure 7C**). These data indicated that the critical fields $H_{c1}$ and $H_{c2}$ increased as the temperature decreased, suggesting greater stability of the superconducting state at lower temperatures, as reduced thermal vibrations require a stronger magnetic field to suppress superconductivity. According to our results, the synthesized superconducting samples exhibited magnetic field exclusion within the sample (Meissner effect) under low applied magnetic fields, as the $H_{c1}$ values did not exceed 250 Oe. The critical field values $H_{c2}$ (50) were found to lie approximately in the range of 1 to 30 kOe. Furthermore, we observed that both $H_{c1}$ and $H_{c2}$ decreased with increasing temperature. This behavior may be attributed to the weakening of Cooper pairs at higher temperatures due to increased thermal energy, which can break the pairs. Another possible explanation is the loss of magnetic ordering: at elevated temperatures, the alignment of magnetic moments within the material may weaken, leading to greater magnetic field penetration and, consequently, a reduction in the critical fields (**Costa & Pavão**, 2012).

We plotted the experimental data of the upper critical field $H_{c2}$ as a function of temperature for the HoBa1.9 sample and fit them using two theoretical models: the Hao–Clem model and the two-fluid model, to estimate the corresponding thermodynamic critical field curve. As shown in **Figure 7D**, the experimental results displayed good agreement with the Hao–Clem model, with $H_{c2}$ values ranging from 0.36 T at 67.5 K to 3.0 T at 50 K. The data points are represented by solid purple circles. The Hao–Clem model (**Hao *et al.***, 1991) fit is shown as a solid black line and follows a parabolic dependence given in Equation 12. Additionally, the two-fluid model (**Bardeen *et al.***, 1957) is represented by a blue dashed line and follows a similar parabolic dependence (Eq. 13). Both curves were extrapolated to zero temperature to estimate the zero-temperature upper critical field $H_{c2}(0)$.

$$H_c(T) = H_{c2}(0)\left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right] \quad (12)$$

$$H_c(T) = H_{c2}(0)\left[1 - \left(\frac{T}{T_{c0}}\right)^2\right] \quad (13)$$

An increase in the value of $H_{c2}(0)$ leads to a corresponding rise in the change in free energy, or condensation energy, as it reflects a greater resistance of the superconducting state to external magnetic fields. This implies that more energy is required to sustain superconductivity, which is manifested in the higher free energy associated with the superconducting phase. The condensation energy reaches its maximum near, in agreement with the theoretical expression $H_{c2}(0)^2 / 8\pi$, which describes the condensation energy

density (**Tinkham**, 2004)this volume emphasizes physical arguments and minimizes theoretical formalism. The second edition of this classic text features revisions by the author that improve its user-friendly qualities, and an introductory survey of latter-day developments in classic superconductivity enhances the volume's value as a reference for researchers. Starting with a historical overview, the text proceeds with an introduction to the electrodynamics of superconductors and presents expositions of the Bardeen-Cooper-Schrieffer theory and the Ginzburg-Landau theory. Additional subjects include magnetic properties of classic type II superconductors; the Josephson effect (both in terms of basic phenomena and applications and of the phenomena unique to small junctions. A strong dependence on the critical temperatures $T_c$ and $T_{c0}$ is observed. **Table 4** presents the ratio $H_{c2}(0)/T_{c0}$, known as the reduced critical field density. In general, this value is significantly higher for the SmBa1.9 system, indicating that these materials are more robust and capable of withstanding stronger magnetic fields at lower temperatures.

The $RE^{3+}$ ions such as $Sm^{3+}$, $Gd^{3+}$, $Dy^{3+}$, and $Ho^{3+}$ along with $Ca^{2+}$ doping in the Y:123 superconductor, influence key critical parameters such as $J_c$, $\xi$, and $\lambda$. It has been observed that replacing Y with these rare-earth elements alters the microstructure of the material, which in turn affects vortex pinning mechanisms, thereby modifying $J_c$. The inclusion of $Ca^{2+}$ in the Y:123 lattice can introduce defects and strain in the crystal structure that act as effective vortex pinning centers, enhancing the critical current (**Böhmer *et al.***, 1997). However, excessive $Ca^{2+}$ content may lead to structural disorder, ultimately reducing $J_c$.

## Conclusions

The analysis of the structural, energetic, and electronic properties of the *RE*-123 and *RE*Ba1.9 systems (RE = Sm, Ho, Gd, Dy) revealed clear trends associated with rare-earth and calcium substitution. The lattice parameters decreased systematically with decreasing *RE* ionic radius, reflecting expected structural contraction. All studied compounds exhibited negative formation energies, confirming their thermodynamic stability. Replacement energies for Sm → *RE* substitutions were slightly negative and increasingly favorable with heavier *RE* elements, indicating that these substitutions are energetically possible and can stabilize the lattice. In contrast, Ba → Ca substitution showed dual behavior: while partial substitution *RE*Ba1.9 was energetically favorable with negative replacement energies, full substitution *RE*Ca-123 became energetically costly, as evidenced by positive replacement energies, although the systems remained globally stable. The calculated values from DFT predicted the energetic viability of the experimental stoichiometry with partial Ca incorporation, as it achieved improved stability without introducing significant lattice strain. The complementary DOS analysis showed that Ca substitution altered the unoccupied states by introducing Ca-*d* orbitals between 4 and 6 eV above the Fermi level, modifying the local chemical environment and potentially influencing the superconducting properties through subtle electronic rearrangements. Altogether, the results supported the energetic and structural preference for rare-earth substitution combined with partial Ca doping, as found in experimentally realized high-$T_c$. From an experimental perspective, the substitution of $Y^{3+}$ by $RE^{3+}$ ions, in combination with $Ca^{2+}$ doping, had a direct impact on critical superconducting parameters. These effects were the product of modifications in the microstructure and vortex pinning mechanisms. *RE* substitution enhanced lattice rigidity and vortex pinning, while moderate Ca content introduced effective strain fields and defects that served as additional pinning centers, thus improving $J_c$.

However, excessive Ca incorporation may induce disorder, ultimately degrading superconducting performance. Altogether, the results support the energetic, structural, and functional preference for rare-earth substitution combined with partial Ca doping, as observed in experimentally realized high-$T_c$ superconductors. This synergy offers a promising route for optimizing performance through controlled chemical engineering at the atomic scale.

## Acknowledgments

This work was funded by MINCIENCIAS (Grant No. 785-2017) and was supported by the Research Directorate at Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, under project SGI 3237.

## Author contributions

**C.C.:** Formal analysis, investigation, methodology, supervision, visualization, writing of the original draft, review, and editing. **I.M. SG:** Formal analysis, investigation, methodology, supervision, visualization, writing of the original draft. **S. A-R:** Formal analysis, investigation, writing, review, and editing. **A.M. T.** and **J.L. P Jr:** Resources, supervision, writing, review, and editing. **C.A. PV:** Project administration, resources, supervision, writing, review, and editing. **D.A.L. T:** Methodology, visualization, writing, review, and editing, resources.

## Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Data and code availability

Data will be made available on request.

## References

**Muralidhar, M., Tomita, M., Suzuki, K., Jirsa, M. Fukumoto, Y, Ishihara, A.** (2010). A low-cost batch process for high-performance melt-textured GdBaCuO pellets. *Superconductor Science and Technology, 23,* 045033. https://doi.org/10.1088/0953-2048/23/4/045033

**Bardeen, J., Cooper, L. N., & Schrieffer, J. R.** (1957). Theory of superconductivity. *Physical Review, 108*(5), 1175-1204. https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1175

**Böhmer, C., Brandstätter, G., Weber, H. W**. (1997). The lower critical field of high-temperature superconductors. *Superconductor Science and Technology, 10*(7A), A1. https://doi.org/10.1088/0953-2048/10/7A/002

**Camargo, C. C. C., Saavedra-Gaona, I. M., Landínez-Téllez, D. A., Vargas, C. A. P.** (2025). Evaluation of the structural, morphological, and magnetic properties of the RE-358, RE-123, RE-Ca0.1 with RE = Gd and Sm superconductors. *Physica C: Superconductivity and its Applications, 630*, 1354647. https://doi.org/10.1016/j.physc.2025.1354647

**Costa, M. B. S. & Pavão, A. C.** (2012). Supercondutividade: Um século de desafios e superação. *Revista Brasileira de Ensino de Física, 34*, 2602-2615. https://doi.org/10.1590/S1806-11172012000200017

**Fatimah, S., Ragadhita, R., Husaeni, D. F. A., Nandiyanto, A. B. D.** (2022). How to Calculate Crystallite Size from X-Ray Diffraction (XRD) using Scherrer Method. *ASEAN Journal of Science and Engineering, 2*(1), Article 1. https://doi.org/10.17509/ajse.v2i1.37647

**Giannozzi, P., Baroni, S., Bonini, N., Calandra, M., Car, R., Cavazzoni, C., Ceresoli, D., Chiarotti, G. L., Cococcioni, M., Dabo, I., Dal Corso, A., de Gironcoli, S., Fabris, S., Fratesi, G., Gebauer, R., Gerstmann, U., Gougoussis, C., Kokalj, A., Lazzeri, M., … Wentzcovitch, R. M.** (2009). QUANTUM ESPRESSO: A modular and open-source software project for quantum simulations of materials. *Journal of Physics: Condensed Matter, 21*(39), 395502. https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/39/395502

**Grissonnanche, G., Cyr-Choinière, O., Laliberté, F., René de Cotret, S., Juneau-Fecteau, A., Dufour-Beauséjour, S., Delage, M.-È., LeBoeuf, D., Chang, J., Ramshaw, B. J., Bonn, D. A., Hardy, W. N., Liang, R., Adachi, S., Hussey, N. E., Vignolle, B., Proust, C., Sutherland, M., Krämer, S., … Taillefer, L.** (2014). Direct measurement of the upper critical field in cuprate superconductors. *Nature Communications, 5*(1), 3280. https://doi.org/10.1038/ncomms4280

**Grimme, S., Antony, J., Ehrlich, S., Krieg, H.** (2010). A consistent and accurate ab initio parametrization of density functional dispersion correction (DFT-D) for the 94 elements H-Pu. *The Journal of Chemichal Physics,* 132(15), 154104. https://doi.org/10.1063/1.3382344

**Gu, G. D., Li, L., Wang, Y., Komiya, S., Ono, S., Ando, Y., Ong, N. P., Brookhaven National Laboratory (United States).** (2010). Diamagnetism and Cooper Pairing Above Tc in Cuprates. *Physical Review. B, Condensed Matter and Materials Physics, 81*(5), 054510.

**Hao, Z., Clem, J.R., McElfresh, M.W., Civale, L., Malozemoff, A.P., Holtzberg, F.** (1991). Model for the reversible magnetization of high- kappa type-II superconductors: Application to high-Tc superconductors. *Physical Review B Condensed Matter, 43*(4), 2844-2852. https://doi.org/10.1103/physrevb.43.2844. PMID: 9997583

**Jin, W., Hao, S., Zhang, H.** (2009). The fixed triangle chemical bond and its effect in the Y1−xCaxBa2−yLayCu3Oz system from underdoped to overdoped. *New Journal of Physics, 11*(11), 113036. https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/11/113036

**Koshelev, A. E.** (1994). Ginzburg-Landau theory of fluctuation magnetization of two-dimensional superconductors. *Physical Review B, 50*(1), 506-516. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.506

**Laval, J. & Orlova, T.** (2002). Microstructure and superconducting properties of sintered DyBaCuO ceramics doped by Ca. *Superconductor Science and Technology, 15,* 1244. https://doi.org/10.1088/0953-2048/15/8/314

**Maki, K. & Beal-Monod, M. T.** (1997). Ginzburg-Landau equation and the upper critical field in anisotropic (d+s)-wave superconductivity. *Physical Review B, 55*(17), 11730-11734. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.11730

**Matsushita, T.** (2000). Flux pinning in superconducting 123 materials. *Superconductor Science and Technology, 13,* 730. https://doi.org/10.1088/0953-2048/13/6/320

**Matsushita, T., Wada, H., Kiss, T., Inoue, M., Iijima, Y., Kakimoto, K., Saitoh, T., Shiohara, Y.** (2002). Critical current properties in superconducting Y-123 tapes. *Physica C: Superconductivity, 378-381*, 1102-1107. https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)01718-5

**Momma, K. & Izumi, F.** (2011). VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *Journal of Applied Crystallography, 44*(6), 1272-1276. https://doi.org/10.1107/S0021889811038970

**Mosqueira, J., Miramontes, E. G., Torrón, C., Campá, J. A., Rasines, I., Vidal, F.** (1996). Thermal fluctuation effects on the magnetization above and below the superconducting transition in crystals in the weak magnetic field limit. *Physical Review B, 53*(22), 15272-15280. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.15272

**Noudem, J. G., Reddy, E. S., Schmitz, G. J.** (2003). Magnetic and transport properties of YBa2Cu3Oy superconductor foams. *Physica C: Superconductivity, 390*(4), 286-290. https://doi.org/10.1016/S0921-4534(03)00755-X

**Pinmangkorn, S., Miryala, M., Arvapalli, S. S., Murakami, M.** (2020). Effect of Ultra-sonicated Y2BaCuO5 on Top-Seeded Melt Growth YBa2Cu3Oy Bulk Superconductor. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 33*(6), 1667-1673. https://doi.org/10.1007/s10948-019-05405-0

**Riggs S., Vafek, O., Kemper, J.B., Betts,J.B., Migliori, A., Balakirev, .F., Hardy, W.N., Liang, R., Bonn, D.A., Boebinger, G.S.** (2011). Heat capacity through the magnetic-field-induced resistive transition in an underdoped high-temperature superconductor. *Nature Physics, 7*, 332-335 (2011). https://doi.org/10.1038/nphys1921)

**Saavedra-Gaona, I. M., Supelano, G. I., Parra-Vargas, C. A.** (2020). Determination of critical superconducting parameters based on the study of the magnetization fluctuations for RE3Ba5Cu8O18-δ (RE= Sm, Eu, Gd, Dy and Ho) ceramic superconductor system. *Ceramics International, 46*(8, Part B), 11530-11538. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.179

**Salama, K., Selvamanickam, V., Gao, L., Sun, K.** (1989). High current density in bulk $YBa_2Cu_3O_x$ superconductor. *Applied Physics Letters,n54*, 2352-2354. https://doi.org/10.1063/1.101525

**Sarıtekin, N. K., Dogruer, M., Zalaoglu, Y., Yıldırım, G., Terzioglu, C., Gorur, O.** (2016). Filling of electronic density of states in Y-123 superconducting ceramics by nano Nd substitution on Ba site in crystal structure. *Journal of Alloys and Compounds, 659*, 31-37. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.295

**Shams, G. & Ranjbar, M.** (2022). Phase diagram of high temperature $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ superconductor by Bean's model and experimental techniques. *Bulletin of Materials Sciences, 45*, 206. https://doi.org/10.1007/s12034-022-02796-0

**Slimani, Y., Almessiere, M. A., Hannachi, E., Baykal, A., Manikandan, A., Mumtaz, M., Ben Azzouz, F.** (2019). Influence of WO3 nanowires on structural, morphological and flux pinning ability of YBa2Cu3Oy superconductor. *Ceramics International, 45*(2, Part A), 2621-2628. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.201

**Sunku Prasad, J., Muthukumar, P., Desai, F., Basu, D. N., Rahman, M. M.** (2019). A critical review of high-temperature reversible thermochemical energy storage systems. *Applied Energy, 254*, 113733. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113733

**Tinkham, M.** (2004). Introduction to Superconductivity. Courier Corporation.

**Topal, U. & Akdogan, M.** (2012). The Role of Oxygenation on Superconducting Properties of RE3Ba5Cu8O18 (RE=Y, Sm and Nd) Compounds. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 25*(2), 239-244. https://doi.org/10.1007/s10948-011-1285-3

**van Otterlo, A., Golubev, D. S., Zaikin, A. D., Blatter, G.** (1999). Dynamics and effective actions of BCS superconductors. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems, 10*(1), 131-143. https://doi.org/10.1007/s100510050836

**Vidal, F., Viera, J. A., Maza, J., Ponte, J. J., García-Alvarado, F., Morán, E., Amador, J., Cascales, C., Castro, A., Casais, M. T., Rasines, I.** (1988). Excess electrical conductivity in polycrystalline Bi-Ca-Sr-Cu-O compounds and thermodynamic fluctuations of the amplitude of the superconducting order parameter. *Physica C: Superconductivity, 156*(5), 807-816. https://doi.org/10.1016/0921-4534(88)90166-9

**Wang, Y., Ono, S., Onose, Y., Gu, G., Ando, Y., Tokura, Y., Uchida, S., Ong, N.P.** (2003). Dependence of upper critical field and pairing strength on doping in cuprates. *Science, 299*(5603), 86-9. https://doi.org/10.1126/science.1078422

**Wang, Y., Zhang, Z., Gao, Z., Wang, L., Wang, Q.** (2025). Effect of oxygen partial pressure on the preparation of phase-pure YbBa2Cu3O7-y superconductor by solid-state sintering method. J*ournal of the European Ceramic Society, 45*(10), 117325. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117325

**Yamamoto, A., Polyanskii, A. A., Jiang, J., Kametani, F., Tarantini, C., Hunte, F., Jaroszynski, J., Hellstrom, E. E., Lee, P. J., Gurevich, A., Larbalestier, D. C., Ren, Z. A., Yang, J., Dong, X. L., Lu, W., Zhao, Z. X.** (2008). Evidence for two distinct scales of current flow in polycrystalline Sm and Nd iron oxypnictides. *Superconductor Science and Technology, 21*(9), 095008. https://doi.org/10.1088/0953-2048/21/9/095008

**Zhang, Y. & Xu, X.** (2020). Yttrium barium copper oxide superconducting transition temperature modeling through gaussian process regression. *Computational Materials Science, 179*, 109583. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.109583

**Ziemke, C.D., Nguyen, H-M., Amaya-Roncancio, S., Gahl, J., Xing, Y., Heitmann, T.W., Wexler, C.** (2025). Formation of lattice vacancies and their effects on lithium-ion transport in LiBO2 crystals: Comparative ab initio studies. *Journal of Materials Chemistry A, 13*, 3146-3162. https://doi.org/10.1039/D4TA05713A

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):628-644, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4072



Artículo original

# Estudio comparativo de la heteroestructura $CuO/CuWO_4$ y los óxidos CuO y $CuWO_4$: validación de aplicaciones fotocatalíticas

## Comparative study of the $CuO/CuWO_4$ heterostructure with CuO and $CuWO_4$ oxides: validating photocatalytic applications

**Angela Mercedes Raba-Páez**

Grupo de Investigación en Física de Materiales Nanoestructurados GFMN, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

## Resumen

Se presenta un estudio comparativo de las propiedades estructurales, morfológicas y ópticas de la heteroestructura $CuO/CuWO_4$ y las de estos óxidos individuales. Un primer análisis estructural semicuantitativo reveló la formación de las fases CuO y $CuWO_4$ de los óxidos individuales y la presencia en la heteroestructura de las dos fases CuO y $CuWO_4$, con 67 % y 33 %, respectivamente. Después de un análisis de refinamiento de Rietveld se encontraron una, dos y tres fases para las muestras de CuO, $CuWO_4$ y $CuO/CuWO_4$, respectivamente. A pesar de la presencia de fases secundarias en dos de las muestras, los parámetros de red determinados fueron congruentes. Por otro lado, se determinaron distintas morfologías en las tres muestras de análisis: láminas delgadas en el CuO, granos bien definidos en el $CuWO_4$, y granos que recubrían poliedros bien definidos en la heteroestructura. Además, se determinaron los *gap* de energía: 1,33 eV de *gap* indirecto en el CuO y 2,90 eV de *gap* directo en el $CuWO_4$. Se establecieron un valor de *gap* de energía directo de 2,66 eV y dos valores de *gap* de energía indirecto de 1,35 y 2,11 eV en la heteroestructura $CuO/CuWO_4$, con lo que se verificó la producción en la heteroestructura. Por último, las tres muestras de análisis se probaron mediante un sencillo proceso de degradación fotocatalítica bajo luz UV en un fotorreactor con lámparas UV de 15 W a una intensidad máxima de 254 nm y a una temperatura de operación de 20 °C. La heteroestructura exhibió un mejor desempeño en comparación con la respuesta individual de los óxidos que la componen, con una constante de velocidad de degradación fotocatalítica de $1{,}6\times10^{-3}$ $min^{-1}$.

**Palabras clave:** CuO; $CuWO_4$; heteroestructura; síntesis; fotocatálisis.

## Abstract

A comparative study of the structural, morphological, and optical properties of the $CuO/CuWO_4$ heterostructure, and of the individual oxides, is presented. Initially, a semi-quantitative structural analysis revealed the formation of CuO and $CuWO_4$ phases, respectively, for the individual oxides, and the presence of two phases: 67% of CuO and 33% of $CuWO_4$, for the heterostructure. The Rietveld refinement analysis found one, two, and three phases for the CuO, $CuWO_4$, and $CuO/CuWO_4$ samples, respectively. The lattice parameters determined were consistent, despite the presence of secondary phases in two of the samples. On the other hand, different morphologies were determined for the three analysis samples: Thin sheets for the CuO, well-defined grains for the $CuWO_4$, and well-defined grains covering polyhedral for the heterostructure. Additionally, gap energies were determined: 1.33 eV indirect gap for the CuO and 2.90 eV direct gap for $CuWO_4$. A value of direct gap energy equivalent to 2.66 eV and two values of indirect gap energy equivalent to 1.35 and 2.11 eV were established for the $CuO/CuWO_4$ heterostructure, which confirmed the production of the heterostructure. Finally, the three samples were tested in a simple photocatalytic degradation process under UV light in a photoreactor with UV lamps of 15 W, at a maximum intensity of 254 nm, and an operating temperature of 20°C. The heterostructure exhibited better performance compared to the individual response of the oxides, with a photocatalytic degradation rate constant of $1{,}6\times10^{-3}$ $min^{-1}$.

**Keywords:** CuO; $CuWO_4$; heterostructure; synthesis; photocatalysis.

**Citación:** Raba-Páez AM. Estudio comparativo de la heteroestructura $CuO/CuWO_4$ y los óxidos CuO y $CuWO_4$: validación de aplicaciones fotocatalíticas. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):628-644, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4072

**Editor:** Gabriel Tellez

***Correspondencia:**
Angela Mercedes Raba-Páez;
angelamercedesrp@ufps.edu.co

**Recibido:** 26 de marzo de 2026
**Aceptado:** 12 de mayo de 2026
**Publicado en línea:** 27 de julio de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

## Introducción

Hoy las prácticas de sectores como la agricultura y la industria, así como de la población en general, ocasionan el vertimiento persistente en medios acuosos de diversas concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos (colorantes, pesticidas, fármacos, etc.), que alteran el ciclo del agua, produciendo efectos tóxicos para el medio ambiente y la salud humana (**Barbosa *et al.***, 2016; **Darbre**, 2018). Frente a esta problemática se han explorado métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, pero en busca de una mayor eficacia es necesario explorar alternativas que remedien y eliminen los contaminantes presentes en medios acuosos (**Buthiyappan *et al.***, 2016)(Buthiyappan et al., 2016). La fotocatálisis heterogénea es el proceso de oxidación más popular para la degradación de contaminantes orgánicos. En óxidos metálicos de transición, este proceso ocurre por la irradiación de fotones con energía *hv*, generalmente en la región UV-vis, mayor a la energía de banda de *gap* del semiconductor ($hv \geq E_g$) (**Fujishima & Honda**, 1972). En esta vía, el estudio del comportamiento de los óxidos metálicos semiconductores, materiales que tienen una notable tasa de recuperabilidad desde el medio acuoso y buena estabilidad química, resulta una alternativa eficiente para la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos, eliminación de metales pesados y aplicaciones biomédicas, entre otras (**Amani-Beni & Nezamzadeh-Ejhieh**, 2017; **Derikvandi & Nezamzadeh-Ejhieh**, 2017; **Pourtaheri & Nezamzadeh-Ejhieh**, 2015).

El óxido de cobre (CuO) es un óxido metálico, semiconductor de transición, de tipo-p, y de color oscuro. Tiene una estructura cristalográfica monoclínica, denominada tenorita, y un *gap* indirecto estrecho de alrededor de 1,2 eV en el material en *bulk* (**Zhang *et al.***, 2014a), por lo que puede absorber radiación por encima de la región del infrarrojo cercano. En cuanto al tungstato de cobre ($CuWO_4$), se trata de un óxido semiconductor ternario que cristaliza en una estructura triclínica a temperatura ambiente (**Souza *et al.***, 2017). Este óxido tiene dos fórmulas moleculares a alta y baja presión por cada celda unitaria. El $CuWO_4$ es un compuesto de interés actual debido a su notable conductividad iónica y fotoluminiscencia (**Schmitt *et al.,*** 2011). En general, las propiedades de estos óxidos hacen posibles procesos de degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos (**Chen & Xu**, 2015a; **Dutta *et al.***, 2015; **Montini *et al.***, 2010), inclusive bajo la acción de la luz visible (**Gaillard *et al.,*** 2013).

Por otro lado, una heteroestructura es un sistema compuesto por dos o tres semiconductores diferentes que comparten sus superficies coherentemente. Entre las fases interconectadas se produce migración de carga y si los niveles de Fermi de las diferentes fases llegan a igualarse en la interfase de los semiconductores, la separación de carga se da cuando la heteroestructura es estimulada (**Alves de Castro *et al.***, 2015). En esta vía, el acoplamiento del $CuWO_4$ con otros semiconductores ha resultado prometedor para mejorar su desempeño fotocatalítico, inclusive bajo irradiación de luz solar, debido a que su configuración resulta efectiva para reducir la recombinación de portadores de carga fotogenerados (**Chen *et al.***, 2014; **Chen & Xu**, 2015). Se ha reportado que la síntesis del sistema $CuWO_4$/CuO mejora la respuesta fotocatalítica tanto del $CuWO_4$ como del CuO. Por ejemplo, **Kannan *et al.*** (2017) obtuvieron heterojunturas de tipo I ($CuWO_4/WO_3 \cdot 0.33H_2O$, $CuWO_4/WO_3$) y otras de tipo II ($CuWO_4/Cu_2O$, $CuWO_4/Cu_2O$/CuO, $CuWO_4$/CuO) variando el pH durante el proceso. Estos nanocompositos presentaron mayor absorción de la luz visible, con una energía de banda de *gap* de 1,7 eV para el $CuWO_4$, valor que es menor al generalmente reportado (2,1-2,3 eV). Además, los compuestos $CuWO_4/Cu_2O$/CuO y $CuWO_4/WO_3 \cdot 0.33H_2O$ mostraron una constante de degradación aparente 1,66 veces más alta que la del $CuWO_4$. Por otra parte, **Chen *et al***. (2014) reportaron que la modificación superficial de $CuWO_4$, con 1,8 % del peso de CuO, incrementó su fotoactividad en la degradación de fenol cerca de nueve veces bajo luz UV y de cinco veces bajo luz visible. Empleando un método foto-electroquímico, estos investigadores demostraron el proceso de la transferencia de electrones desde el CuO al $CuWO_4$ y la transferencia de huecos desde el $CuWO_4$ al CuO, de modo que la eficiencia en la separación de carga se incrementó y, por ende, se aceleró la degradación orgánica.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):628-644, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4072

El CuO también se ha acoplado exitosamente a otros óxidos en sistemas hetero-estructurados. **Jiang *et al.*** (2017) muestran cómo se obtuvieron diferentes morfologías del acople CuO/$Cu_2O$ mediante un método de vía húmeda. Específicamente, la actividad fotocatalítica de nanoalambres de CuO/$Cu_2O$ fue 260 veces más alta que la del $Cu_2O$, y las nanoesferas de CuO/$Cu_2O$ conservaron su respuesta fotocatalítica después de siete ciclos de reuso, resultados que demuestran la eficacia de la heteroestructura. Un sistema más complejo, el CuO/ZnO/g-$C_3N_4$, es descrito en **Bajiri *et al.*** (2019) como un fotocatalizador eficiente bajo luz visible. En ese estudio la heteroestructura CuO/ZnO/g-$C_3N_4$ exhibió una actividad fotocatalítica más alta que la de la heteroestructura CuO/ZnO.

Aquí se presenta un estudio comparativo de las propiedades estructurales, morfológicas y ópticas de la heteroestructura conformada por los óxidos CuO y $CuWO_4$ con las mismas propiedades de los óxidos individuales. Los óxidos CuO y $CuWO_4$ se produjeron individualmente con el método hidrotermal, y la heteroestructura CuO/$CuWO_4$ con el método sol-gel. Las propiedades estructurales se determinaron a partir del análisis de los difractogramas obtenidos por la técnica de difracción de rayos X; las propiedades morfológicas se establecieron a partir del análisis de imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido con emisión de campo; las propiedades ópticas se obtuvieron a partir de los análisis de los espectros de reflectancia y absorción determinados mediante espectroscopía de reflectancia difusa. Por último, la respuesta fotocatalítica de los tres materiales obtenidos se evaluó a partir del análisis del proceso de fotodegradación del colorante (rodamina B).

## Materiales y métodos

### *Producción de materiales*

Los materiales de estudio se produjeren con el método hidrotermal para la síntesis de los óxidos individuales CuO y $CuWO_4$, en tanto que el método sol-gel se empleó para la síntesis de la heteroestructura CuO/$CuWO_4$. En la **Figura 1** se presenta un resumen de las tres rutas de síntesis.

Para la síntesis del óxido de cobre se siguió un proceso semejante al reportado en **Liu *et al.*** (2012): se disolvieron 1,208 g de nitrato de cobre (II) tri-hidratado ($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ Synth 96%) en 57,5 ml de agua destilada bajo agitación constante. Seguidamente se agregaron 2,5 ml de PEG400 a la solución precursora de cobre, conformando un volumen total de 60,0 ml. Después de que el PEG400 se dispersara completamente en la solución, se adicionaron 0,6 g de hidróxido de sodio (NaOH Synth 99%) sólido, formándose así el precipitado de cobre. Después de 30 minutos de agitación, la suspensión se transfirió a una autoclave de teflón sellada y mantenida a 80 °C durante 12 horas a una tasa de calentamiento de 3 °C/min. Después de la síntesis hidrotermal, se dejó enfriar la autoclave

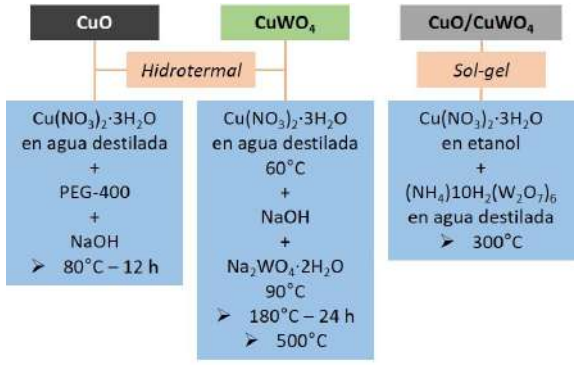



**Figura 1.** Ilustración diagramática de los procesos de síntesis llevados a cabo para la obtención de los materiales de estudio. Fuente: elaboración propia

hasta la temperatura ambiente. Por último, los materiales de color marrón oscuro que se formaron se centrifugaron, se enjuagaron con agua destilada hasta obtener un pH de 6,0, se lavaron con etanol y se secaron al aire a 60 °C durante 24 horas.

El tungstato de cobre se preparó usando el método hidrotermal modificado a partir del proceso reportado por **Chen *et al.*** (2014): se disolvieron 2,416 g de nitrato de cobre (II) tri-hidratado ($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ Synth 96%) en 250,0 ml de agua destilada; el pH de la disolución se ajustó a 5,0 mediante la adición, gota a gota, de una solución acuosa (1M) de hidróxido de sodio (NaOH Synth 99%). Enseguida se llevó la solución a una temperatura de 60 °C y a continuación, se agregaron 3,298 g de tungstato de sodio di-hidratado ($Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ neón 99%) a la solución precursora de cobre bajo agitación vigorosa. La solución se llevó a una temperatura de 90 °C durante 1,5 horas; después se enfrió hasta la temperatura ambiente, y el pH se ajustó a 5,0 con el NaOH acuoso previamente preparado. El precipitado se transfirió a una autoclave de acero inoxidable y se calentó a 180 °C por 24 horas a razón de 3 °C/min. Después del enfriamiento del reactor, los materiales se recogieron por centrifugado, se enjuagaron con agua (pH = 6,0), se lavaron con etanol y se secaron a 60 °C durante 15 horas. Por último, la muestra se cristalizó en aire a 500 °C por dos horas.

Para la síntesis de la heteroestructura $CuO/CuWO_4$, se solubilizaron completamente en etanol 2,416 g de nitrato de cobre (II) tri-hidratado ($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ PanReac 98-103%) y, de manera independiente, se solubilizaron completamente 0,306 g de paratungstato de amonio ($(NH_4)_{10}H_2(W_2O_7)_6$ Alfa Aesar 99%) en agua destilada. Transcurridos 15 minutos, se mezclaron las dos soluciones y la solución obtenida se evaporó a 50 °C durante 30 minutos para la conformación de un gel. Para estabilizar el gel, este se llevó a 200 °C por cuatro horas a una tasa de 1 °C/min y el material resultante se desaglomeró en mortero de ágata; los polvos obtenidos se cristalizaron a 300 °C durante cuatro horas a una tasa de 1 °C/min.

### *Técnicas de caracterización*

Las fases cristalinas de los tres materiales de estudio se determinaron a partir del análisis de patrones de difracción de rayos X obtenidos con dos diferentes equipos. Para el análisis estructural de la heteroestructura $CuO/CuWO_4$, se empleó un difractómetro de rayos X X'pert Pro PANalytical con detector de franja múltiple en tiempo real, en modo Bragg Brentano, usando radiación Cu Kα2 $\lambda$ = 1,542 Å, para 2θ entre 10 y 80°, y un paso de 0,0263°. En el análisis estructural de los óxidos CuO y $CuWO_4$ se empleó un difractómetro de rayos X Shimadzu XRD6000, usando radiación Cu Kα $\lambda$ = 1,548 Å para 2θ entre 10 y 80°, con un paso de 0,02°, operando a 30,0 mA y 30,0 kV. Los patrones de difracción se analizaron mediante el método de refinamiento de Rietveld, para lo cual se usó el *software* General Structure Analysis System (GSAS). Por otro lado, se empleó la técnica de microscopía electrónica de barrido con emisión de campo para estudiar la morfología de los materiales obtenidos. Para ello, se analizaron imágenes obtenidas con un equipo ZEISS que operó a 5,0 kV y 200,0 nA; las muestras se depositaron sobre cinta de carbón y se recubrieron con una capa de platino de 10 nm de espesor. El mapeo elemental de las muestras (vía espectroscopía de energía dispersiva) se hizo con esta técnica de microscopía. Por último, las medidas de reflectancia y, subsecuentemente, las de absorción, se obtuvieron con espectroscopía de reflectancia difusa con un espectrofotómetro UV-vis Shimadzu UV-2600. Los datos del coeficiente de absorción óptica se obtuvieron de las medidas de reflectancia a través de la transformación de Kubelka Munk desarrollada por el *software* del equipo.

### *Ensayos fotocatalíticos*

El desempeño fotocatalítico de los tres materiales obtenidos se evaluó mediante el análisis del proceso de degradación del colorante rodamina B. La actividad fotocatalítica se evaluó bajo luz UV en un fotorreactor con seis lámparas UV (TUV Philips, 15 W, a una intensidad máxima de 254 nm). Se agregaron 10,0 mg de cada material a 20,0 ml de una

solución acuosa de rodamina B (Sigma-Aldrich) a 10 ppm. Las soluciones (por triplicado) se colocaron en el fotorreactor a 20 °C y la degradación de la rodamina B se monitorizó midiendo la absorbancia a alícuotas de tiempo fijas con un espectrofotómetro UV-vis Shimadzu UV-1601PC. La prueba de fotólisis se llevó a cabo con la solución de rodamina B sin fotocatalizador alguno.

## Resultados y discusión

### *Propiedades estructurales*

Los patrones de difracción de rayos X de los tres materiales de estudio se presentan en la **Figura 2 (a)**. El difractograma del CuO tiene picos característicos asociados a la fase de la tenorita, estructura monoclínica, grupo espacial C2/c, indexada bajo la ficha de difracción *Powder Diffraction File*- PDF No. 00-045-0937. Los picos más intensos están ubicados en los 35,57° y 38,75°, acorde con lo reportado en **Liu *et al.*** (2012) para el CuO. No se detectaron picos asociados a fases secundarias. El patrón de difracción propio del material $CuWO_4$ posee picos asociados con la estructura triclínica, grupo espacial P-1, indexada bajo la ficha de difracción PDF No. 01-070-1732. Según esta indexación, los picos más intensos del difractograma están ubicados en los 28,80° y 30,22°, según lo reportado en **Chen *et al.*** (2014). Por último, en el difractograma obtenido para la heteroestructura CuO/$CuWO_4$ fue posible identificar dos fases cristalinas: 67 % de CuO, estructura monoclínica, grupo espacial C2/c, indexada bajo la ficha de difracción PDF No. 01-072-0629, y 33% de $CuWO_4$, estructura triclínica, grupo espacial P-1, indexada bajo la ficha de difracción PDF No. 01-072-0616. Ninguna de las tres metodologías empleadas para la producción de los materiales en el estudio recurrió al uso de un *template* orgánico, lo que garantizó la obtención de las fases cristalinas de interés en cada una de las tres muestras y evitó la segregación hacia impurezas que pudieran conducir a distorsiones notorias en la red cristalina de los materiales. El tamaño del cristalito ($L$) se estimó mediante la ecuación de Debye Scherrer (Ecuación 1). En esta expresión el factor de forma tiene un valor de 0,94, $\lambda$ es la longitud de onda, $F$ representa el ancho completo a la mitad de la altura (*Full Width at Half Maximum* - FWHM) expresado en radianes, y $\theta$ es el ángulo de difracción de Bragg. En los tres casos la línea elegida para estimar $L$ es la de máxima intensidad (**Tabla 1**). Se calcularon también parámetros estructurales adicionales (**Sen *et al.***, 2021), como lo son la densidad de dislocación ($\delta$) y el microesfuerzo ($\varepsilon$), empleando las Ecuaciones (2) y (3) (**Tabla 1**).

$$L = \frac{0{,}94\lambda}{F\cos\theta} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{1}{L^2} \quad (2)$$

**Tabla 1.** Tamaño de cristalito, densidad de dislocación y microesfuerzo de los materiales de estudio

| | **CuO** | **$CuWO_4$** | **CuO/$CuWO_4$** | |
|---|---|---|---|---|
| | | | CuO | $CuWO_4$ |
| $2\theta$ (deg) | 35,57 | 28,80 | 35,62 | 28,72 |
| FWHM (deg) | 0,216 | 0,197 | 0,343 | 0,179 |
| $L$ (nm) | 40,45 | 43,74 | 25,42 | 47,87 |
| $\delta$ ($\times 10^{-4}$ nm$^{-1}$) | 6,11 | 5,22 | 15,48 | 4,36 |
| $\varepsilon$ ($\times 10^{-3}$) | 3,22 | 3,34 | 4,66 | 3,51 |

Fuente: elaboración propia

$$\varepsilon = \frac{F}{4\tan\theta} \quad (3).$$

El tamaño del cristalito del óxido de cobre fue mayor al del CuO en la heteroestructura. Por el contrario, el tamaño del cristalito del $CuWO_4$ fue menor al que este óxido posee en la heteroestructura. El óxido CuO presentó, entonces, menor densidad de dislocación que la que exhibió al conformar el sistema heteroestructurado, en tanto que la densidad de dislocación del $CuWO_4$ individualmente no difirió en mayor medida a la que exhibió en la heteroestructura $CuO/CuWO_4$. Por otro lado, los tres materiales de estudio presentaron estrés tensional asociado con el microesfuerzo establecido. En el caso del óxido de cobre, era de esperarse su notoria contribución al desempeño fotocatalítico al ser parte de la heteroestructura, ya que su crecimiento cristalino se vio notoriamente inhibido y sus valores de densidad de dislocación y microesfuerzo fueron mayores.

En un primer momento, los parámetros de red (*a,b,c*) y el volumen de celda unitaria (*V*) se estimaron mediante las Ecuaciones (4) y (5) para la estructura monoclínica (**Raba-Páez *et al.***, 2020), y las (6) y (7) para la estructura triclínica (**Olsen**, 1976). En estas últimas ecuaciones se tiene que: $S_{11} = b^2 c^2 \sin^2\alpha$, $S_{22} = a^2 c^2 \sin^2\beta$, $S_{33} = a^2 b^2 \sin^2\gamma$, $S_{12} = abc^2(\cos\alpha\cos\beta - \cos\gamma)$, $S_{23} = a^2 bc(\cos\beta\cos\gamma - \cos\alpha)$, $S_{13} = ab^2 c(\cos\gamma\cos\alpha - \cos\beta)$, $x = \cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma$ y $y = 2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma$. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 2**. Se observó una reducción en los parámetros de red del CuO al estar en la heteroestructura, lo que condujo a una disminución en su volumen de celda unitaria. En cuanto al $CuWO_4$ como componente de la heteroestructura, se apreció un leve crecimiento preferencial para *c*, aunado a una reducción en el volumen de celda unitaria.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\sin^2\beta}\left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2}\sin^2\beta + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl\cos\beta}{ac}\right) \quad (4)$$

$$V = abc\sin\beta \quad (5)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{V^2}(S_{11}h^2 + S_{22}k^2 + S_{33}l^2 + 2S_{12}hk + 2S_{23}kl + 2S_{13}hl) \quad (6)$$

$$V = abc\sqrt{1 - x + y} \quad (7).$$

**Tabla 2.** Parámetros de red y volumen de celda unitaria de los materiales de estudio obtenidos analíticamente

| | | *d* (Å) | | | Parámetros de red | | | *V* (Å³) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | *a* (Å) | *b* (Å) | *c* (Å) | |
| Óxido | | (-110) | (002) | (111) | | | | |
| | CuO | 2,764 | 2,533 | 2,332 | 4,726 | 3,433 | 5,137 | 82,17 |
| | | (110) | (-110) | (-1-11) | | | | |
| | $CuWO_4$ | 4,663 | 3,432 | 3,112 | 4,705 | 5,841 | 4,878 | 132,85 |
| Heteroestructura | | (110) | (-111) | (200) | | | | |
| | CuO | 2,747 | 2,519 | 2,322 | 4,708 | 3,407 | 5,144 | 81,35 |
| | | (100) | (101) | (-1-11) | | | | |
| | $CuWO_4$ | 4,671 | 3,437 | 3,119 | 4,712 | 5,288 | 5,305 | 130,99 |

Fuente: elaboración propia

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):628-644, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4072

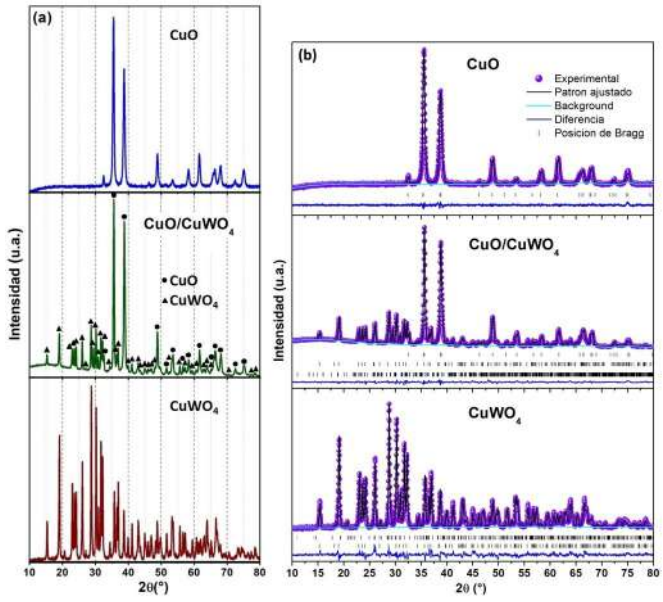



**Figura 2. (a)** Patrones de difracción experimentales de CuO, $CuO/CuWO_4$ y $CuWO_4$. **(b)** Refinamientos de Rietveld de los patrones de difracción obtenidos para los materiales de estudio. Fuente: elaboración propia

Para complementar el análisis estructural, se realizaron los refinamientos de Rietveld de los patrones de difracción de rayos X en los tres materiales de estudio **Figura 2 (b)**, lo que permitió confirmar las fases identificadas para cada muestra y requirió la inclusión de fases minoritarias para el refinamiento de los difractogramas de las muestras $CuWO_4$ y $CuO/CuWO_4$: 2,3 % de $Cu_2WO_4$ y 0,9 % de $W_{17}O_{47}$, respectivamente. Estos niveles de concentración de la fase secundaria no alcanzan a incidir en la respuesta estructural y, por ende, tampoco en las respuestas morfológica y óptica de los materiales. Debido a la segregación de los metales para la formación de otras fases de cobre y wolframio, podría verse afectada de forma limitada la densidad de los portadores de carga (electrón-hueco) que contribuyen a los procesos asociados a la fotodegradación. Los porcentajes de las fases relacionadas, sus grupos espaciales, los parámetros de red, el volumen de celda unitaria y el valor de $\chi^2$ se presentan en la **Tabla 3**. En general, se encontraron leves diferencias entre las intensidades de los patrones de difracción experimentales y los calculados. La calidad de los refinamientos se determinó a través del parámetro $\chi^2$, cuyos valores estuvieron en un rango razonable para estos.

Los valores de los parámetros de red obtenidos con el refinamiento concuerdan con los determinados previamente a través de las ecuaciones (4) a (7), lo que comprobó la validez del método semicuantitativo de análisis estructural empleado. A partir de los refinamientos, los parámetros de red del CuO en la heteroestructura fueron menores a los del óxido individual. Lo contrario ocurrió con el $CuWO_4$, ya que sus parámetros de red resultaron mayores en la heteroestructura que en el óxido individual. Este hecho se reflejó en una leve reducción en el volumen de la celda unitaria del CuO y un incremento en este mismo parámetro en el $CuWO_4$ como componentes de la heteroestructura. Finalizado este análisis, se pudo inferir que el crecimiento cristalino preferencial del tungstato de cobre en la heteroestructura pudo llegar a beneficiar su desempeño fotocatalítico, en comparación con su respuesta como óxido individual.

### *Propiedades morfológicas*

En primer lugar se hizo el análisis elemental de los materiales de estudio; las imágenes obtenidas se presentan en la **Figura 3**. En el CuO, el oxígeno y el cobre se distribuyeron

**Tabla 3.** Parámetros estructurales de los materiales de estudio obtenidos con el refinamiento de Rietveld. $\chi^2$ y $R(F^2)$: parámetros del refinamiento; %: porcentaje de fase

| Muestra | Fase | % | Grupo espacial | Parámetros de red (Å) | | | $V$ (Å$^3$) | $\chi^2$ | $R(F^2)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | *a* | *b* | *c* | | | |
| CuO | CuO | 100 | C2/c (15) | 4,7003 (0.0002) | 3,4405 (0.0001) | 5,1514 (0.0001) | 82,195 (0,005) | 1,321 | 0,018 |
| $CuWO_4$ | $CuWO_4$ | 97,7 | P-1 (2) | 4,7171 (0,0001) | 5,8525 (0,0001) | 4,8910 (0,0001) | 133,025 (0,002) | 2,973 | 0,0358 |
| | $Cu_2WO_4$ | 2,30 | P1 (1) | 7,4267 (0,0903) | 8,4948 (0,0404) | 5,2229 (0,0678) | 284,319 (4,431) | | |
| $CuO/CuWO_4$ | CuO | 74,5 | C2/c (15) | 4,6886 (0,0001) | 3,4286 (0,0001) | 5,1349 (0,0001) | 81,433 (0,004) | 3,419 | 0,0610 |
| | $CuWO_4$ | 24,6 | P-1 (2) | 4,7244 (0,0002) | 5,8644 (0,0002) | 4,9029 (0,0002) | 134,571 (0,009) | | |
| | $W_{17}O_{47}$ | 0,90 | P2/m (10) | 20,1377 (0,0074) | 4,0666 (0,0018) | 13,31285 (0,0010) | 1090,186 (0,628) | | |

Fuente: elaboración propia

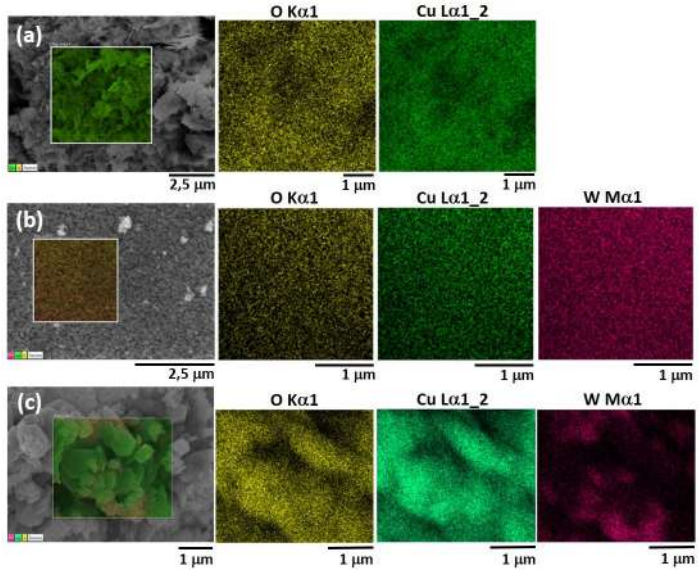



**Figura 3.** Imágenes obtenidas con microscopía electrónica de barrido con emisión de campo para el mapeo elemental de los óxidos **(a)** CuO, **(b)** $CuWO_4$ y de la heteroestructura **(c)** $CuO/CuWO_4$. Fuente: elaboración propia

equitativamente sobre nanoláminas bien definidas (**Figura 3 a)**. En el $CuWO_4$ (**Figura 3 b**), el oxígeno, el cobre y el wolframio se distribuyeron de forma regular sobre nanogranos de morfología altamente simétrica. En el caso de la heteroestructura $CuO/CuWO_4$ (**Figura 3 c**), la presencia del oxígeno y del cobre se identificó plenamente sobre poliedros regulares y bien definidos. El wolframio solo se encontró en aglomerados de nanogranos circundantes a los poliedros. A partir de estos hallazgos se infirió que la heteroestructura se compuso de poliedros de CuO rodeados de nanogranos de $CuWO_4$. En general, este análisis cualitativo confirmó la presencia de los elementos de interés, oxígeno, cobre y wolframio, respectivamente en los óxidos individuales, así como la ubicación de las dos

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):628-644, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4072

fases cristalinas de la heteroestructura con dos tipos de morfología diferentes constituyentes de un mismo material. Este análisis también permitió verificar que las muestras estaban libres de impurezas elementales, ya que no se detectó la presencia de otros elementos.

Las imágenes de microscopía electrónica de barrido con emisión de campo se presentan en la **Figura 4**. Se aprecia que la morfología obtenida en el CuO (**Figura 4 a**), corresponde a aglomerados laminares ultradelgados, con longitudes de aproximadamente 300 nm. En el caso del $CuWO_4$ (**Figura 4 b**), se puede distinguir un único tipo de morfología de granos de simetría bien definida, con tamaños menores a 100 nm. En cuanto a la morfología de la heteroestructura $CuO/CuWO_4$ (**Figura 4 c**), se observaron poliedros bien definidos rodeados de aglomerados de nanogranos. En concordancia con los resultados estructurales obtenidos con la difracción de rayos X, se pudo confirmar que los óxidos individuales presentaban una fase principal incrustada en las morfologías individuales previamente descritas. En cuanto a la heteroestructura, se distinguen dos morfologías diferentes, cada una compuesta de una fase cristalina principal determinada en el análisis estructural expuesto.

En relación con los métodos de síntesis empleados, gracias al control de temperatura y del tiempo de reacción en el método hidrotermal usado para la obtención de CuO y $CuWO_4$, se obtuvieron materiales altamente puros, con crecimiento cristalino considerable y morfologías bien definidas. Además, como se esperaba, el uso del agua como solvente promovió la obtención de materiales con granos a escala nanométrica. Por otro lado, con respecto a la metodología sol-gel empleada para la obtención de la heteroestructura, se evidenció que desde el punto de vista cinético los precursores se mezclaron adecuadamente desde el inicio del proceso, lo que permitió un tratamiento térmico no muy elevado. Así, se pudo comprobar que la razón de calentamiento fue

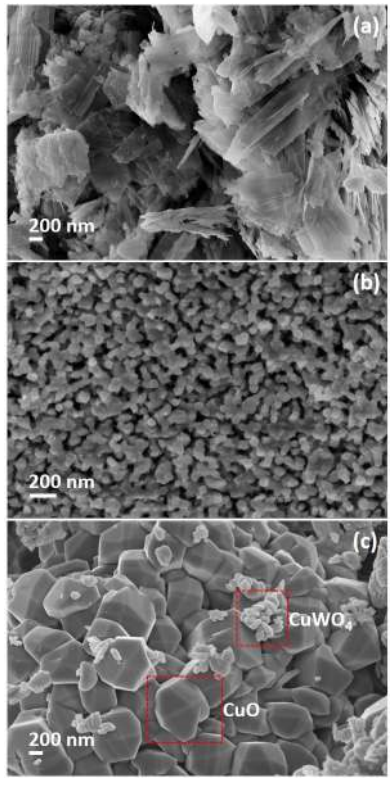



**Figura 4.** Imágenes obtenidas con microscopía electrónica de barrido con emisión de campo de **(a)** CuO (Mag = 50,00 KX), **(b)** $CuWO_4$ (Mag = 100,00 KX) y **(c)** $CuO/CuWO_4$ (Mag = 50,00 KX). En los tres casos la barra de guía es de 200 nm. Fuente: elaboración propia

adecuada dado el alto grado de homogeneidad obtenido en este material. Por último, se evidenció la ventaja que exhibe el paratungstato de amonio como agente quelante para el wolframio.

A pesar de las notorias ventajas de las rutas hidrotermales (**Kannan *et al.***, 2017) frente a las demás rutas de vía húmeda, en el control de la morfología y el tamaño de grano se destaca el método empleado aquí para la heteroestructura, el cual permitió la obtención de una morfología única y bien definida, como lo son los poliedros de CuO, debido esencialmente al proceso de condensación y cristalización propio de los métodos de alteración hidrotermal. Considerando las variables de la cinética de la reacción que pudieron favorecer este hecho, sobresale la naturaleza del precursor de wolframio empleado (paratungstato de amonio), su concentración, la naturaleza de los solventes, el tiempo y la temperatura aplicados para la formación del gel, y la temperatura de cristalización. Así, se obtuvo en este estudio una heteroestructura de $CuO/CuWO_4$ con morfologías destacadas y bien definidas, empleando un método de vía húmeda novedoso y considerablemente sencillo. En el proceso se empleó el paratungstato de amonio en reemplazo de los precursores de wolframio comúnmente usados en la obtención de $CuWO_4$, el ácido túngstico y el tungstato de sodio (**Chen *et al.***, 2014; **Chen & Xu**, 2015; **Gaillard *et al.,*** 2013; **Kannan *et al.***, 2017).

### *Propiedades ópticas*

Las curvas de reflectancia y absorción de los materiales analizados se presentan en la **Figura 5**. El comportamiento de la reflectancia fue diferente en los tres materiales, en general, y ello obedece a una tendencia de crecimiento con la longitud de onda que llega hasta un valor máximo, específicamente en el $CuWO_4$ y la heteroestructura. Dicha tendencia es propia de los materiales semiconductores y se relaciona con una deformación de la red cristalina debida al esfuerzo (*strain*) que pueden presentar (**Khodami & Nezamzadeh-Ejhieh**, 2015). En el caso de la heteroestructura, el comportamiento de su reflectancia se relacionó directamente con la formación de este tipo de sistemas, el cual difiere del que presentan los óxidos individuales. Se infiere así que dicha diferencia tendría un efecto directo en la respuesta fotocatalítica de este material. Por otro lado, la absorción mostró una

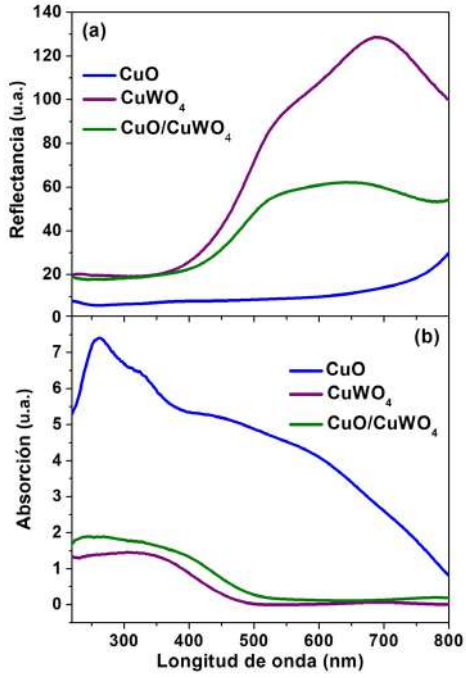



**Figura 5. (a)** Variación del espectro de reflectancia; **(b)** variación del espectro de absorción de los tres materiales de estudio. Fuente: elaboración propia

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):628-644, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4072

tendencia decreciente con el incremento de la longitud de onda. El CuO específicamente mostró un pico de absorción centrado en los 263 nm, acorde con lo reportado para este óxido (**Q. Zhang *et al.*,** 2014b).

El *gap* óptico se determinó empleando el método de Kubelka-Munk (**Lahmar *et al.***, 2020) mediante la Ecuación 8, conocida como la relación de Pankov. En esta ecuación, $hv$ representa la energía del fotón incidente, $\alpha$ es el coeficiente de absorción, $B$ corresponde a un coeficiente que depende de las propiedades del material, $n$ corresponde a un índice cuyos valores dependen de si el material exhibe transiciones electrónicas directas permitidas ($n$ = 1/2), directas prohibidas ($n$ = 3/2), indirectas permitidas ($n$ = 2) o indirectas prohibidas ($n$ = 3).

$$\alpha = \frac{B\left(hv - E_g\right)^n}{hv} \quad (8).$$

Utilizando la Ecuación 8 se ajustó la porción lineal de las gráficas de $(\alpha hv)^{1/n}$ *Vs*. $hv$, técnica que se conoce como el método de Tauc (**Azimi & Nezamzadeh-Ejhieh**, 2015). En la **Figura 6** se presentan las curvas de (a) $(\alpha hv)^2$ vs. $hv$, para transiciones directas permitidas, y (b) $(\alpha hv)^{1/2}$ *Vs*. $hv$ para transiciones indirectas permitidas. En la **Tabla 4** se presentan los valores de *gap* obtenidos; $E_{g-d}$ representa el del *gap* de energía directo y $E_{g-i,1,2}$ el indirecto, en caso de que el material exhiba hasta dos valores. Para los óxidos CuO y $CuWO_4$ se obtuvieron valores acordes a los reportados en la literatura (**Gizhevskiĭ *et al.*,** 2006; **Rehman *et al.***, 2011; **H. Zhang *et al.***, 2015; **Zhang *et al.*,** 2014), que son adecuados para las aplicaciones ópticas de estos materiales. En la heteroestructura el valor de $E_{g-i,1}$ se asoció al CuO y el de $E_{g-i,2}$ al $CuWO_4$. Específicamente, el valor de $E_{g-i,2}$ = 2,11 eV para la

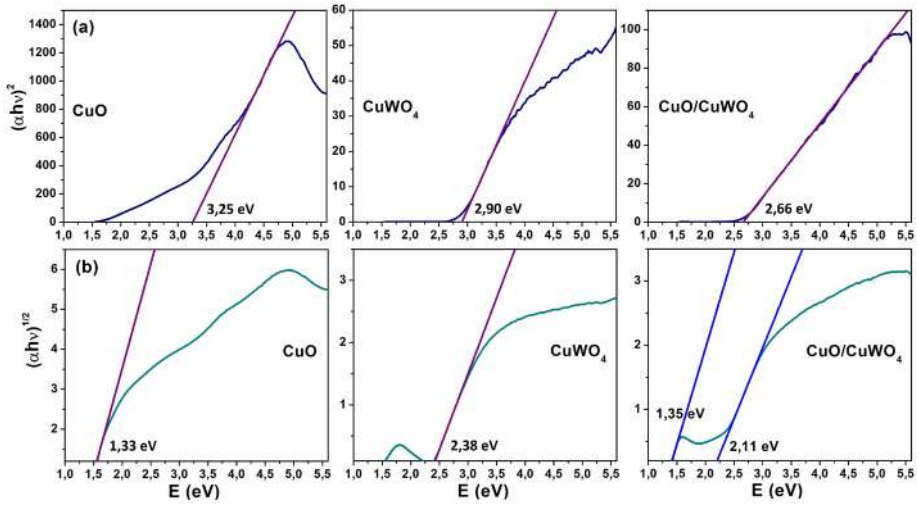



**Figura 6.** El *gap* óptico se obtuvo extrapolando la porción lineal de las curvas **(a)** $(\alpha hv)^2$ vs. $hv$, para el *gap* directo, y **(b)** $(\alpha hv)^{1/2}$ vs. $hv$ para el *gap* indirecto. Fuente: elaboración propia

**Tabla 4.** Valores de *gap de* energía de los materiales obtenidos

| | ***Gap* directo (eV)** | ***Gap* indirecto (eV)** | |
|---|---|---|---|
| | $E_{g-d}$ | $E_{g-i,1}$ | $E_{g-i,2}$ |
| CuO | 3,25 | 1,33 | -- |
| $CuWO_4$ | 2,90 | -- | 2,38 |
| $CuO/CuWO_4$ | 2,66 | 1,35 | 2,11 |

Fuente: elaboración propia

heteroestructura fue menor que el obtenido para el óxido $CuWO_4$ (2,38 eV), lo cual puede estar directamente relacionado con estados de defectos internos del *gap* (vacancias de oxígeno y cobre), propios de las nanopartículas de $CuWO_4$ en la heteroestructura. Además, ya que la fase $CuWO_4$ en la heteroestructura presentó un valor de *gap* de energía indirecto más bajo que la del mismo óxido individual, se infiere que ello favoreció la formación misma de la heteroestructura.

Al comparar el óxido individual $CuWO_4$ con la fase respectiva presente en la heteroestructura, se estableció una reducción en el valor de *gap* de energía indirecto, con un incremento del tamaño del cristalito, lo cual se relaciona con una mayor cristalinidad de esta fase. Ocurrió lo contrario con el CuO, el cual inhibió notoriamente su crecimiento cristalino en la heteroestructura, sin presentar cambios significativos en su valor de *gap* de energía indirecto, hechos por los que se espera que el óxido de cobre contribuya a una mejora en la respuesta fotocatalítica de un sistema heteroestructurado en el que esté presente, en comparación con su desempeño individual. En general, la heteroestructura mostró bajos valores de *gap* de energía, por lo que se dedujo que este material exhibiría un mejor desempeño fotocatalítico que los óxidos individuales, ya que un bajo *gap* de energía permite la formación de pares electrón-hueco con bajas energías, lo cual incrementa la movilidad de carga, favoreciendo su transferencia entre el CuO y el $CuWO_4$. La técnica de reflectancia difusa confirmó la obtención de una heterojuntura de tipo p-n: $CuO/CuWO_4$, resultado que es consistente con el análisis estructural y el morfológico previamente descritos.

Para complementar la caracterización óptica de los materiales de estudio, se calcularon parámetros como el índice de refracción, $\eta$, y la constante dieléctrica, $\varepsilon_r$. El índice de refracción se estimó a partir de la relación de Moss ($\eta_M$) (**Moss**, 1950) y de la relación de Herve-Vandamme ($\eta_{H\text{-}V}$) (**Hervé & Vandamme**, 1994) (Ecuaciones 9 y 10). En ellas *k*, *H y V* son constantes con valores de 108 eV, 13,6 eV y 3,4 eV, respectivamente. Los valores de los índices de refracción calculados se presentan en la **Tabla 5**. Dichos valores son inversamente proporcionales a los valores de *gap* de energía directos, comportamiento típico de los semiconductores. Por otro lado, los valores de la constante dieléctrica (**Tabla 5**) se estimaron empleando la Ecuación 11 en los dos modelos de estudio. En ambos casos la constante dieléctrica de la heteroestructura fue mayor a la de los óxidos individuales. La misma tendencia se observó con el índice de refracción, cuyo valor fue mayor para la heteroestructura que para el CuO y el $CuWO_4$. Se infiere, así, que los valores obtenidos hacen de la heteroestructura un material promisorio para el desarrollo de mecanismos optoelectrónicos.

$$\eta_M = \sqrt[4]{\frac{k}{E_{g-d}}} \tag{9}$$

$$\eta_{H-V} = \sqrt{1 + \left(\frac{H}{E_{g-d} + V}\right)^2} \tag{10}$$

$$\varepsilon_{r(M,H-V)} = \eta^2{}_{(M,H-V)} \tag{11}.$$

***Propiedades fotocatalíticas***

Los tres materiales de estudio fueron objeto de ensayos de degradación fotocatalítica con rodamina B. Considerando que el proceso de adsorción del colorante en la superficie de los fotocatalizadores se puede analizar en el equilibrio, la cinética de la reacción que allí se produjo, se estudió mediante el modelo de Langmuir-Hinshelwood (L-H) (**Omrani *et al.***, 2019; Ecuación 12). En esta ecuación *v* es la razón de cambio de la concentración con respecto al tiempo, *C* representa la concentración de rodamina B, *t* es el tiempo y *k* la constante de primer orden de la reacción.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):628-644, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4072

$$v = \frac{dC}{dt} = kC \quad (12).$$

Al integrar la Ecuación 12 se obtiene la Ecuación 13, de tal forma que la gráfica de $ln(C/C_0)$ en función de $t$ presenta una tendencia lineal con una pendiente igual al valor de la constante $k$.

$$ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -kt \quad (13).$$

Así, se analizó la respuesta fotocatalítica de los materiales de estudio frente a la degradación de rodamina B acuosa bajo radiación UV; los resultados obtenidos se presentan en la **Figura 7**. Los datos de fotólisis corresponden a la solución de rodamina sin fotocatalizador alguno. Los óxidos individuales no mostraron respuesta fotocatalítica considerable en la degradación del colorante. Específicamente, el tungstato de cobre exhibió una leve respuesta en la degradación del colorante, caracterizada por una constante de $4{,}0 \times 10^{-4}\ min^{-1}$ (con un parámetro de ajuste lineal de $R^2 = 0{,}953$), que revela que solo alrededor del 4 % del colorante se degradó luego de dos horas de proceso. En cuanto a la heteroestructura, esta mostró un desempeño fotocatalítico apreciable, obteniéndose una constante de $1{,}6 \times 10^{-3}\ min^{-1}$ ($R^2 = 0{,}964$). Este resultado indica que aproximadamente el 20 % de la rodamina B se degradó después de dos horas. En la **Tabla 6** se presenta la comparación del valor de la constante de primer orden de la reacción con otros de heteroestructuras similares; se aprecia un orden de magnitud similar en la mayoría de los casos, a pesar de la elección del contaminante orgánico. La respuesta fotocatalítica de la heteroestructura $CuO/CuWO_4$ subyace en sus propiedades estructurales, morfológicas y ópticas. El crecimiento cristalino en la heteroestructura, inhibido para el CuO y acrecentado para el $CuWO_4$, en comparación con el de los óxidos individuales, evidenció morfologías

**Tabla 5.** Parámetros ópticos de los tres materiales de estudio

| | $\eta_M$ | $\eta_{H-V}$ | $\varepsilon_r(M)$ | $\varepsilon_{r(H-V)}$ |
|---|---|---|---|---|
| **CuO** | 2,40 | 2,27 | 5,76 | 5,15 |
| **$CuWO_4$** | 2,47 | 2,38 | 6,10 | 5,66 |
| **$CuO/CuWO_4$** | 2,52 | 2,46 | 6,35 | 6,05 |

Fuente: elaboración propia

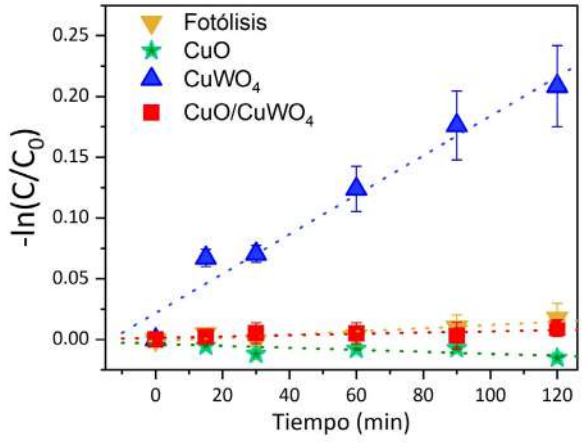



**Figura 7.** Gráficas de la cinética de la fotodegradación de rodamina B usando como fotocatalizadores los tres materiales de estudio. Fuente: elaboración propia

bien definidas (poliedros rodeados de aglomerados de nanogranos); los bajos valores de *gap* de energía de la heteroestructura fueron notables y explican que este material exhibiera un mejor desempeño fotocatalítico.

De manera complementaria, las posiciones de los límites de las bandas de conducción y de valencia, $E_{BC}$ y $E_{BV}$, se calcularon mediante las Ecuaciones 14 y 15 (**Kannan *et al.***, 2017), donde $\chi$ representa la electronegatividad de cada compuesto, 5,82 eV para el CuO y 6,32 eV para el $CuWO_4$, determinada a partir de la estimación de la electronegatividad elemental del oxígeno, el cobre y el wolframio (**Butler & Ginley**, 1978). $E^e$ es la energía del electrón libre sobre una escala de hidrógeno, aproximadamente 4,5 eV. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 7**. Se observó una notoria separación entre las bandas del CuO cuando este formaba parte de la heteroestructura; lo contrario ocurrió con el $CuWO_4$, cuyas bandas se unen ligeramente cuando este conforma la heteroestructura. Estas dos tendencias se encuentran intrínsecamente relacionadas con el mecanismo de transferencia de carga asociado a la respuesta fotocatalítica que exhibió la heteroestructura $CuO/CuWO_4$. Por otra parte, en la heteroestructura el valor de la $E_{BC}$ del CuO fue más bajo que el del $CuWO_4$, lo que hizo posible la combinación de estos dos óxidos y, subsecuentemente, la transferencia electrónica desde el CuO irradiado al $CuWO_4$, promoviendo la reducción

**Tabla 6.** Comparación de la constante de primer orden de la reacción de degradación con la respuesta de heteroestructuras semejantes

| Método de preparación | Precursor de wolframio | Fuente de radiación | $k$ ($min^{-1}$) | Contaminante a degradar | Referencia |
|---|---|---|---|---|---|
| Ruta húmeda seguida por cristalización a 300°C | Paratungstato de amonio | UV | $1,6 \times 10^{-3}$ | Rodamina B | Este trabajo |
| Hidrotermal asistido por poliol con posterior cristalización a 700 °C | Tungstato de sodio | -- | $2,5 \times 10^{-3}$ | Azul de metileno | **Kannan *et al.*** (2017) |
| Hidrotermal asistido por poliol con posterior cristalización a 800 °C | | | $3,6 \times 10^{-3}$ | | |
| Hidrotermal seguido por cristalización a 500 °C | Tungstato de sodio | UV | $2,1 \times 10^{-3}$ | Fenol | **Chen & Xu** (2015b) |
| | | vis | $3,9 \times 10^{-4}$ | | |
| | | vis | $5,85 \times 10^{-3}$ | Colorante textil X3B | |
| Ruta húmeda seguida por cristalización a 300°C | Paratungstato de amonio | UV | $8,23 \times 10^{-1}$ | Fluoxetina | **Becerra *et al.*** (2025) |

**Tabla 7.** Posiciones de las bandas de valencia y conducción de los tres materiales de estudio

| | $E_{BV}$ (eV) | $E_{BC}$ (eV) |
|---|---|---|
| **Óxido** | | |
| CuO | 1,985 | 0,655 |
| $CuWO_4$ | 3,010 | 0,630 |
| **$CuO/CuWO_4$** | | |
| CuO | 1,995 | 0,645 |
| $CuWO_4$ | 2,875 | 0,765 |

Fuente: elaboración propia

de $O_2$, acorde con lo reportado en **Chen *et al.*** (2014). A esta transferencia de carga interfacial entre los dos semiconductores que componen la heteroestructura, se atribuye la considerable respuesta fotocatalítica en la degradación de la rodamina B. En este sentido, cabe destacar que el potencial redox del $O_2$ tiene un valor de -0,33 V y generalmente se mide a 1 atm. Se ha reportado un valor de -0,29 V para 0,2 atm en aire, y -0,16 V para la concentración de 1M en agua (**Nosaka & Nosaka**, 2017). Asimismo, se ha analizado la dependencia con el pH del potencial redox de un electrón, encontrándose cambios en -0,059 pH. Específicamente, para el potencial de reducción de $O_2^{\bullet -}$, se ha propuesto la presencia de dos protones involucrados en la reducción de un electrón, mecanismo alterno a la variación del potencial redox debida a cambios en el pH, aunados a cambios en otras variables de la cinética de la reacción. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de mineralización del colorante por acción de huecos generados por la movilidad de los portadores de la banda de valencia del tungstato de cobre a la banda de valencia del óxido de cobre, produciéndose así radicales ·OH. En general, se evidenció que la combinación de los óxidos CuO y $CuWO_4$ en un sistema heteroestructurado exhibió mejor desempeño fotocatalítico que el de los óxidos individuales.

$$E_{BV} = \chi - E^e + 0{,}5E_{g-i} \quad (14)$$

$$E_{BC} = E_{BV} - E_{g-i} \quad (15).$$

## Conclusiones

Los óxidos CuO y $CuWO_4$ y la heteroestructura CuO/$CuWO_4$ se produjeron exitosamente empleando metodologías de vía húmeda sencillas y reproducibles. A partir del análisis estructural de los tres materiales obtenidos fue posible establecer la presencia de las fases CuO y $CuWO_4$ en los óxidos individuales y la coexistencia de estas dos fases en la heteroestructura. La comparación entre los parámetros de red determinados en un primer análisis semicuantitativo y a partir del refinamiento de Rietveld no evidenció cambios considerables en sus valores, a pesar de la necesidad de incluir fases secundarias en los refinamientos de los difractogramas del $CuWO_4$ y de la heteroestructura CuO/ $CuWO_4$. Desde el punto de vista morfológico, fue posible establecer la formación de láminas delgadas para el CuO, granos de simetría cuasi-regular para el $CuWO_4$, y pequeños granos de $CuWO_4$ que recubrían los poliedros de CuO en la heteroestructura. Por último, en el análisis óptico se establecieron los valores de las energías de banda de *gap*: 1,33 eV como valor de *gap* indirecto para el CuO y 2,90 eV como valor directo para el $CuWO_4$. En la heteroestructura se obtuvo un valor de *gap* de energía directo de 2,66 eV y dos valores de *gap* de energía indirectos de 1,35 y 2,11 eV, asociados al CuO y al $CuWO_4$, respectivamente. En cuanto a la evaluación del desempeño fotocatalítico de los tres materiales obtenidos, en la degradación de rodamina B se determinó que las notables características estructurales, morfológicas y ópticas de la heteroestructura CuO/$CuWO_4$ hacen de ella una mejor candidata como fotocatalizador que los respectivos óxidos individuales.

## Agradecimientos

A la profesora Miryam Rincón Joya, de la Universidad Nacional de Colombia, al profesor Carlos Arturo Parra Vargas, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, y a la doctora Elaine Cristina Paris, de EMBRAPA Instrumentação, por su valiosa orientación. A la Universidad Francisco de Paula Santander, por el apoyo financiero para la ejecución del proyecto FINU 010-2022.

## Conflicto de intereses

La autora declara no tener ningún conflicto de intereses que afecte los resultados presentados en este trabajo.

## Referencias

**Alves de Castro, I., Ariane de Oliveira, J., Paris, E. C., Giraldi, T. R., Ribeiro, C.** (2015). Production of heterostructured $TiO_2/WO_3$ Nanoparticulated photocatalysts through a simple one pot method. *Ceramics International*, *41*(3), 3502-3510. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.11.001

**Amani-Beni, Z. & Nezamzadeh-Ejhieh, A.** (2017). A novel non-enzymatic glucose sensor based on the modification of carbon paste electrode with CuO nanoflower: Designing the experiments by response surface methodology (RSM). *Journal of Colloid and Interface Science*, *504*, 186-196. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.05.049

**Azimi, S. & Nezamzadeh-Ejhieh, A.** (2015). Enhanced activity of clinoptilolite-supported hybridized PbS–CdS semiconductors for the photocatalytic degradation of a mixture of tetracycline and cephalexin aqueous solution. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, *408*, 152-160. https://doi.org/10.1016/j.molcata.2015.07.017

**Bajiri, M. A., Hezam, A., Namratha, K., Viswanath, R., Drmosh, Q. A., Bhojya-Naik, H. S., Byrappa, K.** (2019). CuO/ZnO/g-C3N4 heterostructures as efficient visible light-driven photocatalysts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *7*(5), 103412. https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103412

**Barbosa, M. O., Moreira, N. F. F., Ribeiro, A. R., Pereira, M. F. R., Silva, A. M. T.** (2016). Occurrence and removal of organic micropollutants: An overview of the watch list of EU Decision 2015/495. *Water Research*, *94*, 257-279. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.047

**Becerra, L. C. I. F., Malafatti, J. O. D., Paris, E. C., Joya, M. R., Moreira, A. J., Reis, R. Y. N., Lima, J. B., Vargas, C. A. P., Páez, A. M. R.** (2025). Photocatalytic degradation of fluoxetine mediated by CuO/CuWO4 nanostructures. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *174*, 106215. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.106215

**Buthiyappan, A., Abdul Aziz, A. R., Wan Daud, W. M. A.** (2016). Recent advances and prospects of catalytic advanced oxidation process in treating textile effluents. *Reviews in Chemical Engineering*, *32*(1), 1-47. https://doi.org/10.1515/revce-2015-0034

**Butler, M. A. & Ginley, D. S.** (1978). Prediction of Flatband Potentials at Semiconductor-Electrolyte Interfaces from Atomic Electronegativities. *Journal of The Electrochemical Society*, *125*(2), 228–232. https://doi.org/10.1149/1.2131419

**Chen, H., Leng, W., Xu, Y.** (2014). Enhanced Visible-Light Photoactivity of $CuWO_4$ through a Surface-Deposited CuO. *The Journal of Physical Chemistry C*, *118*(19), 9982–9989. https://doi.org/10.1021/jp502616h

**Chen, H. & Xu, Y.** (2015). Photocatalytic organic degradation over W-rich and Cu-rich $CuWO_4$ under UV and visible light. *RSC Advances*, *5*(11), 8108-8113. https://doi.org/10.1039/C4RA13952F

**Darbre, P.** (2018). Overview of air pollution and endocrine disorders. *International Journal of General Medicine*, *11*, 191-207. https://doi.org/10.2147/IJGM.S102230

**Derikvandi, H. & Nezamzadeh-Ejhieh, A.** (2017). Designing of experiments for evaluating the interactions of influencing factors on the photocatalytic activity of NiS and SnS2: Focus on coupling, supporting and nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, *490*, 628-641. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.11.102

**Dutta, D. P., Rathore, A., Ballal, A., Tyagi, A. K.** (2015). Selective sorption and subsequent photocatalytic degradation of cationic dyes by sonochemically synthesized nano $CuWO_4$ and $Cu_3Mo_2O_9$. *RSC Advances*, *5*(115), 94866-94878. https://doi.org/10.1039/C5RA20754A

**Fujishima, A. & Honda, K.** (1972). Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, *238*(5358), 37-38. https://doi.org/10.1038/238037a0

**Gaillard, N., Chang, Y., DeAngelis, A., Higgins, S., Braun, A.** (2013). A nanocomposite photoelectrode made of 2.2 eV band gap copper tungstate (CuWO4) and multi-wall carbon nanotubes for solar-assisted water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, *38*(8), 3166-3176. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.104

**Gizhevskiĭ, B. A., Sukhorukov, Yu. P., Moskvin, A. S., Loshkareva, N. N., Mostovshchikova, E. V., Ermakov, A. E., Kozlov, E. A., Uĭmin, M. A., Gaviko, V. S.** (2006). Anomalies in the optical properties of nanocrystalline copper oxides CuO and Cu2O near the fundamental absorption edge. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, *102*(2), 297-302. https://doi.org/10.1134/S1063776106020105

**Hervé, P. & Vandamme, L. K. J.** (1994). General relation between refractive index and energy gap in semiconductors. *Infrared Physics & Technology*, *35*(4), 609-615. https://doi.org/10.1016/1350-4495(94)90026-4

**Jiang, D., Xue, J., Wu, L., Zhou, W., Zhang, Y., Li, X.** (2017). Photocatalytic performance enhancement of CuO/Cu2O heterostructures for photodegradation of organic dyes: Effects of CuO morphology. *Applied Catalysis B: Environmental*, *211*, 199-204. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.04.034

**Kannan, S., Mohanraj, K., Sivakumar, G.** (2017a). Preparation of Bifunctional $CuWO_4$ -Based Heterostructure Nanocomposites for Noble-Metal-Free Photocatalysts. *ChemistrySelect*, *2*(16), 4484-4498. https://doi.org/10.1002/slct.201700877

**Khodami, Z. & Nezamzadeh-Ejhieh, A.** (2015). Investigation of photocatalytic effect of ZnO–SnO2/ nano clinoptilolite system in the photodegradation of aqueous mixture of 4-methylbenzoic acid/2-chloro-5-nitrobenzoic acid. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, *409*, 59-68. https://doi.org/10.1016/j.molcata.2015.08.013

**Lahmar, H., Benamira, M., Messaadia, L., Hamdi, M., Avramova, I., Trari, M.** (2020). Synthesis, physical and photo-electrochemical properties of Gd2CuO4. *Journal of Alloys and Compounds*, *816*, 152629. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152629

**Liu, J., Jin, J., Deng, Z., Huang, S.-Z., Hu, Z.-Y., Wang, L., Wang, C., Chen, L.-H., Li, Y., Van Tendeloo, G., Su, B.-L.** (2012). Tailoring CuO nanostructures for enhanced photocatalytic property. *Journal of Colloid and Interface Science*, *384*(1), 1-9. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.06.044

**Montini, T., Gombac, V., Hameed, A., Felisari, L., Adami, G., Fornasiero, P.** (2010). Synthesis, characterization and photocatalytic performance of transition metal tungstates. *Chemical Physics Letters*, *498*(1–3), 113-119. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2010.08.026

**Moss, T. S.** (1950). A Relationship between the Refractive Index and the Infra-Red Threshold of Sensitivity for Photoconductors. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, *63*(3), 167–176. https://doi.org/10.1088/0370-1301/63/3/302

**Nosaka, Y. & Nosaka, A. Y.** (2017). Generation and Detection of Reactive Oxygen Species in Photocatalysis. *Chemical Reviews*, *117*(17), 11302-11336. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00161

**Olsen, A.** (1976). Lattice parameter determination using Kikuchi-line intersections: application to olivine and feldspar. *Journal of Applied Crystallography*, *9*(1), 9-13. https://doi.org/10.1107/S0021889876010406

**Omrani, N., Nezamzadeh-Ejhieh, A., Alizadeh, M.** (2019). Brief study on the kinetic aspect of photodegradation of sulfasalazine aqueous solution by cuprous oxide/cadmium sulfide nanoparticles. *Desalination and Water Treatment*, *162*, 290-302. https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24352

**Pourtaheri, A. & Nezamzadeh-Ejhieh, A.** (2015). Enhancement in photocatalytic activity of NiO by supporting onto an Iranian clinoptilolite nano-particles of aqueous solution of cefuroxime pharmaceutical capsule. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *137*, 338-344. https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.08.058

**Raba-Páez, A. M., D. Malafatti, J. O., Parra-Vargas, C. A., Paris, E. C., Rincón-Joya, M.** (2020). Effect of tungsten doping on the structural, morphological and bactericidal properties of nanostructured CuO. *PLOS ONE*, *15*(9), e0239868. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239868

**Rehman, S., Mumtaz, A., Hasanain, S. K.** (2011). Size effects on the magnetic and optical properties of CuO nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, *13*(6), 2497-2507. https://doi.org/10.1007/s11051-010-0143-8

**Schmitt, P., Brem, N., Schunk, S., Feldmann, C.** (2011). Polyol-Mediated Synthesis and Properties of Nanoscale Molybdates/Tungstates: Color, Luminescence, Catalysis. *Advanced Functional Materials*, *21*(16), 3037-3046. https://doi.org/10.1002/adfm.201100655

**Sen, S. K., Dutta, S., Paik, L., Paul, T. C., Manir, M. S., Hossain, M., Hossain, M. N.** (2021). Dy-doped MoO3 nanobelts synthesized via hydrothermal route: Influence of Dy contents on the structural, morphological and optical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, *876*, 160070. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160070

**Souza, E. L. S., Sczancoski, J. C., Nogueira, I. C., Almeida, M. A. P., Orlandi, M. O., Li, M. S., Luz, R. A. S., Filho, M. G. R., Longo, E., Cavalcante, L. S.** (2017). Structural evolution, growth mechanism and photoluminescence properties of CuWO4 nanocrystals. *Ultrasonics Sonochemistry*, *38*, 256–270. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.007

**Zhang, H., Yilmaz, P., Ansari, J. O., Khan, F. F., Binions, R., Krause, S., Dunn, S.** (2015). Incorporation of Ag nanowires in $CuWO_4$ for improved visible light-induced photoanode performance. *Journal of Materials Chemistry A*, *3*(18), 9638–9644. https://doi.org/10.1039/C4TA07213H

**Zhang, Q., Zhang, K., Xu, D., Yang, G., Huang, H., Nie, F., Liu, C., Yang, S.** (2014). CuO nanostructures: Synthesis, characterization, growth mechanisms, fundamental properties, and applications. *Progress in Materials Science*, *60*, 208-337. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.09.003

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318



Artículo original

# Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XIV. Ocho especies nuevas de *Matisia* de Suramérica

## Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XIV. Eight new species of *Matisia* from South America

**José Luis Fernández-Alonso**

Departamento de Biodiversidad y Conservación, Real Jardín Botánico RJB-CSIC, Claudio Moyano 1, 28014 Madrid, España

## Resumen

Como avance al trabajo de revisión que se adelanta en el género *Matisia* (Malvaceae), en esta contribución se describen e ilustran ocho especies nuevas de la sección *Calyculatae*, propias del Norte de Sudamérica. De ellas seis crecen en la vertiente amazónica, una en los valles interandinos de Colombia y la octava se encuentra restringida a la vertiente del Pacífico de Colombia y Ecuador. Se aclara el estatus de tres nombres inválidos o dudosos, referidos a *Matisia altoamazonica* y *M. oritolumbaquina*, aquí descritas.

**Palabras clave:** Malvaceae; Matisieae; Mesoamérica; Nuevas especies; Suramérica; taxonomía.

## Abstract

As part of the taxonomic work being carried out on the genus *Matisia* (Malvaceae), eight new species from *Matisia* section *Calyculatae* are described and illustrated in this contribution, all native to northern South America. Six of these species grow on the Amazonian slope, one is distributed in the inter-Andean valleys of Colombia, and another one is restricted to the Pacific slope of Colombia and Ecuador. The status of three invalid or questionable names, associated to the new species *Matisia altoamazonica* and *M. oritolumbaquina* described here, is also clarified.

**Keywords:** Malvaceae; Matisieae; Mesoamerica; New species; South America; taxonomy**.**

## Introducción

El género neotropical *Matisia* Bonpl. (Malvaceae), tradicionalmente tratado como parte de la tribu Matisieae K. Schum. de la subfamilia Malvoideae (**Schumann**, 1895; **Alverson *et al.***, 1999; **Baum & al.**, 2004), ha sido ubicado recientemente en una subfamilia monotípica aparte, Matisioideae C.D.M. Ferreira (**Colli-Silva *et al.***, 2025); no obstante, consideramos que esta propuesta no está aun plenamente resuelta, hasta que no se cuente con estudios filogenéticos más completos y contundentes, en concordancia con lo señalado por W.S Alverson (Apéndice 1: 58-59, en: **Guevara & al**., 2025). *Matisia* se distribuye desde Nicaragua hasta Brasil y agrupa al menos 70 taxones reconocidos (**Alverson,** 1989; **Fernández-Alonso**, 2011; **Fernández-Alonso & Campos-Pineda**, 2024; **Torrejano-Munevar & al.**, 2025), entre los que se encuentran numerosas especies que están aun en proceso de descripción (**Fernández-Alonso**, 2026a, 2026b). *Matisia* se diferencia del género afín *Quararibea* Aubl., por su gineceo 5-locular, su tubo estaminal típicamente zigomorfo y profundamente lobulado-digitado en el ápice (con lóbulos de más de 4 mm de longitud) y por la ausencia de olor característico a alholva o regaliz en muestras secas, atributo que suele ser característico de *Quararibea* (**Alverson**,1989; **Fernández-Alonso,** 1996; **Fernández-Alonso**, 2021).

**Citación:** Fernández-Alonso JL. Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XIV. Ocho especies nuevas de *Matisia* de Suramérica. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

**Editor:** Elizabeth Castañeda

**Correspondencia:**
José Luis Fernández-Alonso;
jlfernandeza@rjb.csic.es

**Recibido:** 28 de octubre de 2025
**Aceptado:** 3 de febrero de 2026
**Publicado en línea:** 12 de junio de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

Los patrones de diversificación que muestran algunas secciones del género *Matisia* (secciones *Calyculatae* Fern.Alonso*, Castano* Fern.Alonso*, Longipedes* Fern.Alonso y *Matisia*), tanto en el corredor chocoano del Pacífico -y su conexión al norte con los valles interandinos de Colombia-, como en el piedemonte y planicie norte de la Amazonía, son excepcionales; eso indican los trabajos de revisión que se vienen adelantando por largo tiempo en el género *Matisia* (**Cuatrecasas,** 1971; **Fernández-Alonso,** 2001a; **Fernández-Alonso**, 2011; **Fernández-Alonso & Campos-Pineda**, 2024). Pero su diagnóstico completo dista aún de estar satisfactoriamente resuelto, a falta de colecciones completas en los herbarios (flor y fruto) para algunos de los taxones nuevos ya reconocidos, pero aun no publicados (**Fernández-Alonso**, en prep.). En *Matisia*, al margen de la llamativa presencia de varias especies simpátricas que ocupan diferentes nichos y estratos en algunos tipos de bosque, fenómeno ya señalado en el caso de los bosques muy húmedos o pluviales del chocó biogeográfico (**Gentry**, 1986; **Fernández-Alonso**, 2001a; **Fernández-Alonso & Castroviejo**, 2001), se han detectado algunos casos y escenarios adaptativos particulares, que se documentan más adelante en este trabajo, con la delimitación de varias especies nuevas.

## Materiales y métodos

Como parte del trabajo de revisión que se viene adelantando en las secciones *Calyculatae* y *Longipedes* del género *Matisia*, se revisó abundante material depositado en los herbarios AAU, AMAZ, COAH, COL, ECUAMZ, F, G, K. HUAZ, M, MA, MO, MOL, NY, QCA, QCNE, U, UDBC, UIS, US y WIS (acrónimos según **Thiers**, 2025). El estudio de estas colecciones de herbario, complementado con algunas colecciones e imágenes de campo, fueron la base principal del análisis morfológico y de la distribución geográfica de las especies que aqui se describen y comentan. En el estudio morfológico y en la terminología descriptiva se siguió básicamante la metodología ya referida en contribuciones anteriores (**Fernández-Alonso**, 1996, 2001a; **Harris & Harris**, 2001; **Ellis & al.**, 2009). Se tomaron algunas fotografías de acercamiento (tricomas y detalles de estructuras florales) con lupa binocular Nikon SMZ645 y lente de 100x acoplada a una cámara Canon PowerShot SX260HS. En este trabajo no se abordó la determinación del estado de conservación de las especies aquí descritas, de acuerdo con los criterios de la Lista Roja de la **IUCN** (2022), que será el objetivo de otra contribución posterior.

En cuanto a la documentación gráfica que forma parte de este trabajo, la información se ha segregado en dos bloques. Las figuras que acompañan al texto son nueve y corresponden a ilustraciones detalladas, especímenes tipo de las nuevas especies o en algún caso fotografías de campo de material tipo o relacionado (*Matisia archidonae*, *M. oritolumbaquina*). Se incluyen tambien varias figuras como Material Suplementario (**Figuras de la 1S a la 17S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322), con información morfológica variada (fotografias de acercamiento) o con detalles de colecciones históricas relacionadas con aspectos nomenclaturales tratados (en el caso de caso de *Matisia altoamazonica*).

## Resultados

Como continuación de los trabajos de revisión en curso del género *Matisia*, se describen en la presente entrega ocho especies nuevas, todas asignables a *Matisia* sect. *Calyculatae*. Varios de estos nuevos taxones fueron diagnosticados hace ya más de una década, cuando se abordó la revisión de la citada sección y han venido identificandose tentativemente en los herbarios bajo los nombres *Matisia bracteolosa* Ducke s.l.*, M. idroboi* Cuatrec. s.l. *y M. lomensis* (Cuatrec.) Cuatrec. s.l. (**Fernández-Alonso**, 2011). De las ocho especies nuevas, seis corresponden a plantas de la cuenca o vertiente amazónica, una de los valles interandinos de Colombia y una de la vertiente pacífica de Colombia y Ecuador. Con la presente publicación de los nuevos nombres y los que aparecerán próximamente en dos trabajos subsiguientes (**Fernández-Alonso**, 2026a, 2026b), se espera acabar con esta provisionalidad nomenclaural mencionada, reflejada en los herbarios, como resultado de dos décadas de avances en la interpretación y conocimiento de un grupo de especies del género *Matisia* excepcionalmente complejo (**Fernández-Alonso & Campos-Pineda**, 2024).

Un caso llamativo que se aborda aquí es el de tres especies amazónicas del grupo de "*Matisia lomensis* s.l.", que se describen en este trabajo, especies estrechamente relacionadas en su morfología, que se encuentran asociadas a hábitats marcadamente diferentes. Una es *M. altoamazonica*, un árbol propio del dosel del bosque de tierra firme de la alta amazonía (Brasil y Perú), mientras que las otras dos especies son arbustos o arbolitos de pequeño porte, asociadas a ambientes igualmente contrastantes. La segunda especie, *M. huaoranica*, de reducido porte, vive en el sotobosque bajo de los bosques primarios estables de tierra firme, asentados sobre suelos rojos arcillosos; la tercera especie, *M. tarapacana*, con porte de arbusto o arbolito tipo varilla, vive asociado a aguajales y latizales inundados temporalmente, en terrazas de la amazonía. La llamativa reducción en el porte y la temprana floración observada en ambas especies, respondería a dos estrategias adaptativas diferentes. En el caso de *M. tarapacana,* sería una respuesta de la especie a los ambientes inestables y cambiantes (terrazas aluviales) donde habita. Esta situación de floración muy precoz en condiciones de estrés ambiental (sequía), que hemos visto en el caso de algunas Lamiaceae y Malvaceae herbáceas de los géneros *Hyptis* Jacq. y *Sida* L. (obs. pers.), nos parece llamativa en un género como *Matisia,* eminentemente arbóreo. El caso de la tercera especie, *M. huaoranica*, que ocupa un nicho más estable en el estrato basal y sombrío del bosque primario, la situación es distinta. Respondería a un caso de clara especialización de nicho en condiciones de simpatría con otras especies del mismo género que crecen en estratos superiores del bosque. Este fenómeno se ha observado también en otras especies del género que son arbolitos del sotobosque, como en *M. oblongifolia* Poepp. & Endl. (*Matisia* sect. *Castano*), de los bosques amazónicos y como *M. bullata* Fern.Alonso y *M. racemifera* Fern.Alonso, especies del sotobosque en los bosques pluviales del Chocó biogeográfico (**Fernández-Alonso**, 2001a, 2001b, **Valois & Ramos,** 2007; **Fernández-Alonso,** 2016). En todos los casos comentados, cabría plantaear estudios detallados de la biología reproductiva y de la especificidad de hábitat de cada especie, para entender mejor los patrones de diversificación que han tenido lugar en este interesante género de malváceas de frutos drupáceos, propio de los bosques húmedos del Neotrópico (**Alverson**, 1989; **Fernández-Alonso,** 2001a).

## Tratamiento taxonómico

**1. *Matisia altoamazonica*** Fern.Alonso**, sp. nov. (Figuras 1, 1S-3S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322**)**

**TIPO:** PERU. **Departamento de Loreto:** Provincia Alto Amazonas, Distrito de Manariche, Pongo de Manseriche, bosque primario, 4º26´S 77º34´O, 500 m, árbol 8 m, 28 nov 1997 (fr), *R. Rojas 692, A. Peña & N. Correa* (holotipo: COL 476869; isotipos: MO 2025907/A:6077458, US).

=*Myrodia scabra* Mart., Flora 22 (1, Beibl): 19. 1839. (?). BRASIL**. Estado de Pará.** Martius Iter Brasiliense/ "Crescit in Brasiliae prov. Paraensis in sylvis primaevis" (fr), 1819, *C.F.P. von Martius s.n*. (M 0211599) [sub. *Matisia bracteolosa* Ducke/ 1987], (**Figura 2S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322); nombre dudoso. **pro syn.**

=*Quararibea tessmannii* Ulbrich. **nom. nud.** [in schaeda]. PERÚ. Ost-Perú, [Departamento de Amazonas], 'Stromebiet des Maranon, Santiago-Mundung am Pongo de Manseriche', c. 77º30'W, (fl), 1924, *G. Tessmann 4547* (G 00226725). (**Figura 3S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322), **syn. nov**.

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia lomensis* (Cuatrec.) Cuatrec., from which it is distinguished by having subchartaceous leaves, dry reedish, narrower, 10-18(20) × 3-5 cm (vs. chartaceous or coriaceous leaves, dry greens, usually wider, 13-20 × 5-9 cm in *M. lomensis*); fruiting peduncles with three persistent verticillate bractlets, in terminal position, linear-lanceolate (vs. peduncles with oval-lanceolate bractlets, attached to calyx base), and floral and fruiting calyx with 10 short, thickened, slightly sinuous wings (vs. floral calyx with 3-5 wings, usually present only in the distal half).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

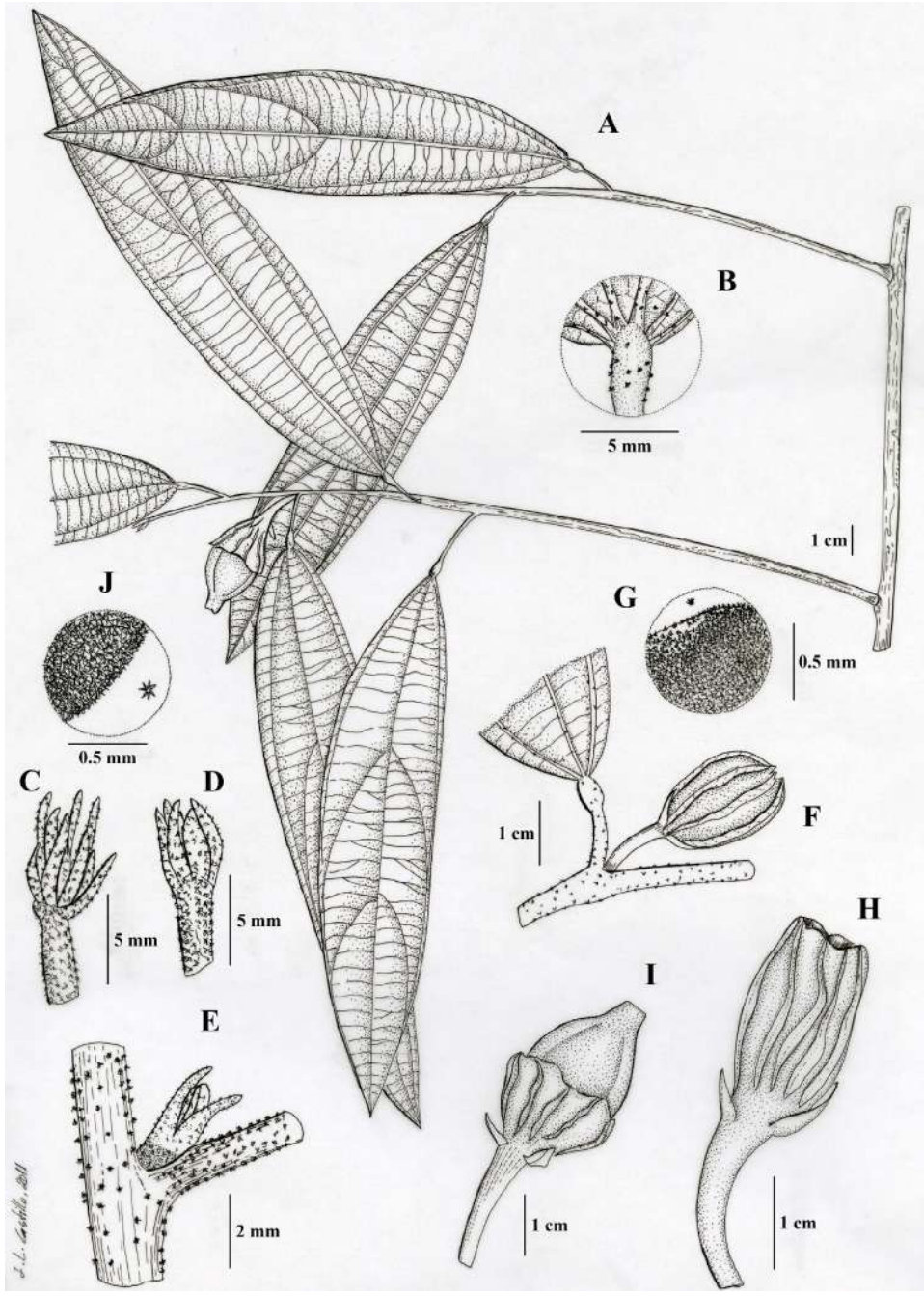



**Figura 1.** ***Matisia altoamazonica*** Fern.Alonso. **A.** Ramitas terminales. **B.** Indumento de la parte distal del pecíolo y de base del limbo foliar (envés). **C** y **D.** Aspecto e indumento de las yemas terminales. **E.** Brote florífero joven asociado a una hoja. **F** y **G.** Cáliz joven y su indumento externo. **H.** Pedicelo floral con bracteolas y cáliz en la antesis. **I.** Pedúnculo, cáliz fructífero y fruto maduro en vista lateral. **J.** Indumento externo del fruto. [A-E y I-J, del holotipo *Rojas 692,* COL; F-G, de *Vásquez 1991,* COL; H, de *Vásquez 4438,* COL]. Lámina de J.L. Castillo.

**Árboles** (8)10-25 m, frecuentemente con bambas o contrafuertes; ramificación primaria generalmente verticilada. **Ramas** terminales cilíndricas o ligeramente angulosas, con corteza frecuentemente marrón-rojiza, finamente tuberculada y con numerosas lenticelas. **Yema** terminal con catáfilos estipulares linear-lanceolados, 4-8 mm de largo

× 1,5 mm de ancho en la mitad basal, muy delgados en la mitad distal, incurvos, con indumento denso, fino, estrellado-fasciculado; ápice de las ramas con hojas jóvenes, estípulas y pedicelos con indumento fino, estrellado-fasciculado, densamente dispuesto, a veces de aspecto farináceo. **Hojas** frecuentemente lustrosas, marrón-rojizo oscuro (en seco), **pecíolo** grácil, 12-16 × 1,5 mm, con pulvínulo proximal poco conspícuo y el distal cilíndrico, gradualmente engrosado, 3-6 × 1,5-2 mm; láminas subcartáceas; estrechamente oblongas o a veces oblanceoladas, 10-18(-20) × 3-5 cm, redondeadas en la base y agudas o subacuminadas en el ápice, acumen 7 × 5 mm; margen no revoluto. **Venación** característica, generalmente con vena media y otras dos venas basales de largo recorrido, sin apenas venas secundarias (generalmente dos a cada lado) ubicadas en la mitad distal; venación terciaria perpendicular a las venas primarias o secundarias y paralela, conspícua; láminas adultas glabrescentes por el haz con escasos pelos estrellados en los nervios principales; envés glabrescente con indumento estrellado, fino y disperso. **Flores** opuestas a las hojas o raramente en posición aparentemente lateral con respecto a la hoja; **pedicelo floral** 10-13 × 1,5 mm, con indumento marrón, estrellado-equinado muy fino, con tres bracteolas verticiladas, subterminales, por debajo del cáliz, patentes o erecto-patentes, linear-lanceoladas o estrechamente triangular-lanceoladas, agudas, (6-)8-11 × 2-3 mm; **cáliz** floral tubular-cilíndrico, 13-16 × 6 mm, irregularmente 4-5 lobado en su zona distal; lóbulos triangular agudos c. 3 mm de longitud; generalmente con 10 alas uniformes, engrosadas, mas o menos rígidas, escasamente sinuosas, poco elevadas, c. 1 mm (de alto); densamente cubierto de indumento estrellado-equinado, marrón-amarillento en seco; **corola** con cinco pétalos, patente-recurvados en la antesis, estrechamente linear-espatulados, 40-48 mm de largo × 2,5 mm de ancho en su mitad basal y de 6-8 mm de ancho en su mitad distal, glabrescentes en su cara interna y finamente estrellado-pilosos en su cara externa. **Columna estaminal** rebasando largamente la boca del cáliz, 34-37 mm de largo × 1,5 mm de grosor, con indumento marrón-amarillento, fina y densamente estrellado-tomentoso; **ramas estaminales** erecto-patentes, 10-11 mm × 1,5 mm, con 4-5 tecas laxamente dispuestas de modo alterno en cada rama, **tecas** c. 2-2,5 × 0,5 mm, sinuosas en su margen después de abiertas; **estilo** no visto. **Pedúnculo** del fruto 10-15(-18) × 2 mm; bracteolas persistentes y levemente acrescentes, en posición terminal en el pedúnculo, erecto-patentes, lanceoladas o estrechamente lanceoladas, subiguales, 9-12 × 3(4) mm. **Cáliz fructífero** cupular, 12-15 × 18-22 mm, recubriendo 1/2 a 1/3 del fruto, con 10 alas longitudinales uniformes, ligeramente sinuosas, de aspecto ligeramente tuberculado en la cara externa, con indumento fino estrellado-equinado mezclado con pubescencia muy corta de pelos acostados. **Fruto** propiamente dicho verdoso-amarillento (en fresco), carnoso, elipsoide o anchamente elipsoide en la madurez, 20-25 × 15-17 mm, rematado generalmente en pico y truncado, pico 3-7 × 2-3 mm, todo el epicarpio con indumento lepidoto marrón claro, brillante; con cinco pirenos, estrechamente oblongos, 18-19 × 10 mm, tapizados de fibras del mesocarpo.

**Etimología.** El nombre hace referencia a la distribución conocida de esta especie en un sector del Alto Amazonas de Perú y Brasil.

**Distribución y hábitat.** Especie localizada en sectores del alto Amazonas de Perú (Amazonas, Loreto) y Brasil (Pará). Su presencia en territorios de Colombia y Ecuador es también esperada. Consideramos que es una especie propia del bosque maduro de tierra firme asentado sobre paisajes ondulados con cimas amplias, donde se presenta como árbol del dosel, de 20-25 m. En este ambiente de lomas de tierra firme, se presentan sustratos arcillosos con comunidades vegetales variadas con *Aechmea* Ruiz & Pav*., Attalea* Kunth*, Calathea* G. Mey*., Dieffenbachia* Schott. y *Zamia* L., entre otros géneros.

**Fenología.** La mayoría de los registros de Perú corresponden a plantas fructificadas, de junio a diciembre, con algún registro de floración en junio.

**Notas taxonómicas- *Myrodia scabra* Mart. y *Quararibea tessmannii* Ulbr.**

En 1839 C.F.P. von Martius*,* describió bajo el nombre de *Myrodia scabra* (**Martius,** 1839) un árbol con hojas largamente trinervadas, con indumento escábrido, provisto

solo de frutos y proveniente de las selvas de Brasil. Este nombre, sustentado en escasa información descriptiva y en material original de herbario no claramente localizado, que correspondería sin duda a alguna especie de los géneros *Matisia* o *Quararibea*, ha tendio recurrentes problemas de asignación o aplicación, desde su descripción. En 1846, "*Myrodia scabra* Mart.(?)" apareció asociado tentativamente a algunas centurias de recolecciones de plantas vasculares de P.C.D. Clausen (1801-1872) provenientes de Brasil (Minas Gerais, Brasilia), disponibles para su venta en Stutgart (**Hohenacker,** 1846; **JSTOR**, 2025). Con posterioridad, ***Schumann*** (1886) en el tratamiento de las Bombacaceae de la Flora Brasliensis, se refiere a *Myrodia scabra* ya dentro del género *Matisia*, en las observaciones de una de sus especies descritas, *Matisia lasiocalyx* K. Schum. Allí mostraba sus dudas sobre la posible correspondencia entre la planta de Martius y la suya descrita en esa flora. "..Obs. *In herbario monacensi altera planta Martiana reperitur,...propterea mihi incertum est, an cum specie nostra quadret. Cl. Martius sub titulo Myrodia scabra in Hb. Fl. Brasil. sub. nº 294 id descripsit."* .

Esta incertidumbre continuó en tiempos ya mas recientes, y es así como **Vischer** (1920), con la escasa información existente en esa fecha, mantiene a *Myrodia scabra* como una de las especies poco conocidas "*species parum notae*", dentro del género *Quararibea* en sentido amplio. Y años más tarde, es **Bakuhizen** (1924), el que lo trata como una especie no resuelta del género *Quararibea*, refiriendose a la información incierta de la especie amazónica de Martius, basada en el espécimen n. 294 (no visto) ubicado en su dia en el Herbario Moncense, en Munich (M).

La única colección que hemos encontrado asociada al nombre *Myrodia scabra* Mart. en este herbario (**Figura 2S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322), es *Martius* s.n. del año 1819, de la provincia Paraense de Brasil (M-0211599), que en principio se ajusta a la escasa información descriptiva sobre las hojas y el fruto existente en el protólogo (**Martius,** 1839). La otra colección que fue identificada (con dudas) como *Myrodia scabra* Mart. es la de *P. Clausen 2101*, de Brasil, ya comentada (**Hohenacker,** 1846). Sin embargo, las dos colecciones de Clausen asociadas a este nombre, actualmente en el herbario L (**GBIF**, 2025; **Naturalis**, 2025), L2377308, L2377309, como hemos podido constatar, son plantas con flor y con hojas estrechamente lanceoladas y largamente acuminadas, diferentes a las descritas en el protólgo de *M. scabra*. Considerando además que las plantas de Clausen fueron recolectadas en 1840-1842, con posterioridad a la fecha de publicación de *M. scabra*, su relación con el material original analizado por Martius y con el género *Quaraibea*, quedaría en nuestra opinión claramente descartada.

La colección del herbario M (M0211599) de *M. scabra* fue revisada y rotulada por W. Alverson en los años 80 (etiquetas de 1985, 1987) como una posible mezcla de los frutos de *Matisia bracteolosa* Ducke, con una rama y hojas de una segunda especie afin a *M. ochocalyx* K. Schum. En nuestra opinión tanto los frutos como las hojas corresponden a una misma especie amazónica de la sección *Calyculatae*, y diferente a *M. bracteolosa*, considerando la información del cáliz fructífero (con más de 5 alas poco elevadas) y de la venación característica de las hojas. Por todo lo comentado, nos pareció arriesgado asignar este nombre (pobremente descrito en el protólogo e insuficientemente respaldado con material original de herbario), a lo que aquí estamos describiendo bajo el nombre de *M. altoamazonica*, una especie bien delimitada con base en el material estudiado reciente, proveniente de la alta Amazonía. Ante la persistente falta de información en relación con la asignación del nombre *Myrodia scabra* Mart. y teniendo en cuenta las indicaciones del Código (**Greuter & al.**, 2025), en lo referente a nombres válidamente publicados y a nombres ilegítimos, hemos optado por proponer la nueva especie *M. altoamazonica*, basada en colecciones recientes de Perú.

El espécimen *Tessmann 4547* (G 00226725), de Pongo de Manseriche, Marañon, Perú, bajo el nombre inédito *Quararibea tessmannii* Ulbr. (fl), corresponde a una planta con flores y botones (**Figura 3S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322) que cumpliría las características de la descripción de *M. altoamazonica*

aquí propuesta. No obstante, al tratarse de un nombre inédito asociado a un pliego de herbario ("*nomen nudum*"), la incluimos aquí como sinónimo nuevo, de acuerdo con lo indicado en artículo 56 del Código (**Greuter & al.**, 2025).

**Otras notas taxonómicas.** Según nuestro análisis esta especie guarda estrecha relación con *M. tarapacana* Fern.Alonso, especie propia de superficies disectadas e inestables (en latizales, varillales, bosques de rebalse y restingas) en terrazas inundadas estacionalmente (aguajales). En estos ambientes se presentan caños de aguas negras y suelos de arenas blancas o arcillas, donde esta segunda especie presenta el hábito de arbusto o arbolito de 2-6(-7) m (varilla), que presentan floración y fructificación temprana y abundante. Los especímenes de los bosques primarios de tierra firme de la region del Yasuní, en la amazonía ecuatoriana, con algunas diferencias estables en las hojas y el cáliz fructífero (con anchas bractéolas insertas en su base y prácticamente desprovistas de alas longitudinales), se tratan como un taxón independiente que se describe en este trabajo (*M. huaoranica*).

Algunas colecciones asignables a *Matisia lomensis* Cuatrec. s.l., provenientes del piedemonte amazónico del departamento del Caquetá en Colombia (Belén de Andaquíes, Puerto Rico y Florencia), generalmente de cotas altitudinales por encima de los 500-700 m, presentan también alguna afinidad con la especie que aquí se describe, aspecto que ameritaría un reanálisis posterior.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** BRASIL**. Estado de Pará:** Martius Iter Brasiliense/ "Crescit in Brasiliae prov. Paraensis in sylvis primaevis" (fr), 1819, *C.F.P. von Martius s.n*. (M 0211599).(**Figura 2S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322).

PERU. **Departamento de Amazonas:** Provincia de Bagua, Imaza, Comunidad nativa Yamayakat, Quebrada Kusú, monte alto de la comunidad Yamayaca, 310 m, árbol 25 m, 15 nov 1990 (fr), *C. Díaz et al. 4170* (COL 410199, MO); ibidem, Bagua, Distrito de Imaza, 740 m, 6 oct 1994, *C. Diaz et al. 7284* (COL, MO). [Departamento de Amazonas], 'Stromebiet des Maranon, Santiago-Mundung am Pongo de Manseriche', c. 77º30'W, 1924 (fl), *G. Tessmann 4547* (G 00226725). **Departamento de Loreto:** Alto Amazonas. Capahuari Norte, bosque primario, 76º25´O 2º05´S, 220 m, árbol 8 m, 7 jun 1981 (fr), *R. Vásquez 1991 & N. Jaramillo* (COL 408945, MO); ibídem, Alto Amazonas, Andoas, bosque de transición, 76º25´O 2º55´S, 180 m, árbol 6 m, 9 sep 1983 (fl, fr), *R. Vásquez et al. 4438* (MO 4578084); ibídem, 320 m, 15 jul 1994, *R. Vásquez et al. 18697* (COL, MO).

**2. *Matisia archidonae*** Fern.Alonso*,* **sp. nov.** (**Figuras 2, 3, 4S y 5S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322)

**TIPO:** ECUADOR. **Provincia de Napo:** Cantón de Archidona, Parque Nacional Sumaco, Napo-Galeras; bosque pluvial premontano (bp-P) sobre areniscas, 00º50'S 77º31'O, 1690 m, árbol 20 m, 8 mar 2003 (fl), *V.H. López 101 & D. Neill, O. Jadán, L. Miranda.* (holotipo: QCNE 179175); isotipos: ECUAMZ, LOJA, MA 964088, MO).

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia exalata* Alverson, from which it is distinguished by having glabrescent young branches, leathery leaves, narrowly oblong-elliptical, L/W ratio = 4(5)/ 1 (vs. young branches tomentulose, with brown-green echinate indumentum, leaves papery, obovate to elliptical, L/W ratio = 2/1 in *M. exalata*), flowers generally arranged in defoliated sectors of the terminal branches, with narrowly triangular-subulate, rigid, reflexed bracteoles (vs. flowers opposite the leaves on the terminal branches, with broad to narrowly triangular bracteoles, ascending or patent), calyx echinate-lepidote on its outer surface (vs. calyx densely tomentulose on the outside), and fruit short globose, 15 × 12-14 mm (vs. fruit broadly ellipsoid, 24-33 × 15-24 mm).

**Árboles** medianos o grandes, 18-25(-30) m; ramificación verticilada, horizontal o ligeramente péndula; corteza del tronco de aspecto más o menos liso, pero finamente cuarteada; leño blanquecino. **Ramas** terminales con ramitas cortas de aspecto articulado, fragmentado, con cicatrices transversales de rastros estipulares y rastros de abscisión foliar muy evidentes; entrenudos de c. 20 mm de longitud; **corteza** grisácea, nodoso-rugosa con

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

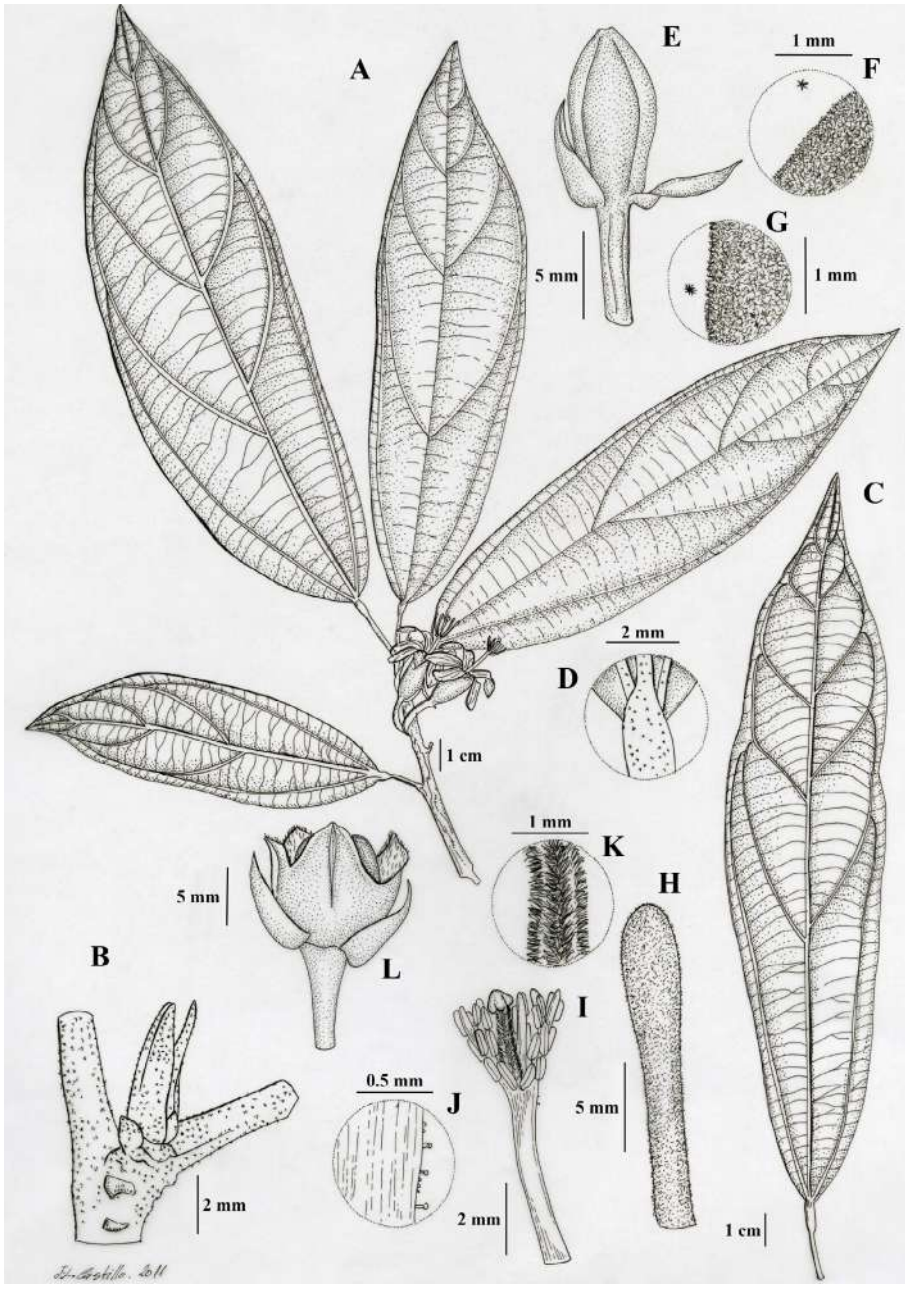



**Figura 2.** ***Matisia archidonae*** Fern.Alonso. **A.** Detalle de una rama terminal, mostrando la disposición de las flores en posición subterminal. **B.** Aspecto de la yema terminal en la rama. **C.** Hoja vista por el envés. **D.** Aspecto del pulvínulo distal, visto por el envés de la lámina. **E.** Botón floral, mostrando la ubicación de isotipo las tres bractéolas en la base de la copa calicina. **F.** Indumento del cáliz fructífero. G. indumento del pedicelo floral. **H.** Pétalo, cara externa. **I.** Androceo con la columna y ramas estaminales. **J.** Indumento glandular de la columna estaminal. **K.** Indumento del estilo. **L.** Detalle del cáliz fructífero con bractéolas persistentes y el fruto joven. [A-K, a partir de *López 101,* isotipo COL; L, a partir de *Neill & Palacios 7657,* COL]. Lámina de J.L. Castillo.

pequeños abultamientos tuberculados y lenticelas; ápice de las ramas jóvenes, pecíolos y yemas con indumento muy corto equinado-tuberculado. **Yemas** terminales estrechamente cónicas, o cónico-fusiformes, compactas, con catáfilos estrechamente triangulares, incurvo-cóncavos, 3-6 × 2 mm, indumento equinado-tuberculado. **Hojas** con **estípulas** muy

prontamente caducas, estrechamente triangular-subuladas, 4-5 × 1 mm; **pecíolo** 14-18(-21) mm × 1,5-2 mm, con dos pulvínulos marrón-negruzcos bien delimitados, subcilíndricos, cada uno de 4-6 mm de longitud, con indumento muy fino, tuberculado-equinado; **láminas** discoloras, verde oliváceo o marrón pálido en el haz y marrones mas oscuras en envés (en seco), gruesas, subcoriáceas, estrechamente lanceoladas o lanceolado-elípticas, 20-35 × 3,5-5,5 cm; proporción largo/ancho 4(5)/1; con base de los semilimbos ligeramente desiguales, de cuneada o estrechamente cuneada, raramente redonda; ápice agudo o acuminado, con acumen poco diferenciado, hasta de 15 × 7-9 mm en su base, **margen** entero; **venas** primarias basales 3, muy marcadas, raramente con 2 venas mas, submarginales, muy poco conspícuas y de muy corto recorrido; venas secundarias 3(-4) pares de nervios a los lados del nervio medio, ascendentes en ángulo agudo; venas terciarias generalmente paralelas y perpendiculares a las anteriores, muy notorias en el envés; venación de cuarto y quinto orden reticulado-poligonal poco resaltada y solo visible en el envés; lámina de aspecto glabrescente, **haz** con venas primarias y secundarias impresas y con otra venación muy poco resaltada; **envés** con venas primarias muy resaltadas, de sección redondeada y venas




**Figura 3.** ***Matisia archidonae*** Fern.Alonso. Fotografías del paratipo *J. Betancur 23306,* de Colombia. Putumayo. **A.** Fotografía de la rama. **B.** Detalle de las flores. [Fotografías de Cristian Castro, COL].

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

de tercer y cuarto orden rojizas, resaltadas. **Flores** generalmente caulinares dispuestas en la zona subterminal de ramas cortas, de a una o de a dos, mas raramente opuestas a las hojas en las ramitas (**Figura 3**); **pedicelo floral** cilíndrico, gradualmente ensanchado hacia el ápice, (8-)10-18 × 1,5 mm; con **bractéolas** insertas claramente sobre la base ensanchada de la copa calicina, subverticiladas, estrechas, separadas entre si, erecto-patentes o reclinadas; estrechamente triangulares, 6-8 × 1,5 mm, densamente cubiertas de indumento muy fino equinado; **botón floral** estrechamente elipsoide u obovoide, 12-15 × 5 mm en su zona media; con tres bractéolas verticiladas, conspícuas en la base del cáliz; obtuso redondeado distalmente, generalmente sin alas visibles; **cáliz floral** verdoso-amarillento o amarillo ferrugíneo (en vivo), moteado con pequeñas manchas oscuras, de aspecto glabro pero cubierto de indumento equinado-lepidoto que le da aspecto finamente tuberculado; tubular cónico o cónico acampanado, estrecho en su base, 15-17 × 5-7 mm en su parte distal, generalmente sin alas o raramente con alas muy poco desarrolladas, con 3-5 lóbulos distales triangulares o mas o menos redondeados, 3-4 × 4-5 mm, externamente liso, con indumento muy fino de aspecto lepidoto, internamente con indumento seríceo, acostado; **corola** blanca, patente o reclinada en la antesis; pétalos estrechamente espatulados, obtusos, 30-35 mm × 4 mm en la parte distal y de 1,5 mm en la mitad basal; glabos o glabrescente-glandulares en su cara interna; con indumento estrellado fino, denso, de aspecto lanoso en la cara externa. **Androceo** con **columna estaminal**, blanca en vivo, cilíndrica, generalmente arqueado-ascendente, c. 23-28(-30) ×1-1,5 mm, de aspecto glabro o glabrescente pero con pelos glandulares gruesos, dispersos; **ramas estaminales** orientadas en un polo (bilateral), delgadas, 6-8 ×1 mm, con 2-3 pares de anteras monotecas alargadas, arriñonadas, 1,5 ×1 mm; **estilo** blanquecino, 32-35 mm, alcanzando apenas la altura de las ramas estaminales, con denso indumento blanco, estrellado; **estigma** capitado, subesférico, 1,5 mm de diámetro. **Pedúnculo fructífero** 17-20 × 1,5 mm, rígido, recto, ensanchado distalmente, con las tres bractéolas persistentes insertas en la base de la copa calicina, en posición reflexa. **Cáliz fructífero** anchamente cilíndrico infundibuliforme, recubriendo 2/3 partes del fruto; con las tres bractéolas ligeramente acrescentes, rectas, recurvadas, 6-9 × 2 mm, con recubrimiento parcial y desigual de indumento marrón-ferrugíneo. **Fruto** inmaduro, verde, anchamente ovoide-globoso, achatado, truncado distalmente, c. 15 ×12-14 mm, con un mucrón o apéndice central; fruto maduro y **pirenos** no vistos.

**Etimología.** El nombre de la especie hace referencia a la localidad tipo, el Cantón de Archidona en la provincia de Napo, Ecuador.

**Distribución y hábitat.** Conocida del piedemonte amazónico de Ecuador y Colombia, en ambientes de bosque pluvial premontano. Crece a menudo en terrenos con pendiente, generalmente sobre suelos derivados de roca arenisca y a veces también sobre roca calcárea, entre los 1000 y los 1700 m. En Colombia sólo conocemos un registro de Villagarzón, Putumayo (*J. Betancur 23306*), de ambientes similares a los de Ecuador.

**Fenología.** La mayoría de las colecciones con flor conocidas, son de la misma región y de marzo, con un registro de octubre (Colombia). El único material con fruto, proviene de una localidad a menor altitud (c. 1000 m) y es de febrero.

**Notas taxonómicas.** *Matisia archidonae* es una especie peculiar de los bosques pluviales premontanos de la vertiente amazónica de Ecuador y de Colombia, que se caracteriza por sus hojas coriáceas, llamativamente estrechas, de aspecto glabrescente, sus flores caulinares subterminales en las ramitas y las bractéolas subuladas reflexas, ubicadas en la parte inferior de la copa calicina. Se diferencia bien de algunas especies de *Matisia* sección *Calyculatae* que tampoco presentan alas en el cáliz, como *M.exalata* Alverson, *M. floccosa* Fern.Alonso o *M. leptandra* Cuatrec., en la siguiente combinación de caracteres: árboles medianos o grandes 18-30 m, hojas coriáceas, estrechamente lanceoladas o lanceolado-elípticas, flores generalmente dispuestas en una porción defoliada de ramas terminales, bractéolas insertas en la base de la copa calicina, estrechamente triangular-subuladas, rígidas y reflexas y el cáliz floral tubular-cónico o cónico-acampanado, externamente equinado-lepidoto.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA. **Departamento de Putumayo:** Municipio de Villagarzón, Vereda Alto Vides, 21 oct 2021 (fl), *J. Betancur et al. 23306* (COAH, COL, CUVC) (**Figura 3**).

ECUADOR. **Provincia de Napo:** Cantón de Archidona, Parque Nacional Sumaco, Napo-Galeras, bosque pluvial premontano (bp-P), suelo sobre roca calcárea, 1415 m, árbol 30 m, 10 mar 2003 (fl), *J. Cevallos 81* (F, QCNE, MA 964198, MO); ibídem, Cordillera Galeras, en la cumbre, bosque pluvial premontano (bp-P), suelo derivado de roca arenisca, 1690 m, árbol 18 m, 5 mar 2023 (fl), *D. Cuamacás 127* (QCA 179175, MA 964199, MO); ibídem, Cantón Gonzalo Pizarro, río Tigre, afluente del río Dashiño; carretera Lumbaquí-Reventador, km 73, estrato de roca sedimentaria, bosque pluvial premontano (bp-P), 900-1100 m, árbol 20 m, 21 feb 1987 (fr), *D. Neill 7657 & W. Palacios* (COL, F, QCNE 112530, MO 198099/A: 5296041).

**3. *Matisia esmeraldana*** Fern.Alonso, **sp. nov.** (**Figuras 4, 6S y 7S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322**)**

**TIPO:** ECUADOR. **Provincia de Esmeraldas**: Cantón San Lorenzo, Reserva étnica Awá, centro Guadualito, bosque húmedo tropical (bh-T), 1º15'N 78º40'W, 80 m, árbol 25 m, 20-29 jul 1992 (fl), *C. Aulestia 180 & G. Tipáz, L. Delgado, J. Lao* (holotipo: QCNE; isotipos: COL 458370, MO 198599/A:5339460).

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia pseudobracteolosa* Fern.Alonso, from which it is distinguished by having flowers opposite to the leaves, arranged in terminal branches (vs. flowers arranged in a subterminal defoliated area, in short terminal branches in *M. pseudobracteolosa*), floral pedicel with three unequal bracteoles where one of it is smaller, broadly lanceolate, 5-8 x 4 mm (vs. floral pedicel with three similar bracteoles, broadly ovate, 11-15 x 9-11 mm), and fruiting calyx with 5-10 slightly raised wings, c. 1.5 mm high, slightly sinuous (vs. fruiting calyx with 10 prominently raised wings, (4-)5-7 mm high, prominently sinuous).

**Árboles,** 12-25 m y 20-30 cm dap. **Ramas** terminales subcilíndricas, 5-12 mm de grosor, con corteza externa marrón-grisácea, glabrescente, generalmente rugosa en las partes inferiores, corteza interna marrón de c. 2 mm de grosor y leño rosado; entrenudos jóvenes 1-3 cm de longitud, estriados longitudinalmente, con indumento marrón ferrugíneo. **Yemas** terminales de aspecto ovoide apiculado, con 3-5 catáfilos erectos o erecto-patentes, crasos, anchamente triangular lanceolados, agudos en el ápice y convexos, 5-7 × 4-5 mm, con indumento muy corto, equinado, ferrugíneo, común a las yemas y estípulas. **Hojas** aparentemente agrupadas al final de las ramas; **estípulas** de aspecto craso, caducas o a veces presentes, lanceolado-incurvas, 4-5 × 3-4 mm; cicatrices estipulares lineares, notorias, transversales en las ramitas; **pecíolos** 10-22(-25) mm de longitud, 1,5-2 mm de grosor, con dos pulvínulos poco notorios, con indumento estrellado-equinado muy fino; **láminas** discóloras, verde oliváceo en el haz y marrón verdoso en el envés (en seco); subcartáceas, anchamente obovadas o a veces oblanceoladas, 21-25 × 9-13 cm, con base redondeada o raramente subcordada, acuminadas o apiculadas distalmente, acumen 12-20 × 15 mm; **venas basales** 3, impresas en el haz y muy resaltadas en el envés; con dos venas adicionales, basales submarginales, poco conspicuas, que llegan solo hasta el ¼ inferior de la lámina; vena media con 4 (-5) pares de **venas secundarias** ubicadas en la mitad superior de la lámina; venas de tercer orden paralelas entre si y perpendiculares a las venas primarias y secundarias; tanto las secundarias como las terciarias muy notorias y resaltadas por el envés; venas basales 2ª y 3ª con venación de segundo orden de tipo broquidódromo hacia la margen; venación de cuarto y quinto orden poligonal, reticulada, notoria en el envés; con **domacios** en el envés, de tipo barbado, hirsuto; en la confluencia de las tres venas basales y en la confluencia de las venas secundarias con la vena media; haz glabrescente, con **indumento** estrellado muy fino, disperso; envés con indumento estrellado en venas y equinado-estrellado, fino, disperso en la lámina. **Flores** opuestas a las hojas, aparentemente péndulas, dispuestas al final de ramas cortas

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

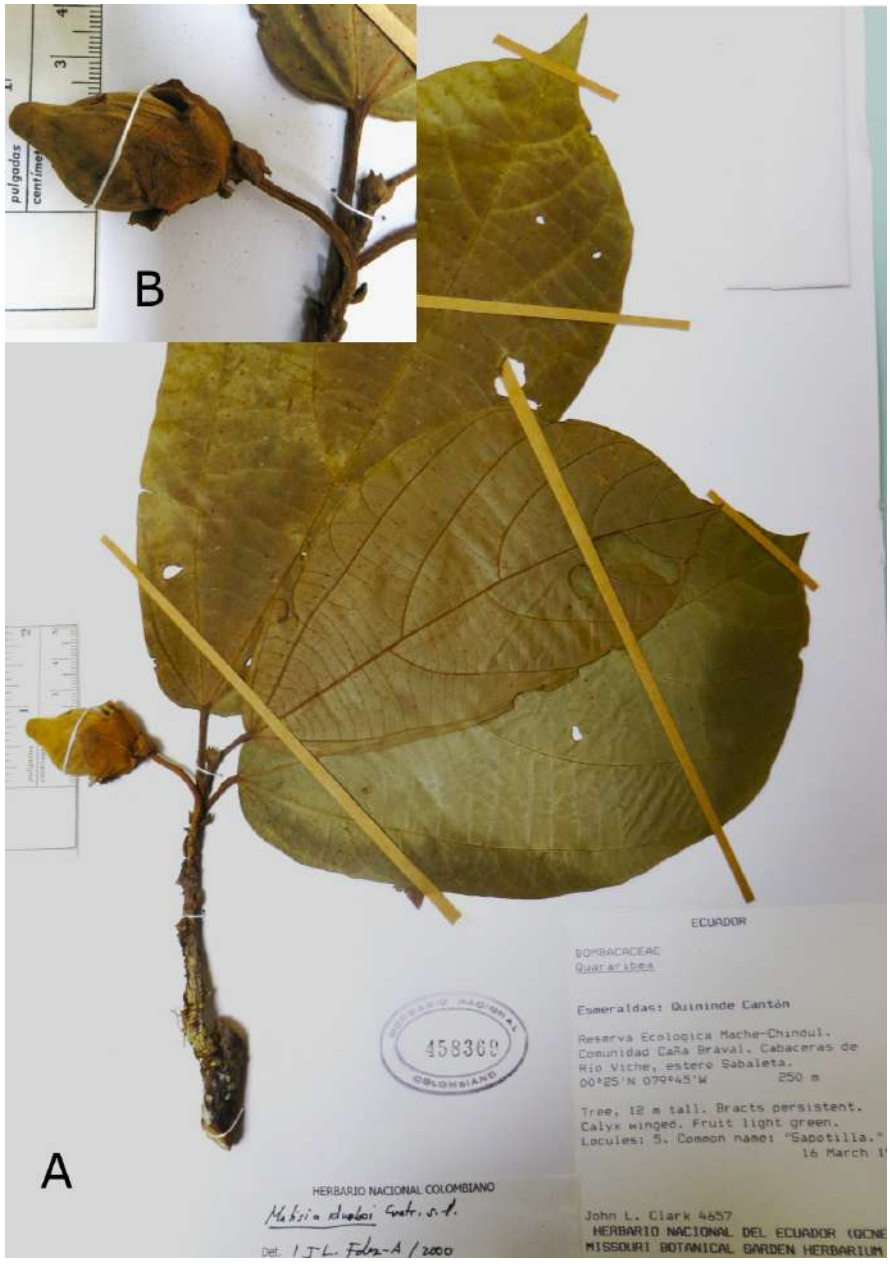



**Figura 4.** ***Matisia esmeraldana*** Fern.Alonso. **A.** De *Clark 4657,* fr (COL 458369). **B.** Detalle de la yema terminal y del fruto maduro acompañado del cáliz fructífero, en vista lateral.

terminales; **botón floral** joven con pedicelo arqueado reflexo, totalmente recubierto por las grandes bractéolas cordado auriculadas, marón ferrugíneas; **pedicelo floral** péndulo, 13-16 mm de longitud, 2 mm de grosor, con indumento muy corto, marrón ferrugíneo; con 3 **brácteolas** agrupadas en posición terminal, en la base del cáliz; bractéolas desiguales, generalmente dos muy amplias, anchamente triangular-auriculadas, 13-14 × 10 mm en su base y una reducida anchamente lanceolada, 5-8 × 4 mm; **cáliz** verde, subcilíndrico, ligeramente ensanchado en la zona distal, 15-16 mm de longitud, c. 10 mm de ancho en la zona distal; con 3-4 lóbulos anchamente triangulares, cortos, desiguales, 4-5 × 2-3 mm; con 10 alas longitudinales más o menos uniformes, no sinuosas, 1,5 mm de alto, que recorren el cáliz desde la base hasta el ápice, con indumento externo equinado-flocoso;

indumento interno blanquecino, seríceo, muy largo; **corola** blanca, patente o erecto-patente en la antesis, **pétalos** anchamente oblanceolados o espatulados, 22-24 mm de longitud, hasta 7-8 mm de ancho y redondeado obtusos en la zona distal; patente-reclinados en la antesis; con indumento estrellado amarillento en la cara externa, más o menos denso y glabros en la cara interna; **androceo** con **columna estaminal** blanca (en vivo), 25-30 mm de longitud, 2 mm de grosor, de aspecto glabrescente pero con indumento estrellado muy fino, amarillento; **ramas estaminales** 8-9 mm de longitud, glabrescentes, con 6 tecas/rama, alargadas, paralelas de a dos, tecas 2 × 0,8 mm, distribuidas a lo largo de la rama. **Estilo y estigma** no vistos. **Pedúnculo fructífero**, arqueado, aparentemente péndulo, 28-30 × 2 mm, con las bractéolas persistentes, patentes, muy anchas, 9-11 mm, cóncavo-arqueadas o a veces recurvadas y convexo-revolutas en la base del cáliz, generalmente 2 muy amplias y una más reducida; **cáliz fructífero** persistente acampanado-cupular, 16-19 × 27-30 mm, recubriendo el fruto en su 1/3 a 1/4 basal; irregularmente 4-5 lobado-rasgado en la parte distal, lóbulos anchamente triangulares, 5-10 × (10-)15-18 mm, con 5-10 alas poco notorias (c. 1,5 mm alto) ligeramente sinuosas, principalmente en la mitad distal; con indumento equinado-tuberculado. **Fruto** color marrón, ovoide apiculado o largamente apiculado rostrado, 35-39 × 20-23(-25) mm, con apículo llamativo, cilíndrico y truncado, 10-14 mm × 10 mm de ancho en la base y 6 mm en el ápice, mucronado; **exocarpo** marrón pálido, estrellado-lepidoto, con ligero brillo; **pirenos** no vistos.

**Etimología.** El nombre hace referencia a la provincia ecuatoriana de Esmeraldas, ubicadada en el corredor Pacífico, donde se recolectó este árbol.

**Nombres comunes y usos.** En Ecuador, Provincia de Esmeraldas, Cantón Quininde, "sapotilla" *Clark 4657* (COL, QCNE), y en San Lorenzo, "castaño" *Aulestia 1440* (QCNE). Esta misma denominación se recoge en *Alonso s.n*. (UDBC), en la región limítrofe de Nariño, Colombia, en el otro flanco de la cuenca del río Mira.

**Distribución y hábitat.** Distribuida en los remamentes de bosque muy húmedo tropical del litoral pacífico de Esmeraldas en Ecuador y en zonas cercanas de Nariño en Colombia (cuenca del río Mira), por debajo de los 600 m (**Gómez & al.**, 2017).

**Fenología.** En las colecciones de herbario hay registros de floración en julio y noviembre y de fructificación en febrero y junio.

**Notas taxonómicas.** Una de las colecciones citadas (*Clark 4657*) que proviene de la Cordillera de Mache Chindul, fué referida en el estudio publicado sobre la Flora de esta reserva (**Clark & al.**, 2006) como *Matisia idroboi* Cuatrec s.l., que fue la identificación tentativa que asignamos originalmente a esta especie. Se suma así *Matisia esmeraldana* al número creciente especies endémicas de la costa occidental de Ecuador, que en la citada publicación de 2006 se cifraba ya en 162 taxones, entre los que se encontraba otro representante de la tribu Matisieae descrito de esta región, *Quararibea casasecae* Fern. Alonso & Castrov. (**Fernández-Alonso & Castroviejo**, 2001). El escaso material conocido de Nariño en Colombia (tres colecciones, con botones florales y frutos inmaduros), aunque consideramos que morfológicamente se adscribe claramente a *M. esmeraldana*, no nos permite precisar su distribución en esta región de la costa colombiana, donde confluye con otras congéneres de aspecto similar en sus hojas, como es el caso de las especies de la sección *Longipedes*, *M. longipes* Little y una segunda especie aun no descrita (en prensa).

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA. **Departamento de Nariño**: Municipio de Tumaco, Iscuandé, (infértil) n.v.: castaño, 1994, *C. Alonso s.n.* (UDBC 9831); ibídem, Vía de Junín a Tumaco, Vereda La Guayacana, árbol 8 m, 29 jun 1951 (fr), *R. Romero-Castañeda 2970* (COL 103917); ibídem, Municipio de Iscuandé, Quebrada La Barrera, árbol 5 m, 29 nov 1955 (fl –botón-), *R. Romero-Castañeda 5516* (COL 65470).

ECUADOR. **Provincia de Esmeraldas:** Cantón San Lorenzo. Reserva étnica Awá, Centro Guadualito, bosque muy húmedo tropical (bmh-T), bosque primario, 1º15'N 78º40'O, 80 m, árbol 22 m, 29 jul 1992 (fr), *C. Aulestia et al. 63* (QCNE, MO 1442827/A:05003202, WIS 0100242); ibídem, Reserva étnica Awá, Parroquia Alto Tambo, Centro La Unión, Cañón del río Mira, 0º52'N 78º26'O, 250 m, bosque pluvial tropical (bp-T), bosque primario, árbol 10 m, 15 cm dap, n.v.: castaño, 22 feb 1993 (fr),

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

*C. Aulestia et al. 1440* (MO 1442826/ A:050032206, QCNE, WIS 0100154 (**Figura 7S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322)); ibidem, Cantón Quininde, Reserva Ecológica Mache-Chindul, comunidad Caña Brava, cabecera del río Viche, estero Sabaleta, 00º25'N, 79º45'O, 250 m, árbol 12 m, n.v.: sapotilla, 16 mar 1998 (fr), *J.L. Clark 4657* (COL 458369, MO 198097/ A:5296042, QCNE (**Figura 4**)).

**4. *Matisia huaoranica*** Fern.Alonso, **sp. nov.** (**Figuras 5, 8S y 9S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322)

**TIPO:** ECUADOR. **Provincia de Napo:** Sector Francisco de Orellana, Parque Nacional N. Yasuní, río Tiputini, al NO de la confluencia con el río Tivacuno; E de la carretera Repsol-YPF, km 32, sendero botánico de Guyero, 76º30´O, 0º38´S, 200-300 m, tierra firme con lomas de 30-50 m de arcilla roja, árbol 9 m, 27 mar 2002 (fr), *G. Villa 1411 & P. Álvia, A. Moscoso, M.R. Wentlock* (holotipo: QCA 21736; isotipo: COL 616657, 2 pl.).




**Figura 5.** ***Matisia huaoranica*** Fern.Alonso. **A.** Colección isotipo *Villa 1411* fr. (COL 616657). **B.** Detalle de los cálices fructíferos y del fruto desarrollado.

**Diagnosis**. This species is similar to *M. altoamazonica* Fern.Alonso, from which it is distinguished by having leaves with papery or subpapery blades, with the margin generally revolute (vs. membranous to subpapery blades, with the margin not revolute in *M. altoamazonica*), bracteoles broadly triangular, auriculate, 10-12 × 5 mm, inserted directly in the basal ¼ of the calyx (vs. bracteoles linear-lanceolate, 9-15 × 2-3(4) mm, in subterminal position on the pedicel), and calyx in fruit tubular-cylindrical, covering ¾ of the fruit, with 2-4 inconspicuous wings located in the distal third of the calyx (vs. calyx in fruit cupular, covering ½ to 1/3 of the fruit, with 10 sinuous wings along the calyx).

**Arbolitos o arbustos,** (2-)3-9 m, muy raramente hasta 15 m. **Ramas** terminales subcilíndricas, 3-6 mm de diámetro, con corteza marrón grisácea, generalmente con pliegues o fisuras longitudinales. **Yema terminal** con 4-5 catáfilos estipulares, estrechamente triangulares a subulados, 5-8 × 1,5 mm, incurvos o erecto-patentes, laxamente dispuestos, con indumento fino, fasciculado-equinado, rojizo ferrugíneo (en seco). **Hojas** dispuestas de modo dístico; **estípulas** estrechamente linear-lanceoladas, prontamente caducas; **pecíolo** grácil, 13-18(-20) × 1,5-2 mm, con pulvínulo proximal cónico, poco conspícuo y el distal cilíndrico muy marcado y engrosado, 4-8 × 2-2,5 mm, con indumento ferrugíneo, fasciculado-equinado; **láminas** verde oscuro, de aspecto frecuentemente lustroso, marrón o verde (en seco), cartáceas o subcartáceas, oblongo-elípticas, 6-14(-16) × 2,5-4(-5) cm, simétricas y más o menos redondeadas en la base, agudas o acuminadas en el ápice, acumen 5-8 × 4 mm; margen entero y recurvado (en seco); **venación** característica, generalmente con vena media y dos venas más basales de largo recorrido, amarillentas o amarillo-marrón en seco; con sólo 2-3 venas secundarias a cada lado de la vena media, localizadas en la mitad distal de la lámina, ligeramente impresas por el haz y resaltadas en el envés; venación terciaria perpendicular y paralela, venas de cuarto orden poligonales, poco visibles; láminas adultas glabrescentes por el **haz** con escasos pelos estrellados en los nervios principales, **envés** glabrescente, moderadamente lustroso, con indumento fino disperso. **Flores** dispuestas en las ramas jóvenes; **botones florales** opuestos a las hojas, solitarios, en posición terminal o subterminal en las ramas jóvenes, aparentemente erectos en las ramas, con bractéolas amplias, muy marcadas en la base del cáliz. **Pedicelo floral** 13-18 mm, de aspecto laxo, con dos bractéolas en posición distal en la base del cáliz y una aparentemente reducida; **bractéolas** anchamente lanceoladas, incurvo ascendentes, 10-12 × 5 mm en su zona media; pedicelo y bractéolas con fino indumento estrellado; **cáliz floral** tubular-acampanado, 13-15 × 6-7 mm, profunda e irregularmente rasgado en la zona distal; delimitando (2-)3 profundos lóbulos; **pétalos** blancos, erecto-patentes (al inicio de la antesis), anchamente espatulados en la mitad distal, redondeado obtusos en su ápice, 21-23 mm × 4 mm de ancho en la mitad distal, con indumento estrellado en su cara externa; **androceo** con columna estaminal rebasando ligeramente la longitud de los pétalos al inicio de la antesis, con **ramas estaminales** erecto-patentes, 6-7 mm de longitud; anteras estrechamente elipsoides, 1,5-2 mm de longitud. **Pedúnculo fructífero** largo, 15-25(-31) × 1,5 mm, con indumento flocoso; bractéolas persistentes y acrescentes ubicadas sobre la base del cáliz, anchamente triangulares, concavo incurvas y ligeramente auriculadas en la base, 5-8(-10) × 5-6 mm; **cáliz fructífero** tubular cilindrico, (13-)15-18 × 20-21 mm, recubriendo hasta ¾ del fruto (inmaduro) y c. ½ en la madurez, en la parte superior 3 lobulado o irregularmente rasgado-dividido, con lóbulos cortos; generalmente sin alas longitudinales, o con 2-3 alas inconspicuas reducidas al tercio distal en el cáliz; externamente con indumento fino ferrugíneo, fasciculado-equinado; internamente con indumento seríceo-acostado. **Fruto** propiamente dicho verde que se torna amarillo en la madurez, elipsoide o anchamente elipsoide, 20-25(-28) × 13-15(-19) mm, frecuentemente rostrado gradualmente, con prominencia central cilíndrica, 4-6 × 4-5 mm, epicarpio con indumento lepidoto marrón claro, brillante, con cinco pirenos.

**Etimología.** El nombre hace referencia al pueblo indígena huaorani o waorani que habita en el Oriente de Ecuador (**Fabre**, 2005) en la provincia de Napo, sector Francisco de Orellana, donde crece esta especie. En la zona del Parque N.N. Yasuní y territorios

aledaños, el pueblo huaorani ha consumido tradicionalmente los frutos (zapotillos) de este árbol al que denominan "vocamo", de acuerdo con algunos testimonios de especímenes de herbario (*Ríos 542*, QCA).

**Distribución y hábitat.** Especie propia de bosques primarios maduros de tierra firme, sobre sustratos arcillosos. Hasta donde se conoce esta especie que crece en el estrato de sotobosque, se encuentra restringida al Parque Nacional Yasuní y está indudablemente relacionada con las especies *Matisia altoamazonica* y *M. tarapacana*, tratadas y comentadas en este mismo trabajo.

**Fenología.** En las colecciones de herbario se han encontrado algunos registros de floración en agosto y diciembre y numerosos de fructificación a lo largo del año, entre marzo y diciembre.

**Nombres comunes y usos.** En el Yasuní, en el sector del río Capirón, recibe el nombre Huaorani de "vocamo" y su fruto es consumido por el hombre y diversos animales como las ardillas, chichicos (*Saguinus* Hoffmans.) y varizos (*Saimiri* Voigt.), de acuerdo con los informantes nativos citados en etiquetas de especímenes de herbario (*Rios 542*, QCA).

**Notas taxonómicas.** Esta especie se encuentra asociada al sotobosque de bosques maduros (primarios) de tierra firme, asentados en terreno plano en pequeñas colinas y lomas (menos de 100 m) sobre sustratos arcillosos (suelos rojos). Al igual que *Matisia tarapacana*, especie de los bosques inestables de terrazas inundables, *M. huaoranica* presenta hábito de arbusto o arbolito de 2-9 m (raramente más), con una floración muy precoz, lo que representa sin duda en cada caso, una estrategia adaptativa diferente a sus respectivos ambientes, como se comenta en al inicio del apartado de 'Resultados'.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** ECUADOR. **Provincia de Napo:** sector Francisco de Orellana; carretera y Oleoducto de Maxus, km 27, bosque muy húmedo tropical (bmh-T) primario, sobre suelo rojo inundable, 250 m, 27 jul 1993 (fr), árbol 8 m, *M. Aulestia 31* (MO, QCNE, WIS); ibídem, parcela permanente 10, bh-T primario en colinas de suelos rojos; 250 m, arbusto 4 m, 13 jul 1994 (fr), *M. Aulestia 2486* (MO, QCNE, WIS, (**Figura 8S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322)); ibídem, árbol 12 m, 10 cm dap, (fl, fr), 10 ago 1994, *M. Aulestia 2638* (MO, QCNE, WIS); ibídem, 10 sep 1994 (fr), arbolito 4 m, *M. Aulestia 2718* (MO, QCNE, WIS 0100126); Lagunas de Cabuyeno, bosque primario en terrenos elevados, 300 m, árbol 6 m, 25 ago 1981 (fr), *J. Brandbyge et al. 36115* (AAU, QCA, WIS); ibidem, carretera Pompeya Sur-Iro, P.N.N. Yasuní, junto a la Estación Ci. Monit. Fauna Onkone Gare, bosque primario, bh-T lluvioso de tierra firme, 200-300 m, 30 jun 1994 (fr), árbol 9 m, *X. Buitron et al. 874* (QCA 21731); La Joya de Los Sachas, Comunidad Indimllamán, río Indillama, bh-T primario, colinas de suelo rojo, 250 m, árbol 15 m, 20 cm dap, 28 ene 1993 (fr), *A. Grijalva et al. 375* (MO, QCNE, WIS 0100125); ibidem, Cantón La Joya de los Sachas, Pompeya, carretera a Maxus, km 3,9-5,2, bh-T primario, 250 m, arbolito 5 m, 15 dic 1992 (fl, fr), *E. Gudiño et al. 2192* (COL 459119, QNE, MO, WIS 0100130); ibidem, Sector Orellana, Parque N.N. Yasuní, carretera Pompeya Sur-Iro, 250-300 m, bh-T primario, árbol, 28 may 1997 (fr), *M. Macia et al. 610* (QCA 217324); ibidem, Cantón La Joya de los Sachas, Parque N.N. Yasuní, km 14-15 vía Maxus pipeline, bosque maduro de tierra firme, en terreno plano, 250 m, árbol, sep 1997 (fr), *N. Pitman 1766 & T. Delinks* (MO, QCA 21732, QCNE); ibídem, carretera Pompeya Sur-Iro, P.N. Yasuní, Puente del río Capirón, 250 m, bh-T primario de tierra firme, arbolito 2 m, n.v. Waorani: "vocamo", comestible, 12 sep 1994 (fr), *M. Ríos 542* (QCA 21734).

**5. *Matisia oibae*** Fern. Alonso, **sp. nov.** (**Figuras 6 y 10S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322)

**TIPO:** COLOMBIA**. Departamento de Santander**: Cuenca del río Suárez, Municipio de Oiba, vereda El Platanillo, 06º09'N 72º22'O 1872 m, arbolito, 3 may 2011 (fr), *H. Bermúdez 101* (holotipo: COL 557251; isotipo: MA 964089).

**Diagnosis.** The species is similar to *M. floccosa* Fern.Alonso, from which is distinghuished by having narrowly oblanceolate to oblanceolate-oblong leaf blades, rounded at the base (vs. obovate-lanceolate blades, rounded-subcordate at the base in *M.*




**Figura 6.** ***Matisia oibae*** Fern.Alonso. **A.** Colección tipo *Bermúdez 101* fr. (COL, MA). **B.** Detalle de un botón floral y bractéolas (COL). **C.** Detalle de un fruto con el cáliz fructífero (COL).

*floccosa*), floral pedicel 13-16 mm long with bracteoles 15-18 × 3 mm in distal position (vs. floral pedicel 8-10 mm long with bracteoles 6-9 × 1.5-2 mm in subterminal position), floral calyx 11-13 × 4 mm (vs. floral calyx 22-24 × 8-9 mm), androceum with thecae 1.8 × 0.5 mm (vs. androceum with thecae 2-3.5 × 1 mm), and fruiting peduncle (30-)35-45 mm long (vs. fruiting peduncle 16-19 mm long).

**Arbolitos** o árboles hasta de 12-15 m, ramificados desde los 2-2,5 m. **Ramas** rugoso-nodosas, tuberculadas, con corteza grisácea y blanquecina; ramitas terminales marrón oscuro con estrías o pliegues longitudinales (en seco), subcilíndricas, 4-6 mm de diámetro; entrenudos en zig-zag, (15-)20-30(-35) mm de longitud; ápice de las ramas y yemas ferrugíneo-marrones, recubiertas por tricomas fasciculados, alargados o globosos, de radios muy largos. **Yemas** terminales estrechamente cónicas u ovoide-cónicas, a veces arqueado-falcadas; con 3-4 catáfilos subcoriáceos, estrechamente triangulares, gradualmente acuminados, 6-9 × 2,5-3 mm, densamente cubiertos de indumento rojizo,

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

fasciculado-equinado, enmarañado o flocoso, de pelos cortos y largos entremezclados. **Hojas** en posición dística, regularmente distribuidas en las partes terminales de las ramas; con dos **estípulas**, muy prontamente caducas, 5-6 mm de longitud, linear-lanceoladas, densamente cubiertas de indumento ferrugíneo, fasciculado; cicatrices estipulares notorias, lineares, perpendiculares al pecíolo; **pecíolo** 15-20 mm de longitud, 1,5-2 mm de diámetro; con indumento marrón ferrugíneo, largamente fasciculado-equinado, flocoso, del mismo tipo que en las yemas y ramas jóvenes; pulvínulos dos, muy poco conspícuos (en seco) y enmascarados por el indumento; **láminas** discóloras, haz verde oscuro, envés verde pálido (en seco); membranosas o membranoso-cartáceas; láminas estrechamente oblanceoladas a oblanceoladas, (13-)15-21 × 4-6(-7) cm, con base cuneado o cuneado-redondeada, más o menos equiláteras, sin senos basales manifiestos; ápice gradualmente adelgazado apiculado, apículo triangular, c. 10-16 × 10 mm de longitud; margen entero, a veces ligeramente sinuoso; haz de aspecto áspero, con indumento fasciculado o fasciculado-estrellado, flocoso, ligeramente más denso en los nervios principales y uniformemente distribuido en el resto de la lámina; envés con indumento rojizo muy denso estrellado-fasciculado de radios largos (especialmente en los nervios), que se desprende con facilidad al tacto (flocoso) y otro estrellado blanquecino más corto, disperso; **nervios** basales generalmente 3, -el central más desarrollado- de largo recorrido, marcados en el envés y 2(-3) nervios submarginales poco conspícuos; nervios secundarios 3(4) a cada lado del nervio medio, ubicados en la mitad o el tercio superior de la lámina, con escaso desarrollo y conniventes cerca del margen, donde la venación es regularmente arqueado broquidódroma; **nervios terciarios** dispuestos de forma paralela, estrechamente, poco resaltados en el haz y manifiestos en el envés; nervios cuaternarios formando un retículo poligonal, escasamente prominentes por el envés; **haz** glabrescente con indumento muy fino estrellado o estrellado-fasciculado disperso; envés con indumento estrellado de pocos radios en las venas y equinado-fasciculado en venas y lámina. **Flores** opuestas a las hojas, al final de ramas cortas; zigomorfas en su corola, con uno de los pétalos flexionado hacia abajo y los otros cuatro patentes y curvados hacia arriba, en la misma posición que las ramas estaminales; androceo con columna estaminal flexionado-ascendente en su mitad distal; botón floral, pedicelo, bractéolas y cáliz con indumento ferrugíneo equinado; **botón floral** ovoide-elipsoide obtuso, con denso indumento ferrugíneo fasciculado-flocoso, pedicelo joven c. 10-12 × 1,5 mm de diámetro, muy densamente fasciculado-equinado, flocoso, con 3 bractéolas distales verticiladas, que rodean la base del cáliz a modo de calículo, arqueado-incurvas, subiguales, estrechamente lanceoladas, 8-10 × 3 mm. **Pedicelo floral** rígido, recto, gradualmente engrosado, 13-16 mm, 2-3 mm de grosor en su parte distal, con denso indumento fasciculado flocoso y también indumento equinado más corto, disperso, amarillento; con tres **bractéolas** verticiladas ubicadas en la base del cáliz, erectas, linear-lanceoladas, subuladas, apiculadas, 15-18 × 3 mm, con indumento fino equinado; **cáliz** tubular, 11-13 × c. 4 mm, rematado en 4-5 dientes triangular agudos, bien delimitados, 3-4 × 2 mm, dientes con vena media dorsal resaltada longitudinalmente; **corola** con cinco pétalos, al inicio de la antesis por lo general con cuatro de ellos cóncavos y suberectos, encerrando al androceo y uno quinto recurvado; al final de la antesis pétalos recurvado flexionados (con la columna estaminal expuesta y arqueado-ascendente), pétalos anchamente espatulados, 27-32 mm de longitud, 1,5-2 mm de ancho en su mitad basal y 4-6 mm en su zona distal; glabrescentes y con brillo en la cara interna y con pubescencia dispersa en la cara externa, de pelos estrellado-fasciculados de radios largos; **androceo** con columna estaminal blanca (en vivo), al final de la antesis arqueado-ascendente, 34-36 mm × 0,8-1 mm, glabrescente, con pelos gruesos, dispersos en el tercio distal; **ramas estaminales** al inicio de la antesis erecto-patentes, blancas; al final patente-reclinadas y marrones, 6-7 mm de longitud, con indumento harinoso muy fino; con 4 pares de anteras por rama estaminal (40 total); tecas marrón claro, estrechamente elíptico-oblongas, 1,8 × 0,5 mm, tempranamente dehiscentes; **estilo** 42-46 × 1 mm, con indumento estrellado blanco y denso, de radios largos; **estigma** capitado, blanquecino, discoide, hemisférico, leve e irregularmente lobado. **Pedúnculo fructífero** (30-)35-

40(45) mm de longitud, 2 mm de diámetro, salvo en la parte distal (hasta de 3-3,5 mm de diámetro), con indumento ferrugíneo fasciculado flocoso; con cicatrices de abscisión de las **bractéolas** o conservando alguna de éstas, bractéolas acrescentes, 12-15 × 3 mm, linear-lanceoladas, estriadas longitudinalmente. **Cáliz fructífero** cupular-acampanado, acrescente, 20-25 × 18-20 mm, recubriendo al fruto en su mitad basal; desigualmente rasgado en 4-6 lóbulos generalmente obtusos, hasta de 4-6 mm de alto; externamente áspero al tacto, tuberculado-flocoso, dispersamente ferrugíneo, con indumento interno seríceo, acostado, de pelos blanquecinos largos, c. 2 mm de longitud. **Fruto** propiamente dicho, marrón (en vivo), 30 × 18-20 mm, estrechamente fusiforme, 5-costado, apiculado truncado (en seco), con rostro o apículo marcado, 5-8 × 5-6 mm; superficie externa marrón pálido, finamente estriado-reticulada (en seco), densamente cubierta por pelos estrellado acostado de aspecto seríceo; de 5 carpelos; **pirenos** y semilla no vistos.

**Etimología.** El nombre rememora al municipio de Oiba (Departamento de Santander, Colombia), la primera localidad conocida donde crece esta especie de zapotillo. El nombre Oiba tiene su orígen en uno de los topónimos del teritorio del pueblo indígena Guane que habitó principalemente en las cuencas de los ríos Suárez, Chicamocha y Fonce, en la Cordillera Oriental de Colombia (**Tarazona & al.,** 2017).

**Distribución y hábitat.** Conocida solo de los remanentes de bosque subandino, en la cota de los 1800 m, de la region de Oiba, en la vertiente occidental de la cordillera Oriental de Colombia y más recientemente de la región de Chucurí. La localidad típìca (Oiba) se ubica en la cuenca del río Suárez, que vierte al río Magdalena, en Colombia, territorio actualmente muy transformado por la frontera agrícola y ganadera (**Díaz-Pérez**, 2012).

**Fenología.** Las dos muestras conocidas, presentaban flores en mayo y junio y frutos en junio.

**Nombres comunes y usos.** Registrado el nombre "zapote" para esta especie, en la región de Carmen de Chucurí (*Quiroga-Nova 132*).

**Notas taxonómicas.** La especie se adscribe claramente a la sección *Calyculatae* por sus bractéolas verticiladas dispuestas en posición distal en la base del cáliz. Dentro de la sección presenta una relación clara con *M. floccosa* Fern.Alonso de los bosques bajos tropicales y subandinos de la vertiente occidental de la cordillera Occidental de Colombia (**Fernández-Alonso**, 1992, 2001a). No obstante, se diferencia bien de *M. floccosa*, en los pedicelos florales y fructíferos más largos de *M. oibae*, el cáliz floral de menor tamaño (11-13 x 4 mm) y en el androceo con tecas más reducidas (1,8 x 0,5 mm) en *M. oibae*, además de los caracteres foliares ya indicados en la diagnosis.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA**. Departamento de Santander**: Municipio de Carmen de Chucurí, vereda Puerto Amor, borde de carretera, junto a cultivo de cacao, 500 m, árbol 14 m, 35 cm dap, n.v. "zapote", 12 jun 2024 (fl), *J. Quiroga-Nova et al. 132* (COL, MA 965417 (**Figura 10S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322).

**6. *Matisia oritolumbaquina*** Fern. Alonso, **sp. nov.** (**Figuras 7, 11S-13S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322)

**TIPO:** COLOMBIA. **Departamento de Putumayo:** Municipio de Orito, vereda El Líbano, sector Lusón, bosque abierto con árboles de hasta 27 m, 697 m, árbol 21 m,
22 dic 2021 (fr), *N. Marín 7074 & C. Castro, O. Ortega, E. Quintero, D. García* (holotipo: COAH 117223).

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia archidonae* Fern. Alonso, from which it is distinguished by having subchartaceous oblanceolate leaf blades (vs. leathery, narrowly oblong-elliptical blades in *M.archidonae*), numerous cauline flowers, usually grouped in more than 2, on short brachyblasts (vs. 1-2 flowers opposite the leaves, on short terminal branches), verticillate bracteoles arranged next to the calyx, broadly triangular and short (vs. subverticillate bracteoles, arranged at the base of the calyx cup, narrowly triangular subulate), and calyx 10-12 × c. 4 mm (vs. calyx 15-17 × 5-7 mm).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

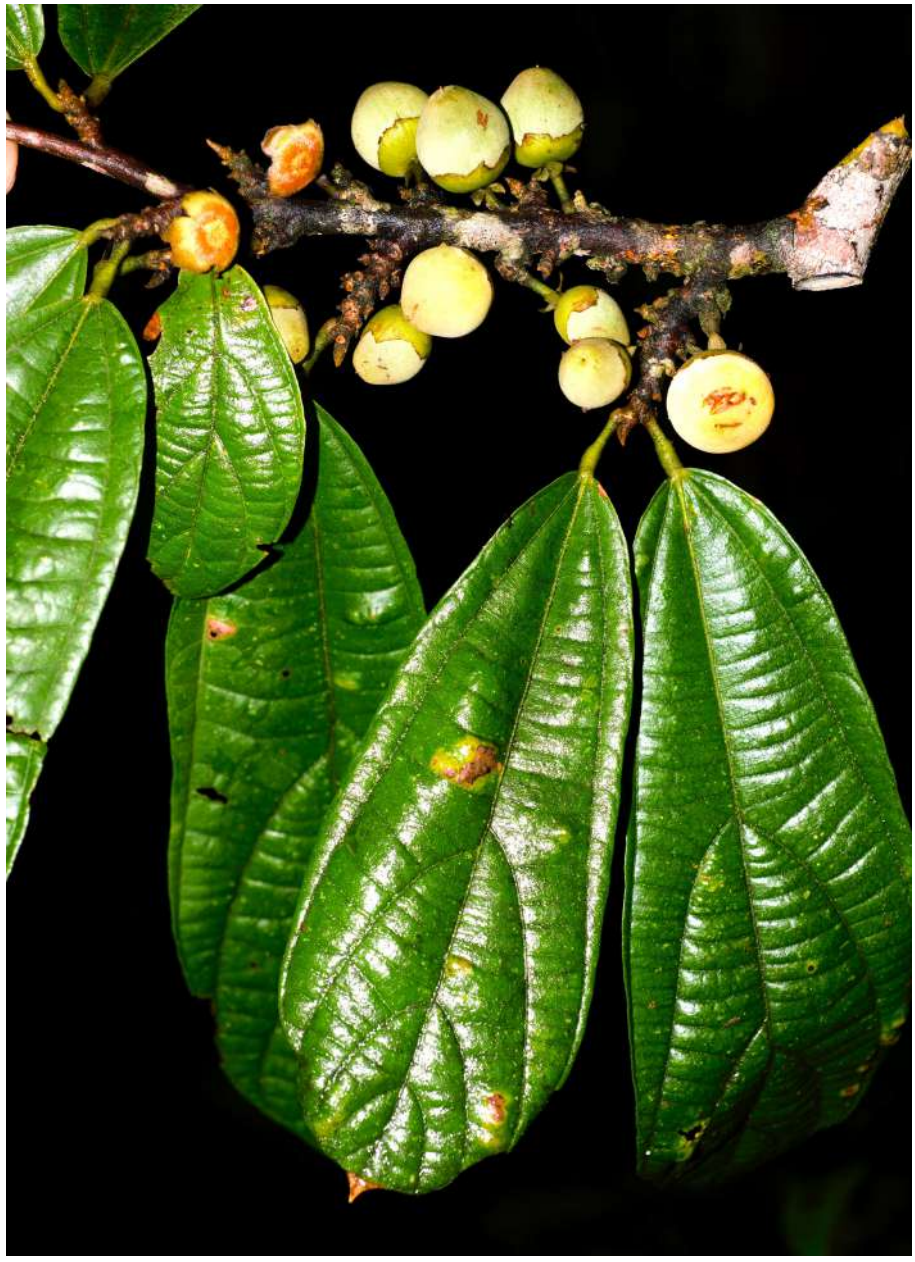


**Figura 7.** ***Matisia oritolumbaquina*** Fern.Alonso. Fotografia de campo correspondiente a la coleccion holotipo *Marín 7074* (COAH). [Fotografía de Cristian Castro].

**Árboles** 15-30(-35) m y hasta 50-60 cm dap; **ramificación** verticilada y dispuesta de modo horizontal o a veces péndulo. Corteza externa marrón pálido, cuarteada y la interna amarilla, arenoso-granular al tacto; generalmente con numerosas ramitas cortas ubicadas en las zonas subterminales de las ramas jóvenes (**Figura 7 y Figura 12S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322). **Ramas** jóvenes terminales finamente pubescentes, con pelos estrellados. **Yemas** terminales oscuras, cónico-alargadas, 4-5 × 2-3 mm, con catáfilos 3-5 mm de longitud. **Hojas** alternas, dísticas en las ramas; **estípulas** prontamente caducas, triangular-lanceoladas, muy pequeñas, 3-4 × 2 mm; **pecíolo** 10-22 mm de longitud, 2 mm de grosor; pulvínulos diferenciados, el proximal más engrosado, a menudo marrón-grisáceos; láminas cartáceas a subcoriáceas, haz verde

brillante, envés verde oscuro, 15-30(-35) × 4,5-9(-11,5) cm; estrechamente oblanceoladas, ápice obtuso o cortamente cuspidado, base redonda a ligeramente cordada; ásperas en ambas superficies por la presencia de pelos estrellados diminutos. **Flores** aromáticas, caulinares, asociadas a cortos braquiblastos; numerosas y agrupadas de 2-5(-7) por debajo de las hojas terminales, erectas o erecto-ascendentes en las ramas; **pedicelo floral** 9-12 mm de longitud, con 3 **bractéolas** distales, agrupadas en amplio calículo junto a la base del cáliz; bractéolas 3-5 mm × 2-3 mm, anchas y cortas, triangular-lanceoladas; **cáliz** verde, tubular, 9-12 × 4 mm, con 3(4) dientes distales cortos, anchamente triangulares, apiculados, 2-3 × 3-4 mm, con 5 costas o alas longitudinales diferenciadas o a veces ausentes, con pubescencia fina en la cara externa y pelos seríceos acostados en la cara interna; **corola** blanco-amarillenta, pétalos de 25(30) mm × 2-3 mm en la mitad distal, subobtusa en el extremo distal, densamente pubescente serícea en la cara externa; **androceo** con tubo estaminal c. 25 mm de longitud, con cinco ramas estaminales 7-8 mm de longitud, con varias anteras más o menos agrupadas en cada una y también en la base de las ramas; anteras c. 1,5 mm de longitud. **Estilo** c. 30 mm de longitud, blanco pubescente con estigma capitado oscuro, 1,5-2 mm de diámetro. **Pedúnculo fructífero** recto, 11-14 mm, con las bractéolas ligeramente acrescentes en posición distal, patente-recurvadas; **cáliz fructífero** verdoso, que recubre de 1/3 a 1/2 el fruto, o a veces cáliz cortado circuncísil, recubriendo sólo 1/3; a menudo con alas longitudinales poco resaltadas. **Fruto** verde grisáceo, en la madurez blanco-amarillento, de globoso a anchamente ovoide, comprimido distalmente y apiculado, hasta de 20-22 × 1,5 cm, apículo c. 3 × 4 mm; exocarpo con pelos diminutos fasciculado-lepidotos; mesocarpo fibroso carnoso, cremoso; con cinco **pirenos** fusiforme-triquetros, c. 18 × 8 mm.

**Etimología.** El nombre compuesto hace referencia a la localidad tipo Orito, en departamento de Putumayo, Colombia, y a otra igualmente representativa para la distribución de esta especie, Lumbaqui en Ecuador, en la provincia de Napo.

**Distribución y hábitat.** Especie del piedemonte amazónico de Colombia (Putumayo) y Ecuador (Morona-Santiago, Napo, Pastaza, Sucumbíos). Asociada a los bosques húmedos de tierra firme, en zonas bajas y del piedemonte, entre los 250 y 950 m, frecuentemente en relieve de colinas, sobre suelos rojos arcillosos.

**Fenología**. Hay registros de floración en la mayoría de los meses del año, aunque la presencia de frutos parece ser más frecuente entre julio y enero.

**Nombres comunes y usos.** Se conocen dos denominaciones, usuales en varias especies de los géneros *Matisia* y *Quararibea*. Una, "molinillo" en Ecuador, Lumbaqui (*Pennington 12298*); otra, "zapotillo", en Colombia, Putumayo, Orito, (*Montoya 1752*). Tambien se recoge el nombre quechua "puskalan" en Sucumbíos, Ecuador.

**Notas taxonómicas.** Hemos asignado también a esta especie las colecciones referidas al nombre no válidamente publicado *Quararibea penningtoni* ined. (*Pennington 12255, 12259, 12298 y Pitman 1465*), asociado a colecciones de la región de Lumbaqui (**Neill & Palacios**, 1989**, Alvear**, 2020). Este material que guarda similitud con el material de Colombia seleccionado como tipo, no ha podido ser analizado en detalle. Ocasionalmente, en la región de Pastaza, Ecuador, se presentan árboles con alas uniformemente desarrolladas en el cáliz (*Zac 5058*), plantas que pueden representar algun tipo de introgresión o transición con la especie de zonas bajas *M. idroboi*, plantas que, al no disponer de mayor información, no hemos asignado a *M. oritolumbaquina*.

Incluimos aquí un nuevo registro de el departamento de Putumayo, Municipio de Orito, basado en fotografías del árbol con flor y con fruto, que hemos identificado claramente con la especie aquí descrita, *M. orito-lumbaquina*. Provienen de la Comuna río Guamúes – río Sucio, Reserva Natural La Isla Escondida, 800-900 m, (fr) *J. Beckers* [fotografías, Naturalist https://www.inaturalist.org/observations/262615998]; ibidem, (fl), 16 nov 2025 *J. Beckers* [fotografías, Naturalist https://www.inaturalist.org/observations/326838991].

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA. **Departamento de Putumayo**: municipio de Orito, vereda El Líbano, bosque con dosel hasta 35 m, 921 m, arbusto 5 m (infértil), 28 jul 2019, *D. Cárdenas 51357 et al.* (COAH 106343); ibídem,

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

Municipio de Orito, Gran Jardín de la Sierra, camino hacia el Cerro Soplín, en planicie, 972 m, bmh-PM, interior de bosque primario, árbol 14 m, (infértil), n.v.: zapotillo, 13 ene 2014, *M. Montoya 1752 et al.* (COAH 86604).

ECUADOR. **Provincia de Morona-Santiago:** pozo petrolero Garza (TENNECO), 35 km al NE de Montalvo, bh-T primario, en lomas de suelo rojo, 260 m, árbol 20-25 m, 12 jul 1989 (fr), *V. Zak et al. 4503* (MO 1442831/A: 05065622, WIS). **Provincia de Napo:** río Cuyabeno, 1,5 km de Puerto Bolivar, bosque primario, 300 m, árbol 15 m, 19 ago 1981 (fr), *J. Brandbyge et al. 33771* (AAU, QCA, US 3631730/cb 01221591); ibídem, Cantón Tena, Estación biológica Jatum Sacha, bmh-T, bosque primario y potrero, 450 m, árbol 15 m, 24 ago 1988 (fl), *C. Cerón et al. 4536* (COL 455418, QCA, MO 198636/ A:5339463); ibídem, árbol 15 m, 24 ago 1988 (fl), *C. Cerón et al. 4646* (COL 455419, QCA, MO 198611/ A:5339437); ibídem, bosque disturbado y potreros, árbol 15 m, 24 ago 1988 (fl), *C. Cerón et al. 4660* (COL 455420, QCA, MO 198616/ A:5339432); ibídem, carretera Coca-Loreto, entre la Comuna 10 de Agosto y el río Pinguillo, bmh-P, 1000 m, árbol 10 m 20 oct 1988 (fl), *C. Cerón 5309 & C. Iguago* (COL, QCA, MO 198617/ A: 5339431); ibídem, carretera Coca-Loreto, entre la Comuna 10 de Agosto y el río Pinguillo, bmh-P, 1000 m, árbol 10 m17 nov 1988 (fl), *C. Cerón 5605 & C. Iguago* (COL 455402, QCA, MO 198604/ A: 5339455); ibídem, 8 km al E de Mishahualli, bmh-T, 400 m, árbol 8 m, 31 ene 1989 (fr), *C. Cerón 6026* (COL, QCA, MO 198603/ A: 5339456); ibídem, Cantón Orellana, Parque Nacional Yasuni, Carretera de Maxus, km 53-60, bh-T, primario, 230 m, árbol 15 m, 6 oct 1993 (fr), *A. Dick 704* (MO, QCNE, WIS 0100288); ibídem, Cantón Orellana. Sector Huashito, 20 km al N de Coca, propiedad de Palmoriente, bh-T, bosque primario en terreno plano, suelo negro fértil, 250 m, árbol 30-35 m, 21 nov 1989 (fr), *S. Espinoza 45* (COL 455413, MO, QCA, WIS 0100217); ibídem, La Joya de Los Sachas, Comunidad Indillamam, Carretera Maxus km 5-6, bh-T primario, en colinas de suelo rojo, 250 m, árbol, 28 ene 1993 (fr), *A. Grijalva et al. 419* (ECUAMZ, F, MO 1442852/ A:05014988, QCNE, WIS 0100234); ibídem, Cantón Orellana. Sector Huashito, 20 km al N de Coca, bmh-T, bosque primario, 250 m, árbol 17 m, 21 nov 1989 (fr), *E. Gudiño 99 et al.* (COL 455415, MO 198424/ A:5289527; QCA); ibídem, km 23,4 en la carretera a campos petroliferos de Yuca, carretera a Auca, bh-T primario, 400-450 m, árbol 20 m, 11 feb 1991 (fl), *B.B. Klitgaard et al. 99437* (AAU 99433, QCA 21712, (**Figura 13S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322)); ibídem, 15 km al Sur de Coca, vía de Los Aucas, bh-T sobre suelo rojo laterítico, 250 m, árbol 25 m, del dosel, 21 abr 1985 (fl), *D. Neill 6369 et al.* (ECUAMZ 6026, MO 1442818/ A: 04970356, NY, QCNE, WIS); Reserva Biológica Jatum Sacha, río Napo, 8 km abajo de Misahualli, bmh-T, en colinas con suelo rojo arcilloso, bosque primario, 450 m, árbol 20 m, del subdosel, 2 oct 1986 (fr), *D. Neill 7370 et al.* (COL, QCA, MO 2044248/ A:6025743, US 3287842/ cb1221585); ibídem, 8 km abajo de Misahualli, bmh-T, en colinas, bosque primario, 450 m, árbol 20 m, 10 dic 1986 (fr), *D. Neill 7544 et al.* (COL, QCA 217134, MO 2056853/ A:6024779); ibídem, Estación Biológica Jatum Sacha, río Napo, 8 km abajo de Misahualli, bmh-T, en colinas con suelo rojo arcilloso, bosque primario, 450 m, árbol 20 m, 21 oct 1989 (fr), *W. Palacios et al. 4683* (COL 455414, QCA, MO 198087/ A:5296264); ibídem, Joya de Los Sachas, Parque N.N. Yasuní, 14-15 Km de Maxus, E de la finca Juan Tapuy, bosque maduro de tierra firme, en plano, 250 m, árbol  ago 1997 (fl), *N. Pitman et al. 1465* (MO, QCNE); ibídem, 8 km al E de Misahualli, 400-450 m, bmh-T, árbol 12 m (estéril), 1 may 2003, *J. Santiana 102* (COL, QCA); ibídem, Estación Biológica Jatum Sacha, bmh-T, bosque primario en colinas, 400 m, árbol 18 m  9 oct 1992 (fl.-botón-), *J. Zuleta 8* (COL 455400, QCNE, MO 198428/ A:5289253); ibidem, bmh-T, bosque primario en colinas, 400 m, árbol 10 m, 27 nov 1992 (fl), *J. Zuleta 47* (COL, QCNE, MO 198438/ A:5339493). **Provincia de Pastaza:** vía a Auca, 115 km al S de Coca, 10 km al sur de la divisoria Napo-Pastaza, Cerca del río Tiguiño, carretera de Petro-Canadá, bh-T, primario, lomas de suelo rojo, 320 m, árbol 10 m, 31 ene 1989 (fr), *H. Hurtado 1475 & D. Neil* (COL 455415 (**Figura 13S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/

view/3318/5322), QCNE, MO 198436/ A:5339495); Comunidad Bataboro, ubicada al S de la vía Auca, bosques cerca de la zona de la comunidad, bosque primario de tierra firme, Territorio Huaorani, 282 m, árbol 15 m, muy aromático, 1 oct 2001 (fl), *H. Mogollón 1353* (COL, QCNE, U 0124970); ibídem, Vía Auca, 115 km al S de Coca, cerca del río Tiquino, bh-T de colinas bajas, bosque primario, 320 m, árbol 20 m, 26 ene 1989 (fr), *D. Neill 8767 & F. Hurtado* (COL, ECUAMZ 6024, MO 198421/ A:5289260, QCNE); ibídem, Lumbaqui, 600 m, bosque mixto en pendientes escasamente drenadas, árbol 25 m (estéril), n.v.: molinillo*, 7* may 1987, *T.D. Pennington et al. 12220* (K, U 0124969); ibídem, Lumbaqui, 600 m, bosque mixto en pendientes, árbol 15 m, n.v.: molinillo, 13 may 1987 (fr), *T.D. Pennington et al. 12255* (COL 455415, QCA, QCNE, U 0124970); ibídem, bosque en terrenos mal drenados, árbol 15 m, 14 may 1987 (fl-botón-), *T.D. Pennington et al. 12259* (K, QCA, COL, QCNE, U 0124967); ibídem, Lumbaqui, 600 m, bosque mixto en pendientes, árbol 25 m, 25 may 1987 (fl), *T.D. Pennington et al. 12298* (K 000601247, QCA, QCNE, U 0124968). **Provincia de Sucumbíos:** 10 km al N de Lago Agrio, carretera del río San Miguel, bmh-T, árbol 15 m, n.v.: puskalan [quichua], 24 jun 1976 (fl), *O.D. Oldeman 413 [41B]* (QCA 162364).

**7. *Matisia pseudobracteolosa*** Fern.Alonso, **sp. nov**. (**Figuras 8, 14S-16S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322)

**TIPO.** PERÚ. **Departamento de Amazonas**: Provincia Condorcanqui, Distrito El Cenepa, Comunidad de Mamayaque, río Cenepa, Quebrada Saasa, bosque primario sobre colinas, 4º31'S 78º11'O, 300 m, árbol 7 m, 26 ene 1997 (fr), *R. Vásquez 22277 & R. Rojas, A. Peña, E. Chávez, E. Quiaco* (holotipo: MO 2025918/A: 6077466; isotipos: COL 477954, MOL)

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia bracteolosa* Ducke, from which is distinguished by having leaves with narrowly oblong to narrowly oblanceolate blades (vs. obovate or broadly oblanceolate blades in *M. bracteolosa*), subterminal epicalyx on the pedicel, very broad and partially fused at its base (vs. whorled bracteoles, located exactly at the base of the calyx, not fused to each other), calyx in fruit broadly cup-shaped, 20-25 × 45-50 mm, with 10 sinuous wings, wavy-scalloped at the margin (vs. calyx in fruit rigid, cup-shaped, 20-26 × 30-35 mm; with five firm wings, generally broad at the margin), and fruit narrowly ovoid or narrowly oblong-ellipsoid, 35-40 × 18-28(-30) mm (vs. fruit broadly ovoid or sub-spherical, compressed at the apex, 26-36 × 25-36 mm).

**Árboles** (7-)10-20 m de alto. **Ramas** subterminales, marrón rojizo oscuro, o marrón-grisáceo, con pliegues longitudinales, rugosidades y numerosas lenticelas pálidas, 6-10(-13) mm de diámetro, corteza de 2 mm de grosor y leño rosado-crema 8-10 mm de grosor; **ramitas terminales** 10-20 cm de longitud y 3-5 mm de diámetro, con entrenudos 15-30 mm y escasas hojas, con indumento tomentoso-flocoso, estrellado de radios largos. **Yema** terminal anchamente ovoide-cónica, aguda distalmente, 6-9(-11) × 4-6 mm; con catáfilos estipulares marrones, adpresos, oval-lanceolados, 4-7 mm de longitud y 3-4 mm de ancho, con aspecto seríceo o tomentoso e indumento estrellado-equinado o a veces estrellado-fasciculado largo. **Hojas** generalmente dísticas en las ramas; **estípulas** prontamente caducas, oval-lanceoladas, convexas dorsalmente, c. 6-8 × 3 mm, con indumento denso estrellado-tomentoso o a veces flocoso; **rastros estipulares** notorios en las ramitas, perpendiculares o ligeramente oblicuos con respecto al eje de la rama; **pecíolo** 15-20 mm de longitud y 2-3 mm de grosor, con doble pulvínulo, pulvínulo distal flexionado respecto al pecíolo, c. 7 × 2 mm, con indumento denso a veces de aspecto tomentoso, estrellado-equinado o estrellado-fasciculado; **láminas** cartáceas o subcartáceas, a veces coriáceas, de estrechamente oblongas o elípticas a estrechamente oblanceoladas, 18-20 × 6-8 cm, brevemente redondeadas o cuneado estrechadas en la base, con ápice agudo o a veces acuminado y margen ligeramente ondulado; venas basales 3, muy notorias y generalmente dos más submarginales poco desarrolladas, muy resaltadas en el envés, a veces ligera y gruesamente abultado-bulladas por el haz; **venas secundarias**, 3-4 a cada lado de la vena media, ubicadas en la mitad superior de la lámina y notoriamente broquidódromas hacia la margen; venas de tercer

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):645-675, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

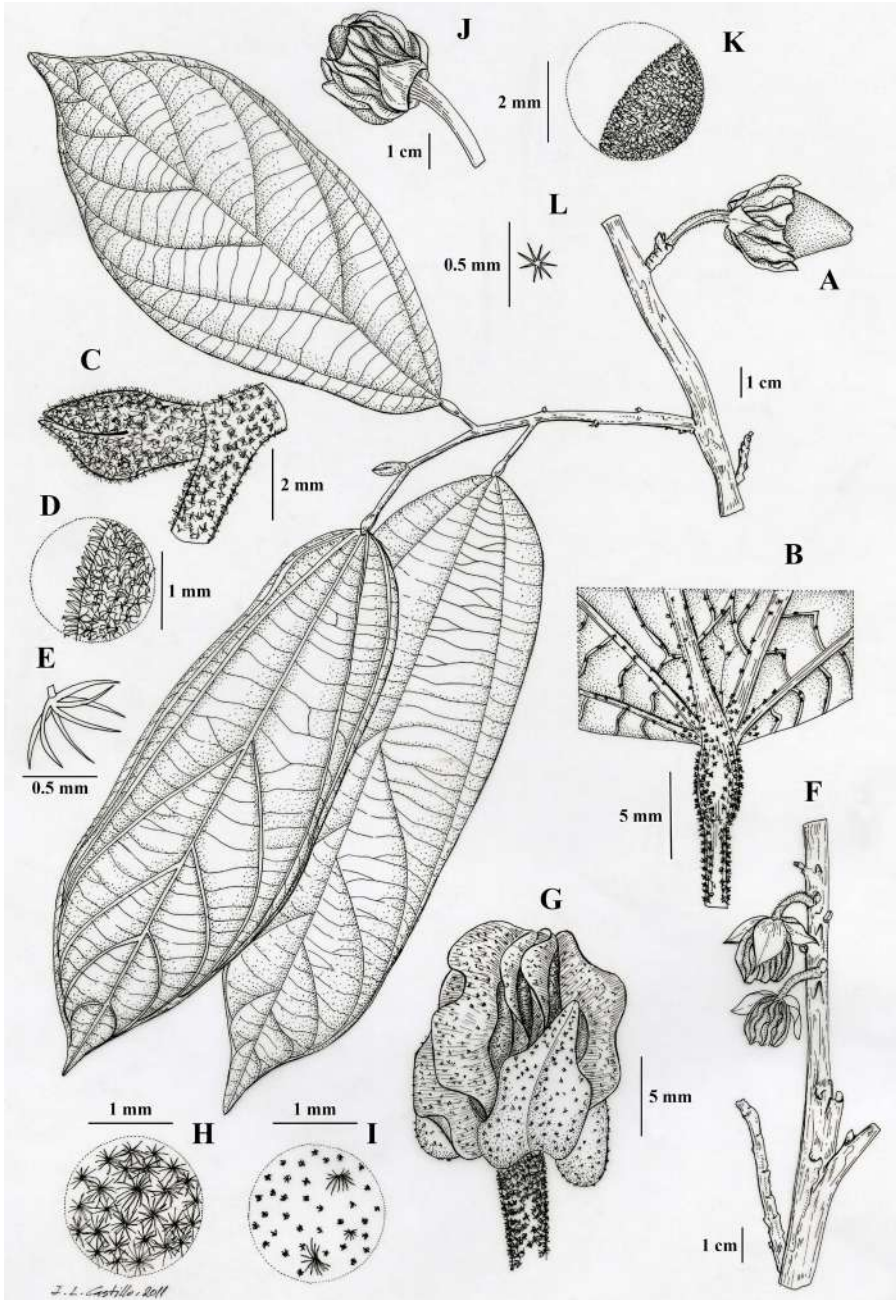



**Figura 8.** ***Matisia pseudobracteolosa*** Fern.Alonso. **A**. rama terminal con hojas y un fruto; **B.** pecíolo y base foliar (envés) mostrando el indumento; **C** yema terminal; **D** y **E** detalle del indumento de los catáfilos y de un pelo estrellado; **F** rama terminal con botones florales en la parte basal defoliada; **G** detalle de un botón floral; **H** indumento del pedicelo floral; **I** indumento de una bracteola del botón floral; **J** fruto joven con el cáliz y las bractéolas persistentes; **K** y **L** detalle del indumento del fruto y de un pelo estrellado-lepidoto. [A-E, a partir de *Vásquez 22777* (isotipo COL 477954); F-I, a partir de *Vásquez 24076* (COL 477956); J-L, a partir de *Díaz 7284* (COL 511987)]. Lámina de J.L. Castillo.

orden paralelas entre sí y perpendiculares a las venas primarias y secundarias; venas de 4º y 5º orden poligonal-reticuladas, con indumento marrón, fino, estrellado-tomentoso, más conspicuo y denso en el envés, principalmente en las venas primarias y secundarias. **Flores** dispuestas en ramas cortas, en la zona defoliada subterminal, en las cicatrices de abscisión

de antiguas hojas o a veces en posición axilar acompañando a las hojas, al final de las ramas jóvenes, en apariencia péndulas (en las muestras de herbario). **Botones** florales con amplio calículo parcialmente soldado en su base, que recubre casi todo el botón (**Figura 15S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322); **bractéolas** 9-11 × 7-9 mm, anchamente triangulares, cordadas en la base; botón obovoide, con 10 alas longitudinales muy amplias y sinuosas, con indumento de aspecto tomentoso, tricomas rojizo-café, fasciculado-estrellado, densamente dispuestos. **Pedicelo floral** 11-15(-16) × 2 mm, densamente tomentoso, con indumento estrellado largo, con bractéolas en posición subterminal, al lado del cáliz; **bractéolas** tres, iguales, anchamente ovadas a triangulares de base cordada, ligeramente unidas en la base, 11-15 × 9-11 mm, con indumento denso, estrellado corto mezclado con indumento largo; **cáliz** floral ovoide-elíptico, 13-18 × 10-12 mm, con 10 alas amplias, altas, 3-4(-5) mm, muy sinuosas; corola blanca (*in schaeda*) y androceo no vistos. **Pedúnculo fructífero** generalmente recurvado, (15)18-30(-38) mm de longitud y 3 mm de grosor, con indumento equinado-estrellado, **bractéolas** en posición subterminal en la base del cáliz, acrescentes, parcialmente soldadas en amplio calículo, flexionado ascendentes, 12-15(-17) × 11-14 mm; **cáliz fructífero** verde-amarillento (en vivo), marrón oscuro (en seco), llamativamente engrosado-coriáceo, en estado inmaduro, estrechamente cupular (**Figura 17S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322), 18-22 × 16-18 mm, o más frecuentemente muy abierto (en la madurez), cupular, 18-25 × 45-50 mm, recubriendo el fruto de 1/3 a ½ de su longitud, terminado distalmente en 3-4 grandes lóbulos agudos y desiguales, más o menos triangulares, 10-15 × 6-9 mm; con alas marrón-rojizo en seco, muy elevadas, (4-)5-7 mm de alto, ampliamente sinuosas en zig-zag, finamente equinado-lepidoto e internamente seríceo acostado. **Fruto** verde-grisáceo (en vivo), marrón claro (en seco), estrechamente ovoide u oblongo-ovoide, 35-40 × (18-)22-30 mm, gradualmente adelgazado hacia el ápice, rematado en pico, compreso y levemente mucronado-umbilicado en el ápice; **epicarpio** recubierto de fino indumento equinado-lepidoto o estrellado-lepidoto muy fino; **mesocarpo** fibroso jugoso que rodea los pirenos; generalmente 5 **pirenos** fusiformes compresos, a veces reniformes, 14-20 × 9-10 mm, cara externa recubierta de fibras del mesocarpo; endocarpo del pireno córneo, marrón, lustroso brillante en la cara interna. **Semilla** fanerocotilar, testa de la semilla marrón oscuro.

**Etimología.** El nombre hace referencia al parecido de esta nueva especie con la especie típicamente amazónica *Matisia bracteolosa* Ducke que presenta hojas más anchas y cálices con sólo 5 alas longitudinales y menos sinuoso-rizadas que en la especie que se describe.

**Distribución y hábitat.** Solo conocida del Perú en los Departamentos de Amazonas y San Martín, en el piedemonte de las regiones de Bagua y Condorcanqui. Aparentemente se trata de una especie de bosque primario de tierra firme, que crece en lomas y colinas bajas sobre suelos limoso-arcillosos, raramente sobre arenas blancas, entre los (200-)350-800 m. Se ha indicado también en una localidad en bosque de ribera (río Cenepa).

**Fenología**. Se conocen registros de floración en los meses de junio-julio; y muestras con frutos entre octubre y febrero.

**Notas taxonómicas.** Material insuficientemente conocido de esta especie, fué previamente identificado por nosotros en los herbarios, en las últimas décadas, como *Matisia bracteolosa s.l. y M. idroboi s.l.* Algunas colecciones de Perú, Loreto, de zonas bajas de la región de Maynas (*Grández 1649, Grández 17049, Vásquez 14126, Vásquez 16884*), presentan hojas subcartáceas glabrescentes y cálices fructíferos con alas más cortas que en *M. pseudobracteolosa*. Estas plantas de Maynas que guardan relación con esta especie, probablemente representen un taxón diferente no descrito, aspecto actualmente en proceso de evaluación y revisión.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** PERÚ. **Departamento de Amazonas**: Bagua, Distrito de Imaza, 740 m, árbol 20 m, 6 oct 1994 (fr), *C. Diaz et al. 7284* (COL 511987, MO 2025915/ A:6077448, MOL); Provincia de Condorcanqui, Distrito El Cenepa, Comunidad de Mamayaque, bosque primario, 4º34’S, 78º14’O, 400 m, árbol 15 m, 13 feb 1997 (fr), *E. Rodriguez et al. 1490* (COL 477958; MOL); ibídem, Distrito de

Imaza, Region nororiental del Marañon, Comunidad de Yamayakat, río Marañón, bosque primario, 4º55'S, 78º19'O, 320 m, árbol 6 m, 15 jul 1994 (fl -botones-), *R. Vásquez et al. 18697* (COL 511889/cb 000206765, MO, MOL); ibídem, Quebrada Kusú, bosque primario, 5º3'S, 78º20'O, 380 m, , árbol 18 m, 1 nov 1996 (fr), *R. Vásquez et al. 21371* (COL 511986, MO 1442806/ A: 5754568, MOL); ibídem, Comunidad de San Antonio, río Cenepa, bosque de ribera, 4º 29'S, 78º100'O, 380 m, 20 jun 1997 (fl), árbol 20 m, *R. Vásquez et al. 24076* (COL 477956 (**Figura 15S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322), MO, MOL). **Departamento de San Martín:** Lamas, Naranjal, vía a José Chávez, 200 m, árbol 15 m, 4 abr 1986 (fr), *S. Knapp et al. 6955* (COL 408535, MO1442808/ A:04908700, MOL).

**8.** ***Matisia tarapacana*** Fern.Alonso, **sp.nov.** (**Figuras 9, 17S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322)

**TIPO:** COLOMBIA**. Departamento de Amazonas:** Municipio de Leticia, corregimiento de Tarapacá, Comunidad de Caña Brava, lago Tipisca, bosque inundable con sotobosque denso, 296 m, arbusto 4 m, 24 jun 2016, (fr.), *N. Marín 2721 & S. Ruppi, J. Pinto, J. Barrios* (holotipo: COAH 106090).

**Diagnosis.** This species is similar to *M. altoamazonica* Fern.Alonso, from which it is distinguished by having shrub or sapling habit 2-5(7) m tall (generally trees **(**8)10-25 m tall in *M.altoamazonica*), membranaceous and smaller leaves 8-10(15) × 2-3.5(4) cm (vs. subcarthaceous and larger leaves, 10-15(20) × 3-5 cm), fruiting peduncles with three verticillate bractlets, persistent in subterminal position, linear-lanceolate (vs. peduncles with oval-lanceolate bractlets, attached in terminal position to calyx base), and floral and fruiting calyx with 10 thin, persistent, sinuous wings (vs. floral calyx with 10 short, thickened, slightly sinuous wings).

**Arbustos o arbolitos** 2-5(-7) m; ramificación primaria verticilada; **Ramas** terminales ligeramente angulosas, con corteza finamente tuberculada y con numerosas lenticelas; ritidoma de la corteza desprendible en tiras largas. **Yema** terminal 5-10 catáfilos estipulares, linear subulados, setáceos, 7-10 × 1,5 mm, erectos, incurvos, con indumento muy fino, de aspecto flocoso; ápice de las ramas con hojas jóvenes, estípulas y pedicelos con indumento fino, estrellado-fasciculado, amarillento, densamente dispuesto, a veces de aspecto flocoso. **Hojas** verde-negruzco, más o menos oscuro (en seco); **pecíolo** grácil, 15-19 × 1 mm, con pulvínulo proximal poco marcado y el distal cilíndrico, 4-6 × 1-1,5 mm; **láminas** membranosas, tenues, estrechamente oblongas, 8-10(-15) × 2-3,5(4) cm, relación L/A = 3, redondeadas en la base y notoriamente acuminadas en el ápice, acumen 10-15 × 5-7 mm, margen no revoluto. **Venación** característica, generalmente con vena media y otras dos venas basales de largo recorrido; con escasas venas secundarias (generalmente dos o tres a cada lado) en la mitad distal; venación terciaria perpendicular a las venas primarias o secundarias y paralela, poco resaltada, glabras por el haz y glabrescentes con indumento fino disperso en el envés. **Flores** opuestas a las hojas, que aparecen tempranamente junto con las hojas jóvenes; **Pedicelo floral** 10-20 mm × 1,5 mm, con indumento marrón amarillento, estrellado-equinado muy fino, con tres bractéolas subverticiladas cerca de la base del cáliz, erecto-patentes, estrechamente triangulares o linear-triangulares, agudas, 8-15 × 1,5-2 mm; **cáliz floral** tubular-cilíndrico, 11-13 × 5 mm, 4-5 lobado en su zona distal; lóbulos desiguales, triangulares, 2-3 mm de longitud, con 10 alas uniformes, delgadas, sinuosas y poco elevadas de 1 mm, densamente cubierto de indumento equinado-estrellado, marrón-amarillento en seco; **corola** no vista; **androceo** no visto. **Pedúnculo** del fruto 12-25(-30) × 1,5-2 mm; **bractéolas** persistentes, levemente acrescentes, en posición subterminal en el pedúnculo, erecto-patentes o más raramente reflejas, estrechamente lanceoladas o linear-lanceoladas, subiguales, 10-15 × 2-2,5 mm; **cáliz fructífero** cupular, 11-15 × 15-21 mm, recubriendo 1/3 a ¼ del fruto, con 10 alas longitudinales uniformes, notoriamente sinuosas y zigzagueantes, finamente tuberculadas en su cara externa, con indumento estrellado-equinado. **Fruto** propiamente dicho verde oliváceo, que se torna

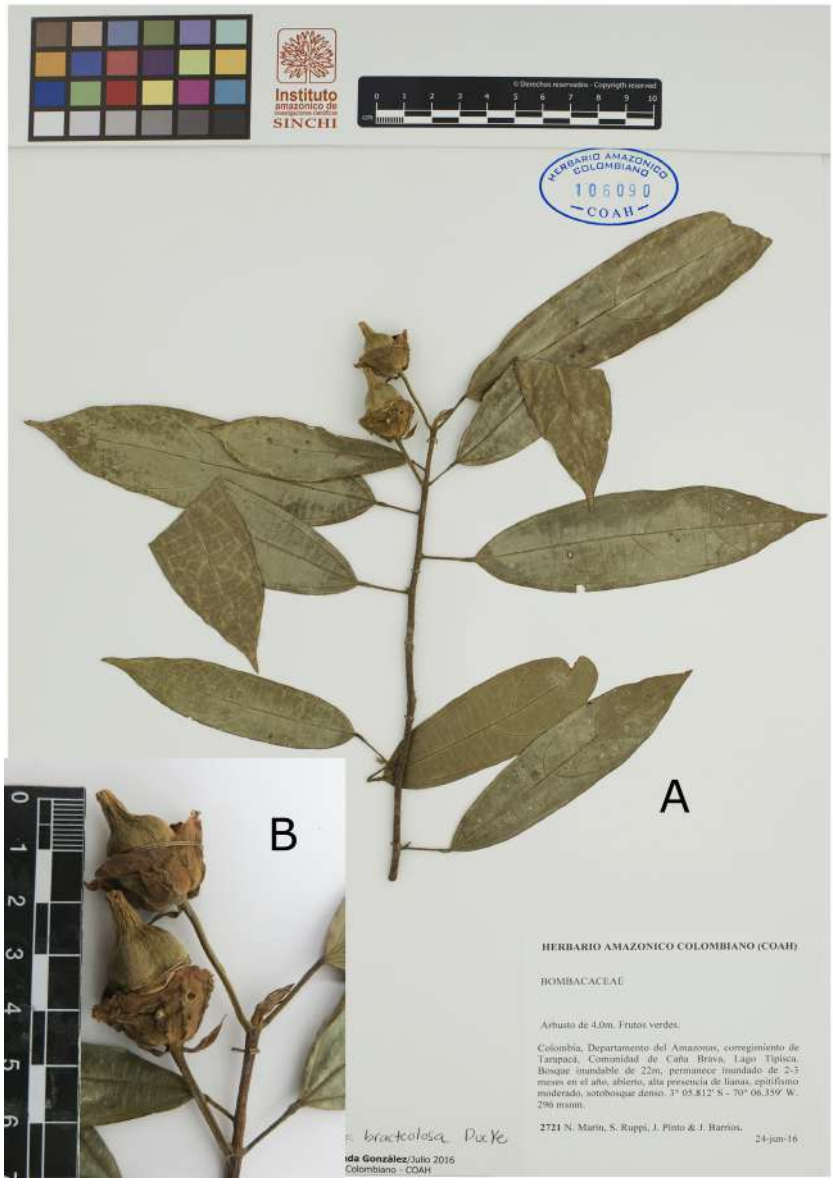



**Figura 9.** ***Matisia tarapacana*** Fern.Alonso. **A.** Tipo *N. Marín 2721.* Colombia. Amazonas (holotipo COAH 106090). **B** –Detalle de los frutos.

amarillo y carnoso en la madurez, anchamente elipsoide en la madurez, 20-29 × 14-18 mm en su zona más ancha, rematado en un distintivo rostro cilíndrico y truncado, (3)5-10 × 2,5-3,5 mm; todo el epicarpio con indumento lepidoto marrón claro, brillante, mesocarpo fibroso, carnoso; **pirenos** cinco, estrechamente oblongos, 16-18 × 9-10 mm, tapizados de fibras del mesocarpo.

**Etimología.** El nombre hace referencia a la localidad clásica de esta especie, Tarapacá, en el departamento de Amazonas, Colombia (**Convers**, 1937; **De la Cruz & Acosta**, 2015).

**Distribución y hábitat.** Especie localizada en sectores del alto Amazonas de Colombia (Amazonas) y Perú (Amazonas, Loreto). Consideramos que es una especie propia del bosque asentado sobre terrazas disectadas, con inundación temporal, donde se presentan aguas negras y sustratos de arenas blancas o arcillas. Parece ser una especie adaptada a ambientes muy inestables, en latizales, varillales, bosques de rebalse y restingas en terrazas

inundadas estacionalmente (aguajales), donde presenta el hábito de arbusto o arbolito de (2)3-7 m (varilla), con floración y fructificación temprana y abundante. Una estrategia adaptativa que ameritaría sin duda una prospección molecular y un estudio detallado en el terreno, valorando tanto su ciclo fenólogico como su especificidad de hábitat.

**Fenología.** La mayoría de los registros de Colombia y Perú corresponden a plantas fructificadas en los periodos abril-agosto y octubre-diciembre. Solo conocemos una muestra con floración incipiente del mes de diciembre.

**Nombres comunes y usos.** En la región de Cahuinarí en Colombia se le da el nombre de "bariricu" [Miraña], *Sánchez 949*; en Araracuara "yamana", *Toro 62.* En la región del río Corrientes, en Loreto, Perú, se ha registrado el nombre "purusham" [en Jibaro, Mayna], *Lewis 10304B* (WIS). Aparentemente hay registros erróneos de usos adjudicados a esta planta (en campo), que corresponderían a especies de las familias Sapotaceae y Burseraceae, de acuerdo con lo que recoge sobre la presencia de exudado pegajoso en las etiquetas de campo. Este es caso del nombre "cariaño" o "caraño" en Puerto Rico, Caquetá, *Correa 3083;* mas comúnmente utilizados en Colombia para árboles de algunos géneros de Burseaceae (**Cuatrecasas,** 1957).

**Notas taxonómicas.** Es interesante resaltar que, en esta especie, la mayoría de las recolecciones conocidas con flor-fruto, son plantas arbustivas o abolitos con escaso desarrollo (varillas), aparentemente jóvenes, que crecen en relieves disectados, inestables y cambientes (inundables).

En la zona de influencia del río Caquetá, Cahuinarí y Araracuara, se encuentra una variante atípica insuficuentemente conocida, que presenta indumento híspido y largo en los brotes jóvenes (*M. Sánchez, 949, C.P. Sánchez 5228, Toro 62*), pero la información existente sobre las flores y frutos de estas plantas es por ahora insuficiente para aclarar su estatus taxonómico, en relación con *M. altoamazonica* y con *M. tarapacana*.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA**. Departamento de Amazonas:** Municipio de Leticia, corregimiento de Tarapacá, alrededores del Caño Bejuco, afluente del río Cothué, en terrazas bajas inundadas estacionalmente, 70-90 m, árbol 6 m, 18 nov 2019 (fr), *J. Acosta 1126 et al.* (COAH 110622); Aduche, trocha al Caquetá, bosque secundario, árbol estéril, 24 sep 1986, *J. Batjes 353* (COAH); corregimiento de Tarapacá, cuenca del río Putumayo, río Porvenir Grande, caño Pájaro, bosque maduro sobre superfícies disectadas con alta inestabilidad, 2º27´S 70º21´O, 200-250 m, arbusto de 3 m, 15 dic 1998 (fr), *D. Cárdenas et al. 9984* (COAH 46516); ibídem, cuenca del río Putumayo, río Porvenir Grande, caño Pájaro, bosque maduro, 200-250 m, arbusto 3 m, 15 dic 1998 (fr), *D. Cárdenas et al. 9990* (COAH 46515, COAH 46516); Tarapacá, margen izquierda del río Putumayo, Paisaje B1, margen izquierda del caño Villa Flor, latizal, 2º29´S, 70º20´O, varilla de 2,2 m, 3 cm dap, 7 dic 2004 (fr), *J.P. Cardona et al. 189* (UDBC 17470); ibidem, Sector de Gaudencio, Paisaje tipo B2, en vegetación de latizal de 2,5 m, 2 cm dap, 15 dic 2004 (fr), *J.P. Cardona al. 300* (UDBC 17471); corregimiento de La Pedrera, Resguardo indígena Curare, 100 m, en bosque de rebalse, por el Quebradón Curare, de aguas negras, 17 abr 2004 (fr), arbusto 3 m, *Z. Cordero et al. 661* (COL554389); corregimiento de Tarapacá, bosque alto con superficies fuertemente quebradas, 200-250 m, estéril, 12 mar 1999, C. *Marín et al. 1482* (COAH 41630); corregimiento de Tarapacá, superficies moderadamente disectadas, bosque alto, 2º31'N 11º09´O, 200 m, arbusto 11 cm cap, estéril, 22 feb 1999, *Y. Martínez et al. 216* (COAH 46890); ibidem Parcela 6C, 27 feb 1999, estéril, *Y. Martínez et al. 288* (COAH 46891); ibídem, Tarapacá, Parcela 32C, bosques altos semidensos, 200m, arbusto estéril, 11 mar 1999, Y. *Martínez 881 et al.* (COAH); Municipio de Leticia, corregimiento Tarapacá, área de ordenación Forestal Doña Flor Martínez, Caño Pexyboy, bosque de tierra firme en terrazas medias, 70-120 m, arbolito 2 m, 15 nov 2019 (fr), *W.D. Rodríguez 9695 et al.* (COAH 111775); Municipio de Leticia, PNN Amacayacu, Tarapacá, río Cothué, cerca de Caña Brava, 100 m, 19 jun 1991 (fr), arbolito 5 m, *A. Rudas et al. 2127* (COL 408212, COAH-, FMB); Municipio de Tarapacá, P.N.N. Amacayacu, Sector Lorena (reserva Cothué), bosque de tierra firme, 70º0'O 3º2´S, 100 m, arbusto 3,5 m, estéril, 23 jul 1992, *A. Rudas et al. 5735* (COL 408213, FMB, UIS

11121); río Cahuinarí, 22 km al Oeste de la boca del Cahuinarí, 250 m, árbol 9 m, esteril, "bariricú" (Miraña), 6 sep 1988, *M. Sánchez* et al. *949* (COAH 8485); margen derecho del río Caquetá, 3,8 km del Quebradón de La Culebra, arbolito estéril, 27 ago de 1997, *C.P. Sánchez 5228 & C. Uriel* (COAH); Araracuara, Río Caquetá, margen izquierda, terraza antigua, arb. estéril, n.v.: "yamana", usos exudado pegajoso [confusión sapotaceae] *A.P. Toro et al. 62* (COAH-5709). **Departamento de Caquetá:** Municipio de Belén de los Andaquíes, cuenca del río Pescado, vereda Quizaya, P.N.N. Alto Fragua Indi Wasi, 967 m, 1º34´N, 75º56´O, árbol 8 m, estéril, 12 mar 2012, *D. Cárdenas et al. 42654* (COAH 77945); municipio de Puerto Rico, vereda La Estrella, árbol estéril, n.v.: "cariaño", 12 mar 2012, *M. Correa et al. 3083* (HUAZ 2245).

PERU. **Departamento de Loreto:** Provincia de Maynas, Alto río Nanay, 200 km arriba de Ikitos, terrazas y playas de arenas blancas, 140-210 m, arbolito 4 m, 23 ago 2006 (fr), *N. Davila 2645* (AMAZ, F 2316344); Provincia de Maynas, Distrito Putumayo, Inventario rápido 23 Yagua-Cotuhé, al NE de Iquitos y Pebas, bosque temporalmente inundable y aguajales, 161 m, arbolito 2,5 m, 18 oct 2010 (fr), *I. Huamantupa 14271* (F 2318036, (**Figura 17S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322)); Pampa Hermosa, río Corrientes, 1 km al S de río Macusari, bh-T de tierra firme, sobre arenas blancas, 160 m, árbol, n.v. (Jibaro Mayna) "purusham", 20 dic 1985 (fr), *W.H. Lewis 10304B* (WIS 0100172); Provincia Ramón Castilla, cabeceras del río Ampiyacu, N. de Pebas, hacia el río Algodón, 140 m, bosque de tierra firme sobre colinas y sustrato arcilloso y arenoso; 10 ago 2003 (fr), árbol 5 m, *M. Ríos et al. 597* (F 2248821).

## Información suplementaria

Ver información suplementaria en https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3318/5322.

## Agradecimientos

Al Real Jardín Botánico del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, que facilitó el desarrollo de la investigación "Taxonomía del género neotropical *Matisia* Bonpl. (Malvaceae-Bombacoideae), I- Las Secciones *Calyculatae* y *Longipedes* y su diversificación en el Norte de Suramérica", con cargo al proyecto PIE del CSIC: 200930I071. A los curadores de herbarios AAU, AMAZ, COAH, COL, ECUAMZ, F, G, K. HUAZ, M, MA, MO, MOL, NY, QCA, QCNE, U, UDBC, UIS, US y WIS, que facilitaron la consulta de las muestras o el envío de préstamos para estudio, que se citan en este trabajo; igualmente a los colegas que remitieron especímenes (duplicados) o imágenes para identificación, que resultaron de gran ayuda. A los colegas Carlos Parra su colaboración con el envío de préstamos desde COL y el manejo de los materiales en estudio en las instalaciones del Instituto de Ciencias Naturales (UN, Bogotá); a Julio Betancur, Jaime Uribe y Laura Clavijo (COL) por las facilidades dadas durante las visitas al herbario COL. A Nicolás Castaño y Wilson Rodríguez, su apoyo para la visita efectuada al herbario COAH en octubre de 2022 invitado por el proyecto *"Investigación, conservación y aprovechamiento sostenible de la diversidad biológica, socioeconómica y cultural de la Amazonía colombiana*", Proyecto Bio Putumayo, del Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI) y por toda su colaboración durante las visitas. A Cristian Castro y Julián Betancur que amablemente facilitaron las fotografías de campo (Putumayo) de *Matisia oritolumbaquina* (número de N. Marín) y de una colección de *M. archidonae* (número de J. Betancur), que se incluyen en este trabajo. A Juan Luis Castillo (RJB-CSIC), que elaboró las ilustraciones de tres de las especies incluidas en este trabajo. A Javier David Quiroga Nova de Girón (Santander) y Andrés Torrejano (COL), por facilitar el acceso a material de complementario de *Matisia oibae*, proveniente de Carmen de Chucurí (Santander). A Ernesto Campos (STRI), por su inestimable ayuda con la edición de algunas láminas de las especies incluidas en este trabajo. A Carlos A. Parra y a los revisores de este manuscrito, por las importantes observaciones y comentarios que, ayudaron mucho a mejorar este documento.

## Referencias

**Alvear, C.J**. (2020). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Cantón Gonzalo Pizarro* 2019-2023, Gob. Auton. D. M. del Cntón Gonzalo Pizarro. Sucumbíos. Ecuador. 449 pp.

**Alverson, W.S.** (1989). *Matisia* and *Quararibea* (Bombacaceae) should be retained as separate genera. *Taxon*, *38*(3), 377388. https://doi.org/10.2307/1222268

**Alverson**, **W.S., Whitlock, B.A., Nyffeler, R., Bayer, C., Baum, D.A.** (1999). Phylogeny of the core Malvales: Evidence from ndhF sequence data. *American Journal of Botany, 86*(10), 1474-1486. https://doi.org/10.2307/2656928

**Bakuhizen van der Brink, R.C.** (1924). Revisio Bombacacearum. *Bulletin du Jardin Botanique de Buitenzorg,* ser. 3, 6, 161-240, t. 26-38.

**Baum, D.A., Smith, S.D., Yen, A., Alverson, W.S., Nyffeler, R., Whitlock, B.A., Oldham, R.L.** (2004). Phylogenetic relationships of Malvatheca (Bombacoideae and Malvoideae; Malvaceae sensu lato) as inferred from plastid DNA sequences. *American Journal of Botany, 91*(11), 1863-1871. https://doi.org/10.3732/ajb.91.11.1863

**Brako, L., Zarucchi, J.L.** (1993). Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Perú. Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard. *45,* 1-1251.

**Clark, J.L., Neill, D.A. & Asanza, M.** (2006). Floristic Checklist of the Mache-Chindul Mountains of Northwestern Ecuador. *Contributions from the United States National Herbarium 54,* 1-180.

**Colli-Silva, M., Pérez-Escobar, O.A., C.D.M. Ferreira & al.** (2025). Taxonomy in the light of incongruence: An updated classification of Malvales and Malvaceae based on phylogenomic data. *Taxon, 74*(2), 361-385.

**Convers Pinzón, R.** (1937). El Trapecio Amazónico colombiano en 1937. *Boletín de la sociedad Geográfica de Colombia, 1*(4), 1-11.

**Cuatresacas, J.** (1957). Prima Flora Colombiana 1. Burseraceae. *Webbia* 12, 375-441.

**Cuatresacas, J.** (1971). Miscellaneous notes on neotropical flora. *Phytologia, 20*(8), 465-481.

**De la Cruz, P. & L.E. Acosta.** (2015). Atizar el fuego de los conocimientos tradicionales: El caso de las comunidades indígenas de Tarapacá. *Revista Colombia Amazónica, 8*, 5-24.

**Diaz-Perez, C.N.** (2012). Análisis florístico y fitogeográfico de la cuenca baja del Cañon del Río Suarez (Santander, Colombia). *Tesis Magister en Ciencias Biológicas*, Universidad Nacional de Colombia. Fac. Ci. Dep. Biología. Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá, Colombia. 153 pp.

**Ellis, B., Daly, D.C., Hickey, L.J., Johnson, K.R., Mitchell, J.D., Wilf, P., Wing, S.L.** (2009). *Manual of leaf architecture*. Cornell University Press and the New York Botanical Garden Press. https://doi.org/10.1079/9781845935849.0000

**Fabre, A.** (2005). Diccioario etnolingüistico y guia bibliográfica de los pueblos indígenas sudamericanos. 1-146. http://butler.cc.tut.fi/~fabre/BookInternetVersio/Dic%3DWaorani.pdf

**Fernández-Alonso, J.L.** (1992). Una nueva especie de *Matisia* (Bombacaceae-Quararibeae) del occidente de Colombia. *Anales del Jardín Botánico de Madrid, 50*(2), 171-174.

**Fernández-Alonso, J.L.** (1996). Contribuciones al conocimiento del género *Phragmotheca* Cuatrec. (Bombacaceae-Quararibeae). *Caldasia*, *18*(3), 253-284.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2001a). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae I. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia, Quararibea* y *Spirotheca. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 25*(95), 183-206.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2001b). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae II – Novedades taxonómicas y corologicas en *Matisia* y *Quararibea* del Norte de Suramérica, *Caldasia, 23*(2), 251-283.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2011). Bombacaeae neotropicae novae vel minus cognitae IX. Una nueva especie de *Matisia* Bonpl. del Chocó biogeográfico. *Caldasia*, *33*(2), 413-426.

**Fernández-Alonso J.L.** (2021). Malvaceae Neotropicae novae vel minus cognitae X. Nuevas especies de *Quararibea* de Colombia y Ecuador. *Anales del Jardín Botánico de Madrid, 78*(2), 1-16. e112. https://doi.org/10.3989/ajbm.2584

**Fernández-Alonso, J.L.** (2026a). Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XV. Nuevas especies de *Matisia* y *Quararibea* del N. de Sudamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* (en este número).

**Fernández-Alonso, J.L.** (2026b). Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XVI. Novedades en el género *Matisia* de Suramérica.

**Fernández-Alonso, J.L. & Campos-Pineda, E.** (2024). Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XII. Nuevas especies de *Matisia* de Colombia y Panamá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *48*(189), 897-921.

**Fernández-Alonso, J.L. & Castroviejo, S.** (2001). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae IV. De Matisiis et Quararibeis nonnullis in provincia chocoana regni novogranatensis provenientibus. *Anales del Jardín Botánico de Madrid, 59,* 152-156.

**GBIF** (2025) Global Biodiversity Information Facility. https://www.gbif.org/. (consultado en noviembre de 2025).

**Gentry, A.H.** (1986) Species richness and floristic composition of Choco region plant communities. *Caldasia,* 15(71-75), 71-91. https://www.jstor.org/stable/43406071

**Gómez, L.F., Gallego, B., Naranjo, L.G. (eds.).** (2017). Atlas socioambiental de las cuencas transfronterizas Mira y Matajé: aportes para su ordenamiento y gestión integral Colombia-Ecuador. Cali, WWF-Colombia. Edit. Bando Creativo. 137 pp.

**Greuter, W., Rankin Rodríguez, R. G., Zamora Señoret, J. C. & Parra Sánchez, L. A.** (2025). Código Internacional de Nomenclatura para algas, hongos y plantas. VI edición en español (Código de Madrid). *Occasional papers from the Herbarium Greuter,* 6. Berlín: Stiftung Herbarium Greuter. [Traducción de: International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (Madrid Code), *Regnum Vegetabile* 162. Chicago and London: The University of Chicago Press].

**Guevara, J.E., White, D.M., Pitman, N.C.A., Cerón, J.-C., Fernández, A., Navas, D., Alverson, W.S.** (2025). *Phragmotheca centinelensis* (Malvaceae, Malvoideae or Matisioideae), a newly-discovered, critically-endangered canopy tree species from a cloud forest in Pacific Ecuador. *PhytoKeys,* 254, 41-59. https://doi.org/10.3897/phytokeys.254.143106

**Harris, J.G., Harris, M.W.** (2001). *Plant identification terminology: An illustrated glossary.* 2nd ed. Spring Lake Publishing.

**Hohenacker, R.F.** (1846). Bei Unterzeichnetem liegen zur Abgabe bereit: P. Claussen Plantae Brasilienses. Sp. 64 —200. *Flora, Botanische Zeitung* 29, 496.

**IUCN** (2022). *Guidelines for using the IUCN Red List categories and criteria*. Version 15.1. Standards and Petitions Committee. IUCN. https://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf

**JSTOR** (2025) Global plants. https://plants.jstor.org/collection/TYPSPE. (consultado el 29 de noviembre de 2025).

**Martius, C. P. F.** (1839). Herbarium Florae Brasiliensis. *Flora* 22 (1, Beibl.),17-20.

**Naturalis (L).** (2025) Bioportal Naturalis. L.2377308, L.2377309, L.1161740. https://bioportal.naturalis.nl/nl/resultbasic_term, (consultado en diciembre de 2025).

**Neill, D. & Palacios, W.** (1989). *Árboles de la Amazonia ecutoriana. Lista preliminar de especies*. Direcc. Nac. Forest. Quito, Ecuador. Pp; pag. 29-30, Bombacaceae.

**Schumann, K. (**1886). Bombacaceae. In *Flora Brasiliensis 12,* 237-250.

**Schumann, K.** (1895) Matisieae. In: Engler A, Prantl K (Eds) *Die Natürlichen Pflanzenfamilien* III, *6*(58), 63-65. https://www.biodiversitylibrary.org/item/56529

**Tarazona, A., Bonilla, A. & Sebastián, J.** (2017). Una aproximación al poblamiento de la provincia Guane en las visitas de 1560 y 1572. *Historia y Espacio, 13*(49), 225-232.

**Thiers, B.** (2025). *Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff.* New York Botanical Garden, New York. https://sweetgum.nybg.org/science/ih/

**Torrejano-Munevar, A.F., Paz López, C.A. & Fernández-Alonso, J.L.** (2025). *Matisia boyacensis* (Malvaceae): a new species from the premontane forests of the Cordiellera Oriental of Colombia. *Brittonia, 77,* 67-75. https://doi.org/10.1007/s12228-025-09828-z

**Valois, H. & Ramos, Y.A.** (2007). Bombacaceae: Composition and ecology in permanent plot of research on Biodiversity (PPRB), Chocó, Colombia. *Revista institucional Universidad Tecnológica del Chocó Investigación, Biodiversidad y Desarrollo*, *26*(2), 4-8.

**Vischer, W.** (1920). Sur les *Quararibea* Aubl., un genre de Bombacées a ovaire infere. *Bulletin de la Societé Botanique de Genève* ser. 2, 11, 199-210.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327



Artículo original

# Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XV. Ocho especies nuevas de *Matisia* y *Quararibea* de Suramérica y otras novedades nomenclaturales

## Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XV. Eight new species of *Matisia* and *Quararibea* from South America and other nomenclatural updates

**José Luis Fernández-Alonso**

Departamento de Biodiversidad y Conservación, Real Jardín Botánico RJB-CSIC, Claudio Moyano 1, 28014 Madrid, España

## Resumen

Continuando con los avances al trabajo de revisión que se adelanta en los géneros *Matisia* y *Quararibea* (Malvaceae), en esta contribución se describen e ilustran ocho especies nuevas del norte de Sudamérica, cinco del género *Matisia* y tres de *Quararibea*. De ellas, cuatro son especies de la vertiente amazónica, dos de los valles interandinos de Colombia y dos de la vertiente del Pacífico de Colombia. Se propone la combinación nueva *Quararibea nicaraguensis* (Alverson) Fern.Alonso, para un taxón subespecífico de *Q. funebris* (La Llave) Vischer. Por último se incluye una clave para las secciones del género *Matisia* y otra para las 27 especies hasta ahora reconocidas en *Matisia* sección *Calyculatae* Fern.Alonso, incluidas las nuevas especies descritas en las contribuciones XIV y XV del presente número.

**Palabras clave:** Claves; Matisieae; Mesoamérica; Nuevas especies; Suramérica; Taxonomía.

## Abstract

Continuing with the ongoing progress in the revision of the genera *Matisia* and *Quararibea* (Malvaceae), this contribution describes and illustrates eight new species from northern South America. Four of these species are from the Amazonian slope, two grow in the inter-Andean valleys of Colombia, and other two are found in the Pacific slope of Colombia. The new combination *Quararibea nicaraguensis* (W.S. Alverson) Fern.Alonso is proposed for a subspecific taxon of *Q. funebris* (La Llave) Vischer. Finally, a taxonomic key to the sections within *Matisia* is included, as well as another key for the 27 species recognized to date of *Matisia* section *Calyculatae* Fern.Alonso, including those described in contributions XIV and XV of this issue.

**Keywords:** Keys; Matisieae; Mesoamerica; New species; South America; Taxonomy.

## Introducción

Como parte de los trabajos de revisión que venimos adelantando desde hace varios años en los géneros *Matisia* Bonpl. y *Quararibea* Aubl. (Malvaceae, Matisieae) (**Fernández-Alonso,** 2001a; **Fernández-Alonso,** 2024; **Fernández-Alonso & Campos-Pineda**, 2024) y como complemento a la anterior contribución de avance en la que propusimos ocho especies nuevas en la sección *Calyculatae* Fern.Alonso del género *Matisia* (**Fernandez-Alonso**, 2026, en este número), en esta segunda entrega damos a conocer otras ocho especies nuevas de los géneros *Matisia* y *Quararibea,* provenientes igualmente de diferentes regiones de centro y norte de Sudamérica. En el género *Matisia*, se tratan aquí otras tres especies nuevas de la sección *Calyculatae*, dos de las cuales crecen en la vertiente del Pacífico de

**Citación:** Fernández-Alonso JL. Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XV. Ocho especies nuevas de *Matisia y Quararibea* de Suramérica y otras novedades nomenclaturales. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

**Editor:** Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**
José Luis Fernández-Alonso;
jlfernandeza@rjb.csic.es

**Recibido:** 28 de octubre de 2025
**Aceptado:** 3 de febrero de 2026
**Publicado en línea:** 12 de junio de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Colombia y una tercera en el piedemonte amazónico de Colombia. En cuanto a la Sección *Castano*, continuando con acotación o descripción de nuevos taxones reconocidos en este grupo (**Cuatrecasas,** 1971; **Robyns,** 1972; **Fernández-Alonso,** 2001a, 2001b), se proponen aquí dos taxones nuevos. Uno de ellos proviene del departamento de Córdoba (del sector de Paramillo-Tierralta) en Colombia, región de reconocida afinidad florística chocoana, relacionado con la especie chocoana *M. castano* H. Karst & Triana (**Dugand,** 1955). Una segunda especie, proveniente de la cuenca del Magdalena colombiana, presenta una clara relación con *M. samariensis* Cuatrec., especie de frutos leñosos y hojas pequeñas, encuadrada en el subgrupo de afinidad montana, de *Matisia* sección *Castano*, y restringida al piedemonte orinocense (**Cuatrecasas,** 1948; **Fernández-Alonso**, 2001a; **Fernández-Alonso**, 2016).

Para facilitar el reconocimiento de las cinco secciones establecidas en el género *Matisia* (**Fernández-Alonso,** 2001a; **Fernández-Alonso & Campos-Pineda**, 2023), se incluye aquí una clave para su identificación, basada exclusivamente en caracteres morfológicos. Así mismo, como avance a la revisión sinóptica prevista de la sección *Calyculatae*, del género *Matisia* (**Fernández-Alonso,** en prep.), que incluye 27 especies conocidas hasta la fecha y cuya distribución se concentra llamativamente en el norte de Suramérica, se presenta aquí una primera clave para su identificación.

En lo que respecta al género neotropical *Quararibea* (Malvoideae, Matisieae Benth.), agrupa al menos a 65 especies (**Ferreira,** 2020; **Fernández-Alonso**, 2022, **Fernández-Alonso,** 2024). Para Colombia, se han reconocido hasta la fecha 25 especies (**Fernández-Alonso**, 1999; 2024), a las hay que añadir ahora una del piedemonte amazónico que se describe en este trabajo, *Q. caquetensis* Fern.Alonso, que consideramos relacionada con *Q. turbinata* (Sw.) Poir. Por otra parte, a las siete especies del género *Quararibea* conocidas de Perú (**Brako & Zarucchi,** 1993; **Fernández-Alonso**, en prep.), hay que añadir las dos especies amazónicas que se describen aquí. El número de especies de *Quararibea* de Ecuador (**Fernández-Alonso**, 2024), asciende a 13 con la que aquí se describe. Por último, y en relación con el estudio en curso del grupo "grandifolia" del género *Quararibea*, que incluye a la especie *Quararibea funebris* (La Llave) Vischer (**Fernández-Alonso**, 2024), se consideró la separación de una de sus subespecies (**Alverson,** 1987) en un taxón independiente, combinación que proponemos en este trabajo. En relación con este cambio, el nuevo taxón específico (*Q. nicaraguensis* (Alverson) Fern.Alonso), quedará adscrito a un subgrupo diferente, "synandra", dentro del género *Quararibea* (**Fernández-Alonso**, en prep.).

## Materiales y métodos

Para los trabajos de revisión que se vienen adelantando en los géneros *Matisia* y *Quararibea*, y como continuación a la entrega XIV de la serie *Malvaceae Neotropicae Novae...* incluido en este mismo número (**Fernández-Alonso**, 2026, este número) se revisaron colecciones depositadas en los herbarios, citados por sus siglas, BM, BR, CHOCO, COAH, COL, CR, CUVC, F, FMB, HJBGP, HUAZ, HUT, JAUM, K, MA, MEDEL, MO, MOL, NY, PMA, QCA, U, UDBC, US, USM y WIS (acrónimos según **Thiers,** 2025). Además de estos especímenes de herbario y algunas imágenes de muestras facilitadas por algunos colegas, se contó con colecciones personales e imágenes de campo obtenidas en expediciones o cursos de campo efectuados en el departamento del Chocó (en 1990 con la Agencia Española AECID y el Herbario CHOCO; en 1998 con la Asociación Colombiana de Herbarios (ACH) en Quibdó y en 2005 en el curso organizado por el Programa de Biología de la Universidad Tecnológica del Chocó).

En el estudio morfológico y en la terminología descriptiva se siguió básicamente la metodología ya referida en la entrega XIV (**Fernández-Alonso**, 2026) y en contribuciones anteriores (**Fernández Alonso** 2001a; **Harris & Harris,** 2001). Se tomaron también algunas fotografías de acercamiento (tricomas y detalles de estructuras florales) con lupa binocular Nikon SMZ645 y lente de 100x acoplada a una cámara Canon PowerShot

SX260HS. El material gráfico se presenta separado en dos secciones. Las figuras que acompañan al texto son once y son en su mayoría ilustraciones detalladas de las nuevas especies o fotografías de especímenes tipo. Se incluye también un número importante de figuras como Material Suplementario (**Figuras de la 1S a la 21S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323), con información morfológica variada o con detalles de colecciones históricas relacionadas con aspectos nomenclaturales tratados para el caso de caso de *Matisia chocoensis* y *Quararibea nicaraguensis*. La catalogación de las especies aquí descritas, de acuerdo con los criterios de la Lista Roja de la **IUCN** (2022), no fué abordada en este trabajo.

## Resultados

Se presenta a continuación el tratamiento taxonómico de las nuevas especies del norte de Sudamérica de *Matisia*, secciones *Calyculatae* y *Castano* antes comentadas; de las dos nuevas especies del género *Quararibea* y de la nueva combinación en el género *Quararibea.* Se trata de dos especies de *Quararibea* de flores pequeñas o medianas y guardan alguna relación con *Q. cryptantha* Fern.Alonso, en el caso de la especie peruana *Quararibea aguarunae* Fern.Alonso y con *Q. caldasiana* Fern.Alonso, en el caso de la especie del piedemonte de Perú y Ecuador, *Q. cajamarcana*. Por último, se incluye una clave para la identificación de las cinco secciones actualmente reconocidas en el género *Matisia*, y otra para la identificación de las 27 especies conocidas en *Matisia* sección Calyculatae, actualmente en proceso de revisión.

**1. *Matisia andaquina*** Fern.Alonso., sp. nov. (**Figuras 1, 1S, 2S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)

**TIPO:** COLOMBIA. **Departamento del Caquetá:** Municipio de Belén de los Andaquíes, Parque Natural Municipal Andaquí, cabeceras del río Pescado, bosque conservado con pendientes inclinadas, 1º40'N 75º11'O, 1200-1400 m, árbol 12 m, 26 ene 2017 (fl, fr), *N. Castaño 8838, D. Cárdenas, J. Betancur, A. Barona et al.* (holotipo: COAH 97235; isotipo: COL 613139).

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia lomensis* (Cuatrec.) Cuatrec. from which it differs by having coriaceous or subcoriaceous leaves, dark brown when dry (vs. papery or subcoriaceos leaves, pale green when dry, in *M. lomensis*), leaf underside with very conspicuous, echinate-fasciculate indumentum (vs. leaf underside glabrescent or with minute stellate indumentum), fruit stalk 25-52 mm long (vs. fruiting peduncles 10-15(20) mm long), fruit calyx circumscissile, uniformly sectioned at the distal margin (vs. calyx cupular-bell-shaped, not circumscissile, irregularly lobed-torn at the distal margin).

**Árboles** 10-12(-14) m. **Ramas** terminales plegado-angulosas, con rugosidades, marrón-negruzcas o marrón-rojizas, en las partes jóvenes con entrenudos en zig-zag, asurcados longitudinalmente, con abundante indumento ferrugíneo, estrellado-fasciculado o flocoso. **Yema terminal** cónica a ovoide, con 5-7 catáfilos estipulares subcoriáceos, anchamente triangulares, 4-5 × 3-4 mm, agrupados o erecto-ascendentes, con denso indumento tomentoso o flocoso, ferrugíneo o marrón claro. **Hojas** con **estípulas** inconspícuas, enmascaradas en el indumento denso estrellado, prontamente caducas; **pecíolos** 10-20(-22) × 1,5-2 mm, con pulvínulo distal cilíndrico más o menos notorio, por lo general densamente cubierto de indumento estrellado-fasciculado, marron-ferrugíneo; **láminas** coriáceas o subcoriáceas (en seco), marrón oscuro en el envés y marrón pálido en la haz, estrechamente oblongo-elípticas, 10-15 × (2,5)3-4(-5) cm, más raramente oblanceoladas y hasta de 6-7 cm de anchura (plantas de Ecuador); cuneado-redondeadas en la base y apiculadas distalmente, con apículo c. 15-20 × 10-12 mm; **venas** basales generalmente 3, la media más engrosada, resaltadas en envés y ligeramente impresas en la haz; a veces con 2-3 venas submarginales adicionales de corto recorrido; vena media con 4(5) pares de **venas secundarias** erecto patentes, ubicadas en los 2/3 distales de la lámina, venación de tercer orden paralela y de cuarto orden poligonal; visibles en ambas superficies pero más




**Figura 1.** ***Matisia andaquina*** Fern.Alonso. **A.** Holotipo *N. Castaño 8838 et al.* (COAH 97235). **B.** Ápice de la rama mostrando el indumento de la yema terminal, del pedicelo y del botón floral. **C.** Detalle del fruto joven y del botón floral en dos ramas terminales.

resaltada en el envés, con indumento largo, equinado-fasciculado o estrellado-fasciculado, marrón-amarillento, abundante en las venas del haz y muy conspícuo, marrón en el envés. **Botón floral** ovoide, 8-10 costado-surcado longitudinalmente, uniformemente recubierto de indumento ferrugíneo. **Flores** generalmente distribuidas en el extremo de las ramas cortas, flores insertas opuestas a las hojas. **Pedicelo floral** grueso, (17-)19-35 × 2 mm, generalmente con 3 **bractéolas** verticiladas o subverticiladas en la base del cáliz, de 5-6 × 4-5 mm, lobado-crenadas, a veces a modo de pequeña corona; **cáliz floral** en el botón con 3-6 alas longitudinales, escasamente resaltadas, principalmente en la mitad distal; pedicelo,

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

bractéolas y cáliz densamente cubiertos de indumento ferrugíneo equinado-fasciculado; **Pedúnculo fructífero** 25-45(-52) × 2-2,5 mm con indumento denso flocoso-equinado, con cicatrices bracteolares de abscisión en la zona distal o a veces con las bractéolas persistentes anchamente triangulares, éstas 6-7 × 4-5 mm; **Cáliz fructífero** cupular, en copa, marrón oscuro (en seco), 15-17 × 21-24 mm, uniformemente seccionado a modo de caliptra (circuncisil), faltando la mitad distal del cáliz, o a veces, irregularmente rasgado-lobado en la zona distal, recubriendo generalmente 1/3, raramente ½ del fruto maduro, ocasionalmente con vestigios de alas longitudinales (3-5) poco elevadas; con denso indumento marrón. **Fruto** verde ferrugíneo, en seco, marrón amarillento, anchamente ovoide o anchamente elipsoide, 24-29 × 22-25 mm, levemente rostrado-truncado en la zona distal (**Figura 2S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323), epicarpio estriado rugoso (en seco) con denso indumento marrón, fino, estrellado tomentoso, más largo en la mitad basal.

**Etimología.** El nombre hace referencia al Parque Natural Municipal Andaquí, en el departamento del Caquetá, Colombia (**Castaño et al.**, 2020; **Marín et al.** 2020), una de las localidades donde fue recolectado el material conocido de esta especie.

**Distribución y hábitat.** Especie propia de zonas elevadas del piedemonte amazónico de Colombia y Ecuador, en cotas altitudinales entre los 950 y los 1600 m de altitud. De Colombia se conoce sólo del departamento del Caquetá donde aparece circunscrito a los municipios de Florencia, Suaza y Belén de los Andaquíes y donde es considerado un árbol poco frecuente. De Ecuador se conocen dos registros de las Provincias de Morona-Santiago y Zamora Chinchipe.

Suele encontrarse en bosques primarios más o menos intervenidos, sobre pendientes inclinadas y en la proximidad de quebradas y riachuelos. Generalmente aparece asociada a *Dyctiocaryum lamarckianum* (Mart.) H. Wendl. y al sotobosque de *Dieffenbachia sp*. y *Socratea exorrhiza* (Mart.) H. Wendl.

**Fenología.** Se conocen registros de floración entre octubre y enero y de material con frutos en enero-marzo y agosto-noviembre.

**Nombres comunes y usos.** "cacao de monte" en Orito, Putumayo (*Montoya 1751*); "saput", "sapote", en Ecuador, Morona-Santiago, (*E. Little 644 & al*.); "zapotillo", en Orito, Putumayo (*Montoya 1751*).

**Notas taxonómicas.** Las colecciones conocidas de Ecuador (*Little 644, Jaramillo 14041*) presentan yemas terminales y ápices de las ramas jóvenes marrones, densamente estrellado-tomentosas, las hojas con láminas ligeramente más anchas, oblanceoladas y hasta de 6-6,5 cm de anchura, las bractéolas generalmente acompañan al fruto en la base del cáliz y el fruto maduro es más claramente rostrado con prolongación cilíndrica truncada de 3-4 × 3-4 mm. Anteriormente habíamos venido identificando algunas colecciones de este grupo del piedemonte amazónico de Colombia y Ecuador bajo el nombre *Matisia floccosa* Fern. Alonso, s.l. (**Fernández-Alonso,** 1992; 2001a; 2016). Con el reconocimiento de la nueva especie aquí descrita de la vertiente amazónica y el reanálisis de otras colecciones del grupo *M. floccosa*, queda ahora circunscrita esta última especie a los bosques occidentales de Colombia y en Ecuador.

Por último, en todo el piedemonte medio y alto (600-1300 m) amazónico de Colombia (Cauca, Putumayo) y en Ecuador (Napo) también se encuentran colecciones de hojas gruesas, pedúnculos fructíferos inusualmente largos y cinco alas o menos en el cáliz, que fueron tentativamente asociadas con *M. floccosa* y que ahora mantenemos bajo la circunscripción de *M. lomensis* s.l. (este trabajo), al igual que otras colecciones de esta especie típica de zonas bajas.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA. **Caquetá**: cordillera Oriental, vertiente Oriental, municipio de San Vicente del Caguán, 1000-1300 m, bosque primario intervenido, árbol, 27 nov 1990 (fl), *J. Betancur 2217 & S. Churchill* (COL 422753, HUA 84377); ibídem, municipio de Belén de los Andaquíes, camino Andaquí entre el municipio de Acevedo y Belén de los Andaquíes, vegetación en bosque intervenido, 1500-1300 m, 1º41'N 75º54'O, árbol 12 m, 9 mar 2016 (fr), *D. Cárdenas*

*45783 et al.* (COAH 89610, COL); ibídem, bosque con *Dyctiocaryum lamarckianum* y *Socratea exorrhiza*, cerca de la quebrada Finagá, 1400-1200 m, 1º41'N 75º54'O, árbol 12 m, 10 mar 2016 (fr), *D. Cárdenas 45837 et al.* (COAH 89221, COL, NY 3698479); ibídem, Sector Cerro Gabinete, antigua vía Florencia a Neiva, bosque bajo 18 m, abierto, con fuerte pendiente, 1º50'N 75º19'O, 1571 m, árbol 22 m, 1 ago 2017 (fr), *N. Marín 3610 et al.* (COAH 96815); ibídem, municipio de Orito, Vereda Tercer Plan, vega del Guamez, camino a la quebrada Los Linderos, bh-T en planicie, interior del bosque primario, 772 m, árbol 16,6 m, n.v.: "zapotillo", "cacao de monte", 19 dic 2013, *M. Montoya 1751 et al* (COAH); ibídem, mpio. de Florencia, Carretera Florencia a Suaza Km 26, vereda Las Brisas, 1º36'N 75º37'O, 1400-1440 m, árbol 12 m, 1 nov 1993 (fr), *J. G. Ramírez 4932 et al.* (COAH 21149).

ECUADOR. **Provincia de Morona-Santiago:** Cordillera de Cutucú, 5-10 km al este de Logroño, 2º37'N 78º7'O, 1200-1500 m, árbol 10 m, n.v.: "saput", "sapote", 9 oct 1975 (fl, fr), *E. Little et al. 644* (COL 159640, US 2941171). **Provincia de Zamora-Chinchipe:** Pachicutza; bosque intervenido, sendero hacia una quebrada, suelo franco limoso, 1000-1200 m, árbol 15 m, 19 oct 1991 (fr), *J. Jaramillo 14041* (COL 422795 (**Figura 2S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323), QCA 21663, QCA 7004781, 2 pl.).

**2. *Matisia buenaventurae*** Fern.Alonso, sp.nov. (**Figuras 2, 3S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)

**TIPO:** COLOMBIA. **Departamento del Valle del Cauca**: Buenaventura, Bajo Calima, Concesión Pulpapel, carretera Canalete, 3º55'N 77º00'O, 100 m, bosque pluvial tropical, suelos pobres con alta saturación de aluminio, árbol 7 m, 17 may 1989 (fr), *M. Monsalve 3026, D. Daly, R. Callejas* (holotipo: CUVC 56885); isotipo: MO).

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia leptandra* (Cuatrec.) Cuatrec., from which it differs in its small tree size, 5-8 m tall (vs.8-15 m tall for *M. leptandra*), linear-lanceolate or lanceolate leaves with 2-3(4) pairs of secondary veins located in the distal half of the blade (vs. obovate-elliptical or oblong leaves with 2(3) pairs of secondary veins located in the distal third of the blade), verticillate floral bracteoles, linear-subulate, 16-20 mm long (vs. subverticillate floral bracteoles, linear, 6-8 mm long), and fruit narrowly ellipsoid, truncate-rostrate, 33-35 × 25-27 mm (vs. ovoid-fusiform fruit, apiculate, 25-31 × 20 mm).

**Arbolitos** hasta de 5-8 metros, con ramas primarias gráciles, verticiladas. **Ramas** jóvenes cilíndricas, ligeramente flexuosas en la zona distal (en zig-zag), con abundante indumento marrón fino, equinado-estrellado, con apariencia finamente flocosa. **Yemas terminales** laxas, con escasos catáfilos estipulares linear-subulados, 8-11(-13) mm de longitud, incurvos, laxamente dispuestos, con fino indumento equinado-fasciculado. **Hojas** coriáceas o subcoriáceas; **estípulas** caducas, muy largas, linear-subuladas, c. 15 mm longitud × 1,5 mm de ancho en su base, estriadas longitudinalmente; **pecíolos** cilíndricos, 20-30 mm de longitud, hasta 40 mm en arbolitos jóvenes; con pulvínulos cilíndricos poco resaltados; **láminas** linear-lanceoladas a estrechamente lanceoladas (**Figura 3S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323), 20-25(-30) × 2,5-3,5(-4) cm, (6-8 veces más largas que anchas); ligeramente asimétricas en la base, base redondeada o subcuneada, ápice gradualmente acuminado o a veces caudado, con apéndice 8-10 × 3-5 mm; con la **vena media** y dos venas subasales que convergen cerca de la base del limbo, las tres largamente prolongadas en el limbo, además un par de venas submarginales muy tenues con 2-3(-4) venas secundarias a cada lado de la vena media, erecto-patentes, arqueadas, dispuestas en la mitad distal de la lámina; vena media y el resto de las venas primarias excavadas por el haz y muy resaltadas en el envés; venación de tercer orden paralela y perpendicular a la vena media poco resaltada en el haz y manifiesta en el envés, venación de cuarto orden poligonal, sólo conspicua en el envés; **haz** lustroso, glabrescente y áspero, con indumento equinado-lepidoto muy fino, más conspícuo en las hojitas jóvenes; envés más pálido con indumento echinado-lepidoto uniformemente distribuido. **Flores** solitarias, opuestas a las hojas en las zonas terminales de las ramas jóvenes, aparentemente erectas

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327




**Figura 2.** ***Matisia buenaventurae*** Fern.Alonso. **A.** Holotipo *Monsalve 3026* (CUVC 56885), detalle de una ramita axilar con un brote floral opuesto a una hoja, mostrando las tres bractéolas. **B.** Detalle de una rama con dos frutos maduros mostrando las estípulas persistentes, las bractéolas subuladas en la base del cáliz y el fruto apiculado-rostrado.

en las ramas. **Pedicelo floral** c. 8-10 mm de longitud, más corto que el pecíolo; flores en antesis no vistas. **Pedúnculo** del fruto rígido, más corto que las estípulas persistentes y más corto también que el pecíolo de la hoja adyacente (**Figura 2**), de c. 9-10 mm long y 2-2,5 mm, engrosado en el extremo distal, con tres **bractéolas** dispuestas en forma verticilada en posición erecta y distal, bractéolas linerar-subuladas, persistentes, 16-20 mm × 1,5 mm en su zona media, con indumento estrellado-fasciculado. **Cáliz fructífero** ligeramente acrescente, campanulado, (15-)23-28 × 22-25 mm, sin costillas y rasgado hasta su zona media; tubo del cáliz 12-15 mm de largo, con 2-3 lóbulos, triangulares o trapezoides, amplios, 9-12 mm de

largo, externamente marrones con fino indumento equinado-fasciculado, interiormente con indumento largamente híspido, amarillento, c. 2 mm de longitud. **Fruto** amarillo-verdoso, estrechamende elipsoide, truncado-rostrado distalmente, 33-35 × 25-27 mm, exteriormente 5-sulcado en la madurez, con proyecciones obtusas y con pico cilíndrico, truncado, 3-5 × 3-4 mm (en seco); **mesocarpo** fibroso pulposo, con cinco **pirenos** fusiformes corneo-leñosos, 15-20 mm de longitud; **exocarpo** liso con indumento lepidoto y equinado-lepidoto, ferrugíneo y brillante.

**Etimología.** El nombre hace referencia a la localidad clásica, los bosques pluviales del municipio de Buenaventura, Valle del Cauca, en el corredor del Pacífico de Colombia.

**Distribución y hábitat.** Especie endémica aparentemente muy local, en un sector del Bajo Calima, en el departamento del Valle del Cauca. Crece en los bosques pluviales (c. 7000 mm de precipitación) en zonas de relieve ondulado, con colinas bajas, sobre suelos arcillosos impermeables, ácidos y pobres en nutrientes (**Faber-Langendoen,** 1992). Es una especie propia del estrato de sotobosque de los bosques primarios, que se encuentra también en los bosques secundarios recientes donde se ha indicado como especie codominante (Isidoro Cabrera, *in schaedis*).

**Fenología.** Sólo se conoce en fructificación en los meses de enero y mayo.

**Notas taxonómicas.** Hay una posible segunda localidad no confirmada en los bosques húmedos del departamento de Córdoba, Montelíbano, 510 m, (colección *P. Trujillo 1896 et. al.* (JAUM 40444). Se trata de un árbolito infértil que se ajusta bien en los caracteres vegetativos (brácteas de las yemas terminales y la morfología y venación foliar) a *M. buenaventurae.* No obstante, al presentar también alguna afinidad con la especie *Matisia sanblasensis* (A. Robyns) Cuatrec., presente en el norte y noreste de Colombia, no podría confirmarse esta posible nueva localidad sin el estudio de material fértil.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA. **Departamento del Valle del Cauca**: Buenaventura, Bajo Calima, 50 m, bosque primario y vegetación secundaria sobre relieve ondulado; suelos impermeables de arcilla gris claro, arbolito 2,5 m, estéril, 8 jul 1987, *I. Cabrera 15614 et al.* (CUVC 20568, 20569 (**Figura 2A**)); ibídem, Bajo Calima, Concesión Pulpapel, bosque húmedo tropical, 3º55'N 77º00'O, 100 m, 26 ene 1988 (fr), *H. van der Werf 9688 & M. Monsalve* (CUVC 18091, MO).

**3. *Matisia chocoensis*** Fern. Alonso, sp. nov. (**Figuras 3, 4, 4S-7S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)

**TIPO.** COLOMBIA**. Departamento del Chocó**: vía de Istmina a Pie de Pepé, Cerros de La Mojarra, 150 m, 7 dic 1990 (fr), *J.L. Fernández-Alonso 8613, F. García, E. Rico Hernández, M. Velayos* (holotipo: COL 422774; isotipos: MA 524870, MA 534698(2), CHOCO, BM 013824910).

=*Matisia leptandra* (Cuatrec.) Cuatrec. f. *brachypoda* (Cuatrec.) Cuatrec., ***nom. nud.,*** [*in schaeda*]. COLOMBIA: departamento del Valle, *J. Cuatrecasas 17739* (BR 000000696 1022 (**Figura 4S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)).

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia idroboi* Cuatrec., from which it differs by having a floral pedicel of (9-)10-12 mm (vs. floral pedicel of (18-)20-35 mm in *M. idroboi*), linear or linear-lanceolate bracteoles, subterminal on the pedicel and near the base of the calyx, 4-8(-10) × 1-2 mm, and not joined together (vs. oval-lanceolate bracteoles, acute, 8-15 × 3.5-5 mm, terminal on the pedicel and joined together at their base), fruiting peduncles 12–16 mm, with separate, ascending bracteoles (vs. fruiting peduncles (30-)35-55 mm, with bracteoles joined in calyculus at base of the calyx), and fruit calyx uniformly 10-winged, wings c. 1 mm high (vs. fruiting calyx with 5 long (raised) wings and 5 shorter wings, the larger wing 2-2.5 mm high).

**Árboles** caducifolios 10-20(-30) m, con ramificación verticilada. **Ramas** patentes o péndulas; ramas jóvenes, pecíolos y pedicelos con indumento corto, tuberculado-fasciculado, densamente dispuesto, de aspecto granuloso o flocoso**. Yemas** terminales amplias, globoso-cónicas o globoso-lobadas, generalmente tan anchas o más que las ramitas,

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

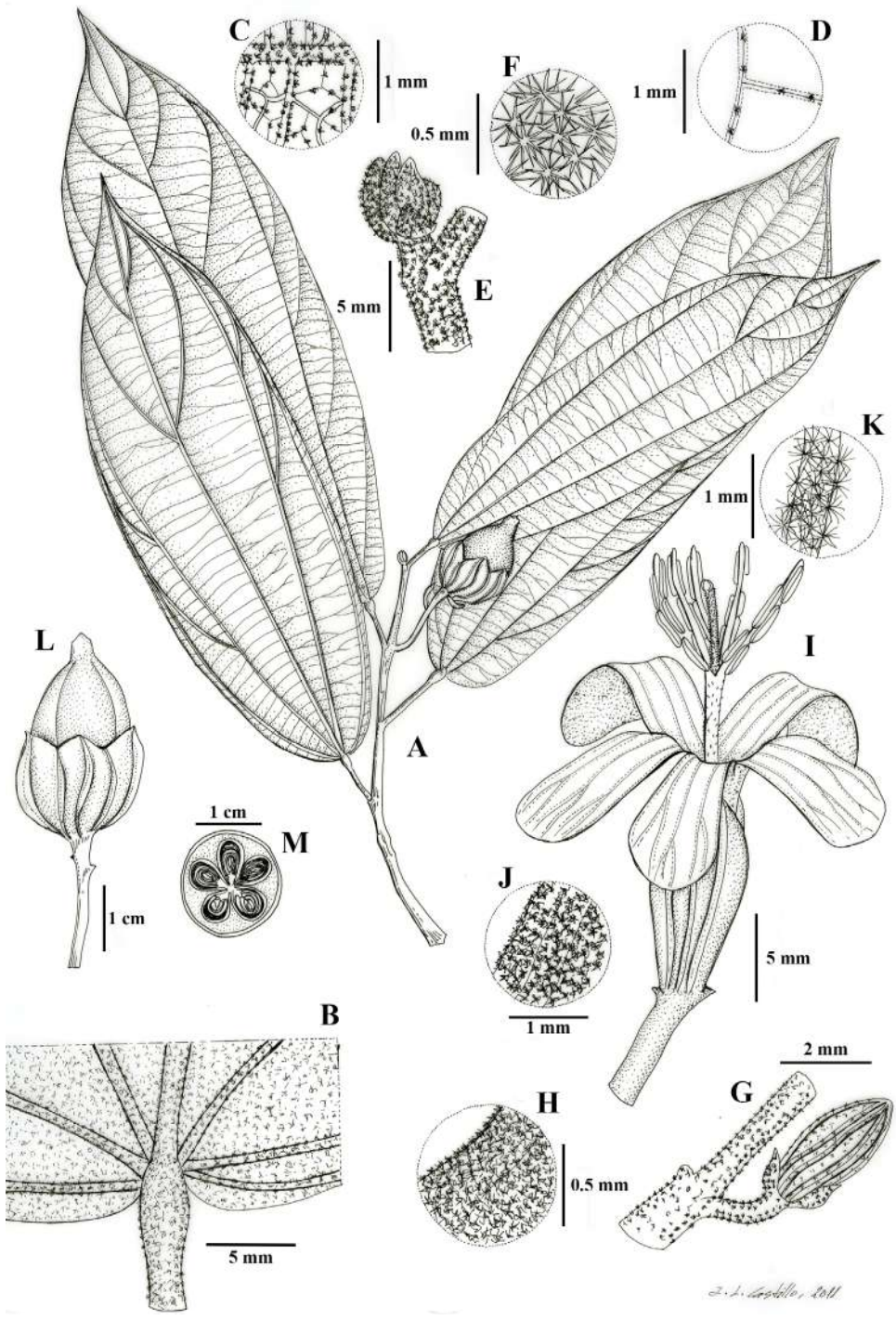



**Figura 3.** ***Matisia chocoensis*** Fern.Alonso. **A.** Rama terminal con fruto. **B.** Parte distal del pecíolo con pulvínulo y base de la hoja por el envés. **C.** Detalle del indumento foliar por el envés. **D**. Indumento por el haz. **E**. Detalle de la yema terminal con los catáfilos en la rama. **F**. Indumento del catáfilo de la yema. **G**. Botón floral con su pedicelo y bractéolas en posición distal. **H.** Indumento del botón floral. **I**. Flor en antesis en vista lateral. **J.** Indumento externo del cáliz floral. **K.** Indumento del estilo. **L**. Fruto maduro acompañado del cáliz fructífero en vista lateral. **M.** Sección del fruto mostrando los cinco pirenos desarrollados [A-F y L-M, a partir de *J.L. Fernández-Alonso 8613* (COL, MA); G-H, a partir de *J.L. Fernández-Alonso 8609* (COL); I-K, a partir de *A. Gentry 17619* (COL)]. Lámina elaborada por J.L. Castillo, (RJB).

con 4-6 catáfilos anchamente lanceolados, 4-6 × 2-3 mm, convexos, recurvados en sus margenes y obtusos apicalmente, y densamente cubiertos de indumento marrón ferrugíneo o anaranjado, tomentoso-flocoso, o tomentoso-lepidoto con ligero brillo (**Figura 6S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323). **Hojas** dispuestas de modo dístico, discóloras con envés de color verde más pálido; **estípulas** lanceoladas, c. 3-4 × 2 mm, muy prontamente caducas; cicatrices estipulares lineares, transversales en la ramita; **pecíolo** 12-18 mm de longitud, o hasta de 30-35 mm en plantas jóvenes y arbolitos; **láminas** verde intenso, generalmente cartáceas, a veces ligeramente ampollosas (bulladas), ásperas al tacto, estrechamente oblongas o menos frecuentemente obovadas, 15-25 × 6-9,5(-10,5) cm, redondas o levemente cordadas en la base; raramente con senos basales de 2-5 mm de profundidad, y acuminadas con acumen c. de 15 × 5 mm; con cinco venas basales, dos de ellas submarginales, poco conspicuas, que llegan sólo al ¼ inferior de la lámina; tres **venas** centrales que recorren toda la lámina hasta el ¼ distal; **vena media** con 1-2 venas secundarias ubicadas en el tercio superior de la lámina; venación de tercer orden paralela y perpendicular a las venas primarias y secundarias, venación de cuarto orden reticulada, poco conspicua; con **indumento** ferrugíneo, estrellado corto, áspero al tacto por el haz y con abundante indumento estrellado, suave al tacto por el envés. **Flores** opuestas a las hojas, dispuestas a lo largo de las ramas terminales. **Botón floral** ovado-elíptico a estrechamente fusiforme, con tres bractéolas en posicion distal y verticilada en la base

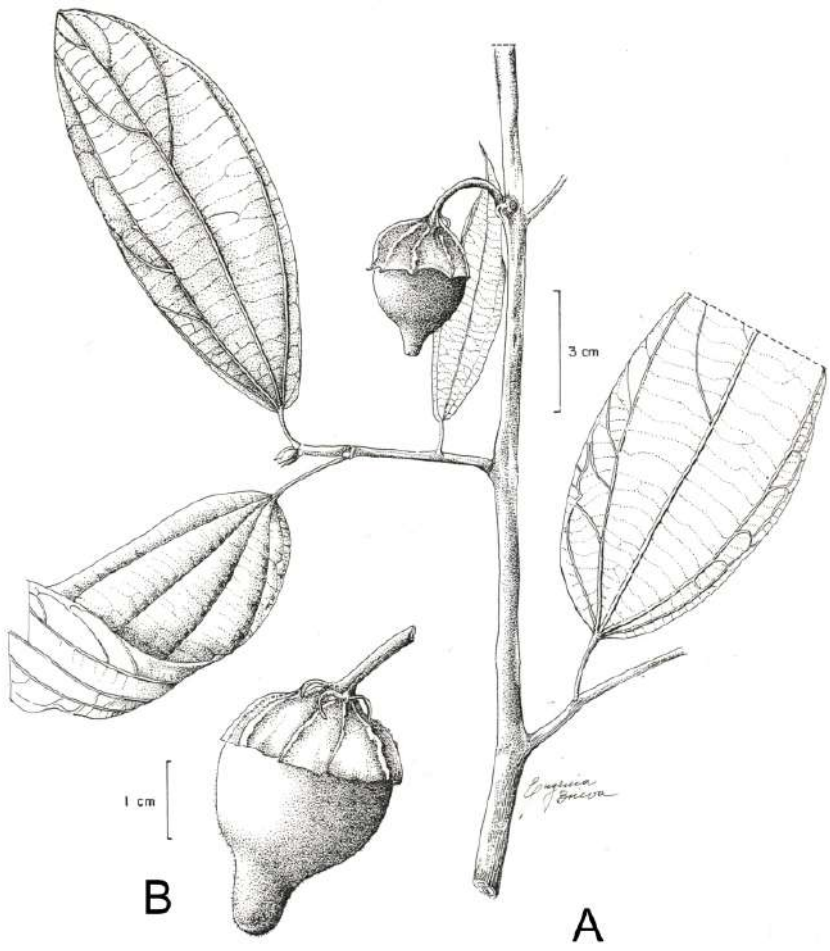



**Figura 4.** ***Matisia chocoensis*** Fern. Alonso. **A**. Ilustración de rama de la planta con frutos. **B.** Detalle del cáliz con las bractéolas persistentes y el fruto maduro [A partir de *G. Galenao 5097* (COL 459631)]. Lámina elaborada por Eugenia de Brieva (ICN-UN).

del cáliz, arqueado ascendentes, cáliz con diez costillas longitudinales y subobtuso en el ápice (**Figura 6S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323). **Pedicelo floral** 9-12 mm de longitud, con indumento tuberculado-fasciculado densamente dispuesto, con 3 **bractéolas** agrupadas en posición subterminal por debajo del cáliz, brácteolas libres, estrechamente lanceoladas o lineares, 6-10 × 1-1,5 mm de longitud arqueado-ascendentes; **cáliz** verde, subcilíndrico, 12-14 mm de longitud, rematado en 4-5 dientes cortos, c. de 2 mm, anchamente triangulares, con 10 alas uniformes, no o levemente onduladas y poco elevadas (1-2 mm de alto), que recorren el cáliz desde la base hasta el ápice, con indumento externo equinado-flocoso; **corola** blanca, patente o levemente reclinada en la antesis, **pétalos** anchamente espatulados, 22-24 mm de longitud y hasta 4-5 mm y obtusos en la zona distal, con indumento seríceo adpreso, más o menos disperso en su cara externa y glabros en la cara interna; **androceo** con **columna estaminal** blanca c. 20 mm de longitud, subglabra, con escasos pelos glandulares, al igual que las **ramas estaminales**, estas 8-10 mm de longitud, gráciles y sinuoso-zigzagueantes, con 4-5 tecas/rama muy alargadas c. 1,5-2 mm de longitud y disgregadas a lo largo de la rama, a veces con una teca en forma de herradura que conecta la base de dos ramas contiguas. **Estilo** 22-24 mm de longitud, blanquecino, densamente sericeo-estrellado , **estigma** notablemente estrecho y alargado, de 2 × 1 mm. **Pedúnculo fructífero**, rígido, arqueado ascendente, 12-16 × 1,5 mm, raramente hasta 20 mm (*Galeano 5097*), conservando generalmente las bractéolas (no acrescentes), arqueado-ascendentes en la parte distal del pedúnculo (**Figura 7S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323); con **cáliz fructífero** persistente acampanado-cupular, 15 × 22-25 mm, con 10 alas ligeramente sinuosas 1-2 mm de alto, irregularmente lobado-rasgado en la parte distal, recubriendo de 1/3 a la mitad del fruto; **Fruto** color marrón, ovoide apiculado o largamente apiculado rostrado, 32-34 × 25 mm, en seco 5-sulcado con apiculo llamativo, cilíndrico, 5-8 × 3 mm; **exocarpo** marrón, equinado-lepidoto, con ligero brillo; **mesocarpo** y superficie del pireno densamente fibrosa; **pirenos** generalmente los cinco desarrollados, corneo-leñosos, fusiforme-elipsoides, de sección oval, ligeramente comprimidos lateralmente, c. 18-20 × 6 mm y pared del endocarpo 1,5 mm de grosor, con su cara interna marrón, lustrosa.

**Etimología.** El nombre hace referencia al Departamento del Chocó y a la región del Chocó biogeográfico (**Poveda et al.,** 2004), donde crece esta especie endémica.

**Nombres comunes y usos.** "zapotillo", *G. Galeano 5097* (en Nuquí, Chocó); "vaina", *Mosquera 35*, en el Mpio. Unión Panamericana.

**Distribución y hábitat**. Restringida en el litoral pacífico de Colombia a los bosques muy húmedos y pluviales de zonas bajas de los departamentos de Chocó y Valle. Se encuentra a menudo asociada a quebradas y cursos de agua, donde crece cerca de las congéneres *M. leptandra* y *M. pacifica* Fern.Alonso

**Fenología.** De acuerdo con los registros conocidos, esta especie se encuentra en floración preferentemente entre mayo y agosto, habiéndose recolectado con frutos en marzo, mayo, y diciembre.

**Notas taxonómicas.** Se diferencia bien de otras especies con el cáliz 10-alado, como *M. idroboi*, *M. jefensis* (A. Robyns & S. Nilsson) W.S. Alverson, y *M. rufula* Fern.Alonso, por sus bractéolas menos desarrolladas, estrechas y no unidas entre ellas ni a la base del cáliz. Además, el cáliz fructífero presenta alas de tamaño uniforme, no sinuosas y muy poco elevadas (c. 1 mm) y el fruto con apículo muy prolongado.

Se estableció la identidad de la colección *Cuatrecasas 17739* (BR) de Cajambre, Valle, que fue identificada originalmente en herbarios como *Matisia leptandra* (Cuatrec.) Cuatrec *f.*[forma] *brachypoda* (Cuatrec.) Cuatrec., *nom. nud.*, con la especie nueva que aquí se describe. Los cortos pedicelos florales, los cálices fructíferos con alas uniformes y el indumento equinado, áspero al tacto de esta colección, la separan bien de *M. leptandra* s. s. y la asocian con *M. chocoensis,* tal como aquí se ha circunscrito.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA. **Departamento del Chocó**: Municipio de Bahía Solano, Parque N.N. Ensenada de Utría, camino de Boroboro al salto de Mutatá 06º07'N, 77º24'O, 2 may 1990 (fl), *C. Barbosa 6340*

(COL 467932, FMB 30079, HUA 130426;); municipio de Istmina, alto río San Juan, estribaciones del Cerro La Mojarra, 80-100 m, 26 jun 1983 (fl), *J. Espina et al. 1336* (CHOCO 189, COL 407899, 500044, U 118650); ibídem, Istmina, sector de Pepé, cerca del río Peradó, bosque húmedo tropical, árbol 15-17 m, 5 dic 1990 (fr), *J.L. Fernández et al. 8506, 8506b* (BM 013824910; COL 510162, MA); Salida de Istmina a Pie de Pepé, 150 m, 5 dic 1990 (fr), *J.L. Fernández et al. 8531* (BM 13824888, COL 422773, CR 203327, MA 524878, US 3239164); ibídem, Cerros de La Mojarra, 150 m, 7 dic 1990 (fr), *J.L Fernández-Alonso et al. 8609* (COL 422772, COL 510159, MA 524869, MA 708032); Mpio. de Quibdó, Km 7 en la via Quibdó a Yuto, bosque entresacado, 300 m, infértil, 13 ago 1998, *J.L. Fernández-Alonso et al. 16721* (CHOCO, COL 421872, COL 421891, COL 421892, FMB 75091); ibídem, *J.L. Fernández-Alonso et al. 16731* (COL 421871, 421872); ibídem, Mpio. de Nuquí, Coquí, quebrada Trapiche al SO de Coquí, 100-160 m, 5º32'N 77º15'O, estéril, n.v.: "zapotillo", feb 1994, *G. Galeano et al. 5064*a (COL 408185, COL 408380); Cabo Corrientes, municipio de Nuquí, Estación Biológica El Amargal, (fr), n.v. "zapotillo", 1994, *G. Galeano 5097* (COL 459630, COL 459631, MA); municipio de Bahía Solano, Parque N.N. Ensenada de Utría, Camino de Boroboro 06º21'N 76º26'O, árbol estéril, 26 ago 1990, *F. García et al. 1799* (FMB 41202); 2 km al S de Las Ánimas, en la vía a Istmina, 150 m, bp-T, árbol 25 m, 13 ago 1976 (fl), *A. Gentry et al. 17619* (COL 169873, BR 0000027975657); Mpio. Unión Panamericana, El Salero, margen derecho de la Quebrada Candelaria, BpT, 135 m, 5º18'N 76º36'W, árbol 30 m, estéril, n.v. "vaina", 13 dic 1998, *C. Mosquera 35* (COL 459687); Mpio. de Lloró, Granja CODECHOCO, arbolito estéril, 20 ago 2001, *L. Palacios 15* (COL 475731); ibídem, 16 sep 2001, *L. Palacios 186* (COL 476927); municipio de Baudó, Comunidad Cantón de san Pablo, árbol [CCS-9-4-53A] mar 2014 (fr), *Y. Rodriguez 53* (MA 964087, UDBC); ibídem, Comunidad de Pizarro, árbol infértil, mar 2014, *Y. Rodríguez 104* (MA 964201, UDBC); Ibídem, Bahía Solano, corregimiento El Valle, colinas detrás del Almejal, 30 m, árbol 13 m, 2 oct 1983 (fr), *D. Sánchez 589* (HUA 20505, MEDEL 19315). **Departamento del Valle del Cauca:** Buenaventura, 2014 (fr), *J. Baquero 19-475* (UDBC, MA); Costa del Pacífico, Río Cajambre, Quebrada del Corosal, 0-5 m, 17 may 1944 (fr), *J. Cuatrecasas 17739* (BR 000000696102); ibídem, Buenaventura, Bahía Málaga, Comunidad La Plata, bh-T, 3º56'N 77º10'O, 70 m, 8 jul 2014, *R. González et al. 2606* (FMB 107314).

**4. *Matisia littlei*** Fern.Alonso, sp. nov. (**Figuras 5, 8S, 9S, 10S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)

**TIPO:** COLOMBIA. **Departamento del Huila:** cordillera Oriental de Colombia, municipio de Baraya, 15 km al E de Baraya, hacienda Pensilvánica, árbol de bosque húmedo templado, aislado (residual) en pastizal, 2400 m, árbol 15 m, 23 jun 1944 (fr), *E.H. Little 8130* (holotipo: COL 63546 (**Figura 8S A,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323); isotipo: US 3514564/ cb 01222034).

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia samariensis* Cuatrec., from which it is distinguished by having leaves with apiculate laminae, the apiculum 12-15 × 8 mm (vs. obtuse or remotely apiculate laminae in *M. samariensis*), fruiting peduncle (4-)4.5-6 cm long (vs. fruiting peduncle 3-3.5 cm long), calyx in fruit unevenly ragged, covering up to 1/3 of the fruit (vs. fruiting calyx with more or less uniform margin, covering c. ½ of the fruit), and fruit 48-50 × 55 mm, with pyrenes 4 cm long and endocarp wall 3-4(-5) mm thick (vs. fruit c. 30 × 33 mm, with pyrenes c. 25 mm long and wall 1.5-2 mm thick).

**Árboles** 6-15 m de alto, con ramificación verticilada y ramas principales horizontales o colgantes; tronco y ramas con corteza gris, lisa. **Ramas jóvenes** subcilíndricas estriado-fisuradas, ligeramente anguloso-plegadas longitudinalmente (en seco), ramas y pecíolos con ligero indumento ferrugíneo tomentoso; con abundantes ramitas cortas con escasas hojas o con hojas acampañadas de una flor opuesta a la hoja. **Yemas** terminales pequeñas, cónicas, 2-3 × 2 mm, negruzcas, glabrescentes. **Hojas** con pecíolo marrón-negruzco, 13-18(-20) mm de longitud, rugoso en seco, de aspecto glabro; **estípulas** inconspícuas; **láminas** coriáceas o a veces cartáceas, lustrosas en haz y envés, oliváceas en seco en

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

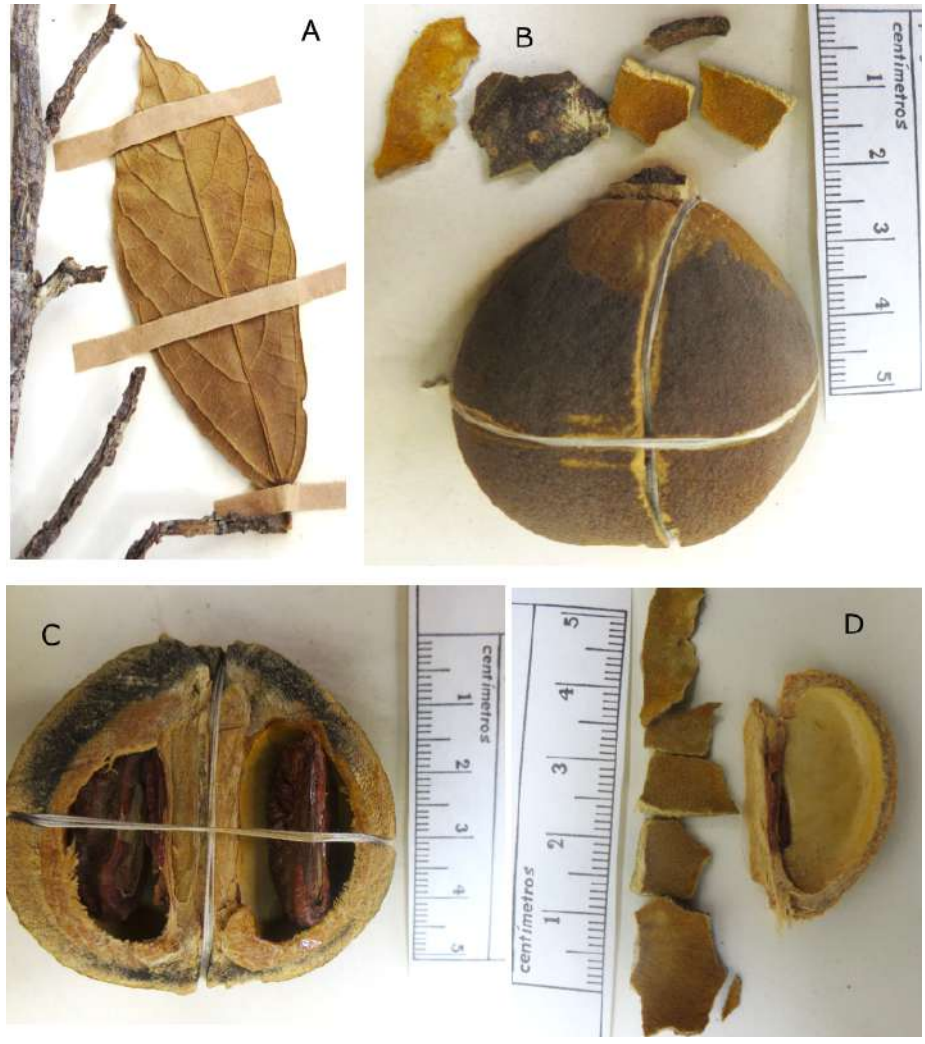



**Figura 5.** ***Matisia littlei*** Fern.Alonso. Detalles del holotipo *Little 8130* COL. **A.** Aspecto de las ramas de último orden y de la hoja por el envés. **B.** Vista interna del corte sagital del fruto maduro leñoso, con dos pirenos abiertos y sus semillas. **C.** Aspecto finamente tuberculado del exocarpo del fruto maduro y de la cara interna del cáliz fructífero residual. **D.** Detalle de la pared interna córnea y lustrosa de un pireno y de los restos de la cubierta calicina en su cara interna.

ambas superficies, oblanceoladas a estrechamente oblongas, (6-)10-13 × 3-4,5(-5) cm; redondeadas en su base y notoriamente apiculadas distalmente, con apículo 12-15 × 8 mm; **venas basales** tres, la media muy marcada y las dos laterales muy cercanas al margen foliar; venas secundarias 3(-4) a cada lado de la vena media, en ángulo agudo y erecto-patentes con respecto a la vena media, ubicadas en la mitad distal de la lámina; **venas secundarias** notoriamente broquidódromas en la margen; venación de tercer orden perpendicular y las de 4º y 5º orden poligonal-reticuladas, escasamente visible en haz y envés; haz y envés glabro, con la venas principales excavadas en el haz y resaltadas en el envés. **Flores** solitarias y en posición erecta en las ramas, opuestas a las hojas en las ramas cortas; **pedicelo floral** marrón ferrugíneo, 31-36 mm de longitud, arqueado, erecto-ascendente en las ramas; sin bractéolas visibles; **cáliz** subcilíndrico ligeramente ensanchado en el tercio distal, 25 mm de longitud y 12 mm de ancho en la zona distal; tubo 18 mm de longitud con 3-4 dientes distales, triangulares, 6-7 mm de longitud, en el exterior marrón-ferrugíneo con indumento fino, estrellado-lepidoto; interiormente con indumento amarillento seríceo, simple y adpreso.

Corola y androceo no vistos. **Pedúnculo fructífero** (4-)4,5-6 cm de longitud, estriado (en seco), c. 2 mm de grosor en la mitad distal, con indumento fino estrellado-lepidoto; **cáliz fructífero** cupular, patente o ligeramente recurvado, no ceñido al fruto, 3-4 × 1,5 cm, 3 mm de grosor cerca del pedúnculo y 1,5 mm hacia el margen; con margen distal irregularmente rasgado, en 3-4 lóbulos desiguales, quebradizo al secarse, recubriendo el fruto ¼ a 1/3 de su longitud, externamente reticulado con indumento estrellado-lepidoto, internamente de aspecto seríceo, con pelos amarillentos simples, adpresos. **Fruto** marrón negruzco, 48-50 × 55 mm, leñoso, esférico pero ligeramente achatado en el ápice y con una depresión central anular 5-6 mm de diámetro, en frutos inmaduros c. 35-40 × 40 mm (espécimen *Prieto 20203*); **epicarpio** áspero-rugoso, con superficie finamente microtuberculada, reticulada y con fino indumento fasciculado-lepidoto; epicarpio y **mesocarpo** poco grueso, leñoso, (3-)4-6 mm de grosor, de aspecto granuloso; **pirenos** generalmente 5 desarrollados, estrechamente ovoides, comprimidos lateralmente, guesos, 4 cm de longitud y 2,3 cm de ancho, con pared del endocarpo corneo-leñosa compacta, 3-4(-5) mm de grosor; semilla estrechamente reniforme, ligeramente comprimida lateralmente, 25-30 × 15 × 12 mm, con testa marrón-rojizo oscuro, ligeramente lustrosa, con pliegues longitudinales (en seco), germinación de tipo criptocotilar.

**Etimología.** Especie nombrada en honor al botánico estadounidense Elbert H. Little (1907-2004), que recolectó en Colombia en la década de 1940 las muestras seleccionadas aquí como material tipo de esta especie. Fué dendrólogo del Servicio Forestal de los Estados Unidos por mas de 30 años (**Anónimo,** 1993) y entre otros muchos descubrimientos en flora neotropical, dió nombre a tres especies de los géneros *Matisia* y *Quararibea* de Ecuador y del sur de Colombia (**Little,** 1948).

**Distribución y hábitat.** Especie conocida sólo de tres localidades de la vertiente occidental de la Cordillera Oriental, en los departamentos de Huila y Tolima, en la vertiente al río Magdalena. Se conoce de los bosques húmedos de la franja subandina, entre los 2300 y 2500 m. Ha sido recolectada en ambiente de bosques entresacados dedicados a pastos con arbolado residual, donde se ha utilizado para sombrio.

**Fenología.** Se conocen registros de floración de marzo y octubre y de plantas con frutos en marzo y julio.

**Nombres comunes y usos.** Los nombres registrados para esta especie son "guaymaro de montaña" en la zona de Baraya, Huila, la localidad tipo y "sapote" en Planadas, en el Tolima. El nombre sapote se aplica a otras muchas especies de este género en Colombia; sin embargo, el de "guaymaro o guáimaro" suele aplicarse primordialmente en Colombia a *Brossimum utile* (Kunth) Oken, especie maderable de la familia Moraceae (**Pacheco & Delgado**, 2013).

**Notas taxonómicas**. Se conoce una muestra con hojas subcoriáceas hasta de 20 × 8 cm y pecíolos de 2,4-3,2 cm (*Little 8866*), que probablemente corresponda a una rama joven o rebrote basal recogido en el árbol. Esta sería una de las pocas especies de *Matisia* que vive en los Andes en zonas altas, por encima de los 2300-2400, ya en la zona de bosque de niebla altoandino, al igual que *M. lozanoi* Fern.Alonso (Cordillera Oriental de Colombia) y *Matisia bolivarii* Cuatrec. (con distribución mas amplia en Colombia y Ecuador). En el reciente catálogo de las plantas de Colombia (**Fernández-Alonso,** 2016), las colecciones conocidas de la especie aquí descrita fueron tratadas tentativamente bajo el nombre de *M. samariensis* (Cuatrec.) Cuatrec. s.l. (departamento del Huila), colecciones que ahora se asignan a un taxón independiente, distribuido en los departamentos de Tolima y Huila y no en Norte de Santander, en la vertiente oriental de la Cordillera Oriental, donde crece *M. samariensis* (**Cuatrecasas**, 1948).

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA. **Departamento del Huila:** cordillera Oriental, 25 km al ESE de Baraya, Campo La Brisa, árbol común de bosque húmedo templado, árbol 15 m, 30 cm dap, 28 oct 1944(fl), *E.H. Little 8866* (COL 58180). **Departamento del Tolima**: Municipio de Planadas, vereda Puerto Tolima, cobertura de pastos arbolados, 2498 m, árbol 6 m, 25 mar 2013 (fl, fr), *C.M. Prieto 20303 & V. Jiménez* (COL 575330/cb COL 000420644, (**Figura 10S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

**5. *Matisia macropoda*** Fern.Alonso, sp. nov. (**Figuras 6, 11S, 12S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)

**TIPO:** COLOMBIA. **Departamento de Córdoba:** Municipio de Tierralta, vereda Zancón, río Manso, finca Nueva Ilusión, Parque N.N. Paramillo, 7º39'N, 76º5'O, 196 m, árbol 12 m, 12 jun 2009 (fl), *A.C. Estupiñan 400, D. Jiménez, P. Hernández, R. Ruíz, M. Molina* (holotipo COL 371378; isotipo COL 533551).

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia castano* H. Karst. & Triana, from which it is distinguished by having chartaceous laminae (vs. membranaceous laminae), floral pedicel 12-14.5 cm long × 4-8(9) mm thick (vs. floral pedicel 4-6 cm long × 2-3 mm thick), yellow corolla, 55-65 mm long (vs. white corolla, 45-50 mm long), and fruit ovoid-conical, with cupular-patellate calyx, clearly separated and not closely attached to the base of the fruit (vs. fruit globose with cupular calyx fruit, attached to the fruit, covering it up to the middle).

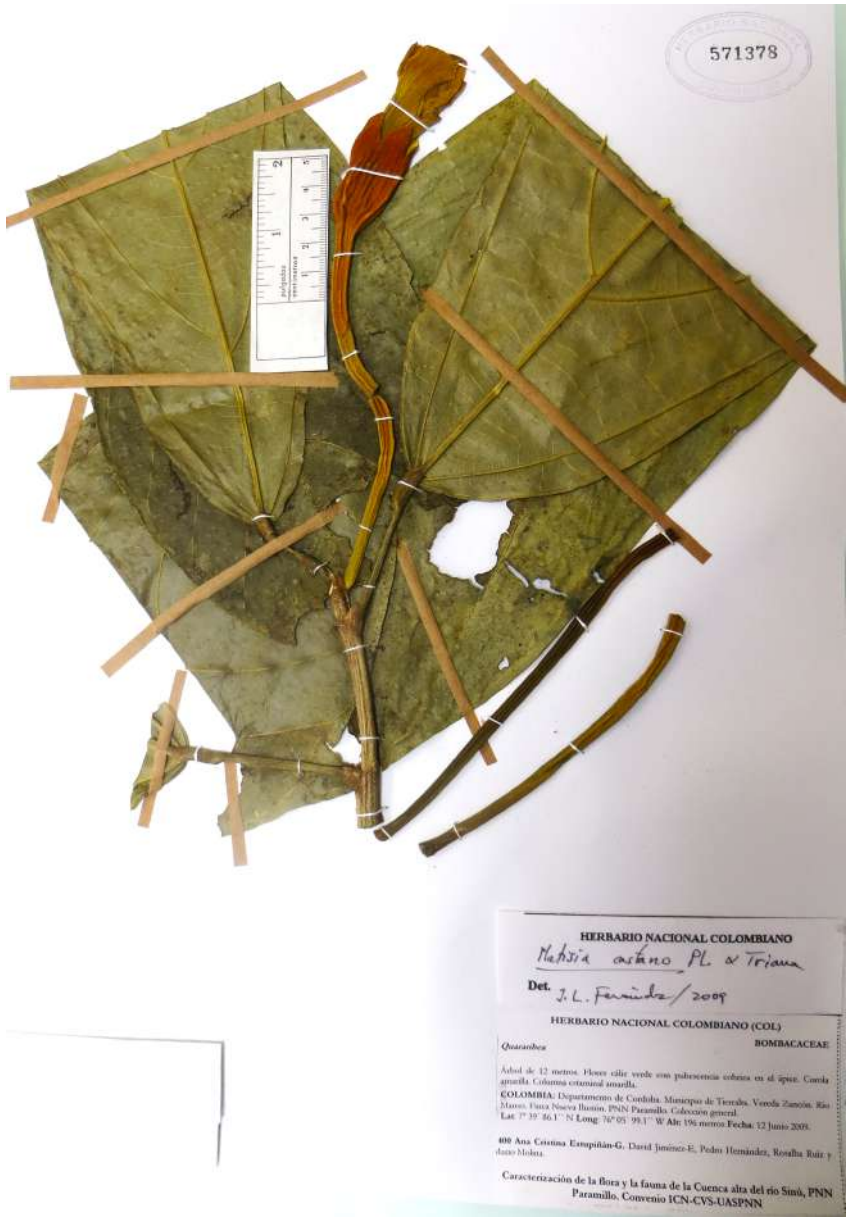



**Figura 6. *Matisia macropoda*** Fern.Alonso. Holotipo *C. Estupiñan 400* (COL 571378).

**Árboles** 5-12 m de alto; **ramas** de último orden marrón claro (en seco), cilíndricas, 8-10 mm de diámetro, con corteza nodosa, finamente estriado-reticulada. **Yemas** terminales generalmente más estrechas que el eje de la rama, cónicas, compactas, 3-4 × 3-4 mm, con 3-4 catáfilos estrechamente triangulares, ligeramente separados entre sí, con indumento marrón amarillento, aterciopelado, muy fino, equinado-tuberculado. **Hojas** ligeramente agrupadas al final de las ramas; **estípulas** prontamente caducas, dejando cicatrices transversales, lineares, estrechas, 3-4 × 1 mm; **pecíolos** verde pálido, largos, 6-10 cm × 3-4 mm de grosor, con pulvínulos notorios, el proximal 0,6-1 cm × 0,5 cm y el distal 1,5-1,9 × 4-5 mm; glabrescentes, con indumento diminuto equinado-tuberculado; **láminas** ligeramente lustrosas, verde-oliváceo pálido (en seco); cartáceas, oblanceoladas a estrechamente oblongo-oblanceoladas, 45-55(-60) × 12-20 cm, base cuneada a redondeado-cuneada y ápice agudo, acuminado, acumen 2,5-3,5 × 1-1,2 cm; margen uniforme, ligeramente revoluto; con 3 **venas basales**, la central muy engrosada, plana y canaliculada en el envés (en seco) y las otras 2 basales, submarginales; raramente con dos venas adicionales cerca del margen, muy poco conspicuas; con 5-6 **venas secundarias** a cada lado de la vena media, ubicadas en los 2/3 distales de la lámina; venas terciarias perpendiculares a las secundarias y venas de 4º y 5º orden de tipo poligonal reticulado, poco conspícuas por el envés; venación impresa en la haz, ligeramente ampollosa (bullada) y venación resaltada en el envés; láminas glabrescentes por el haz y con indumento estrellado diminuto y disperso por el envés. **Flores** generalmente dispuestas al final de ramas cortas, aparentemente opuestas a las hojas. **Botón floral** estrechamente elipsoide, 3,8 × 2 cm, uniformemente recubierto de indumento fino, marrón-anaranjado, equinado-tuberculado; **pedicelo** floral 12-14,5 cm de longitud, 4 mm de grosor en su mitad basal y 8-9 mm de grosor en su parte distal, de aspecto reticulado o estriado (en seco), con indumento marrón aterciopelado, suave al tacto, equinado-tuberculado; **bractéolas** no presentes; **cáliz** verde con pubescencia cobriza, marrón (en seco); estrechamente elipsoide, 40-45 × 18-22 mm, tubo cilíndrico, c. 30 mm de longitud, rematado en cuatro o cinco dientes uniformemente triangulares, agudos, 10-12 × 8-9 mm; ligeramente estriado longitudinalmente (18-20 surcos longitudinales); en su cara externa con el indumento marrón anaranjado, equinado-tuberculado descrito en el botón, e internamente con el característico indumento seríceo, adpreso; **corola** con pétalos amarillos, papiráceos, en posición erecta o erecto-patente en la antesis, anchamente espatulados (**Figura 11S C,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323), 55-65 × 15-17 mm, obtuso truncados en el ápice y atenuadas en el tercio basal, c. 3 mm de ancho, con indumento amarillo estrellado muy fino y denso en la cara externa y en su cara interna, glabrescentes en la mitad distal y con pelos simples o de escasos radios, adpresos en la mitad inferior; **androceo** con columna estaminal amarilla, 64-67 mm de longitud y 2-3 mm de grosor, con denso indumento fino estrellado; ramas estaminales y estilo no vistos. **Pedúnculo fructífero** 13-14 cm de longitud, 4-8(9) mm de grosor, siendo más engrosados en el ¼ distal, sin bractéolas visibles. **Cáliz fructífero** cupular-pateliforme, 15-18 mm de longitud, 50-60 mm de diámetro, marrón oscuro en seco, claramente separado de la base del fruto. **Fruto** marrón en seco, anchamente ovoide-cónico, c. de 60 × 60 mm, con notorio estrechamiento en pico distal (**Figura 12S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323), con **mesocarpo** aparentemente fibroso; pirenos no vistos.

**Etimología.** El nombre de la especie hace referencia a los pedicelos florales y pedúnculos fructíferos particularmente largos y gruesos para el género.

**Distribución y hábitat.** Sólo conocida de la región de Tierralta, de la cuenca de los ríos Manso y Tigre, en el departamento de Córdoba, en la zona de influencia del P.N.N. Paramillo, hacia la cota de 150-200 m. Según los datos recogidos en las etiquetas de campo, esta especie crece cerca de los caños, sobre suelos arcillosos, en ambientes de bosque primario conservado, dominado por especies como *Peltogyne* sp., *Macrolobium sp.* (Fabaceae), *Licania sp*. (Chysobalanaceae), *Pourouma sp.* (Urticaceae), y *Amphirox sp.* (Violaceae).

**Fenología.** Se conocen escasos registros de floración del mes de junio y de fructificación del mes de julio.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

**Notas taxonómicas.** Se trataría de una especie afín a *M. castano* H. Karst. & Triana, propia de zonas bajas del pacífico de Colombia y Ecuador (**Fernández-Alonso**, 2016), especie de flores grandes con pedicelos igualmente desprovistos de bractéolas, de la que puede separarse bien por algunas diferencias como son: hojas con láminas más gruesas, cartáceas; pedicelos florales y pedúnculos fructíferos más largos y gruesos hasta 12-14,5 cm de longitud y hasta 8 mm de grosor (en la zona distal del pedicelo), corola y columna estaminal amarilla y el fruto ovado-cónico, apiculado, con el cáliz pateliforme, no ceñido al fruto. Otra especie de la vertiente pacífica de Colombia y Ecuador, de esta misma sección *Castano*, con la que tiene alguna afinidad en el cáliz fructífero y cáliz es *M. calimana* Cuatrec., pero a diferencia de la que se describe, esta especie presenta hojas con pecíolos más cortos (1,8-3 cm), láminas membranáceas estrellado-pilosas en el envés; pedúnculo fructífero mucho más corto (3-4 cm de longitud) y fruto globoso o subgloboso de 4-4,5 cm de diámetro, apicalmente umbilicado.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA. **Departamento de Córdoba:** Municipio de Tierralta, vereda Zancón, río Manso, finca Nueva Ilusión, Parque N.N. Paramillo, 7º38'N, 76º00'O, 184 m, árbol 5 m, , 7 jun 2009 (fl) –botón-, *A.C. Estupiñan et al. 341* (COL 571392); ibídem, Parque N.N. Paramillo, Quebrada Crisanta, bosque primario conservado, al lado del caño, sobre suelo arcilloso, 7º 39'N, 76º 5'O, 272 m, árbol 6 m, estéril, 10 jun 2009, *A.C. Estupiñan et al. 347* (COL 550942); ibídem, Parque Nacional N. Paramillo; unión del río Tigre y el río Manso, Transecto 1, 7º30'N, 76º5'O, 200 m, árbol 8 m, 25 jul 1988 (fr), *A. Gentry & H. Cuadros 63727* (HJBGP 10957; MO bc:2021622/ A:4357859; bc:2021623/ A:4357858).

**6. *Quararibea aguarunae*** Fern. Alonso, **sp. nov**. (**Figuras 7, 8, 13S, 14S, 15S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)

**TIPO:** PERÚ. **Departamento de Amazonas:** Provincia de Bagua, Distrito Imaza, Comunidad Aguaruna de Kusú-Listra. Cerro Apag, margen derecha de la quebrada Kusú, 600-700 m, árbol 22 m, 17 sept 1996 (fl), *C. Díaz 8248, A. Peña, R. Tiwi, D. Shuwin* (holotipo: COL 570589); isotipos: MO 2025917/ 6077444 y por distribuir).

**Diagnosis**. This species is similar to *Quararibea cryptantha* Fern.Alonso, from which it is distinguished by having thin membranous leaves, (9-)11-19 cm long, with petioles (8-)9-15 mm long (vs. membranous-papery leaves, 9-14 cm long, with petioles 6-9 mm long in *Q. cryptantha*), ellipsoid-elliptical and membranous domatia, bearded at the base (vs. papery sacciform domatia, not bearded), 1-2 flowers on short defoliated branches (vs. axillary racemes with (4-)6-8 flowers), floral pedicel (5-)6-8 mm long (vs. floral pedicel 0.8-1 mm long), petals 8-10 mm long (vs. petals 12-13 mm long), and androecium with stamen column 11-14 mm long (vs. androecium with stamen column 10-11 mm long).

**Árboles** (12-)15-25 m, con olor característico a fenogreco (en muestra seca de herbario); **ramitas** rojo-negruzcas, cilíndricas, 3-7 mm de diámetro, finamente rugoso-estriadas, con lenticelas; profusamente ramificadas con numerosas ramas cortas; ramas de último orden muy delgadas, marrón-ferrugíneas, cilíndricas, con 2-6 entrenudos, entrenudos 2-4 cm de longitud; con indumento castaño, fasciculado-lepidoto, muy corto. **Yemas** terminales estrechamente ovoide-lanceoladas, 5-8(-11) × 2-3 mm, con 4-6 catáfilos estipulares rígidos, o a veces ligeramente separados paralelamente entre sí; estrechamente triangular-lanceolados, (4-)5-10 × 1-2 mm, a menudo recurvados o falcados distalmente, con fino indumento fasciculado-lepidoto, compacto. **Hojas** en disposición dística en las ramas; **estípulas** estrechamente triangulares, 3 × 1,5 mm, lepidotas; **pecíolo** (8-)10-15 mm de longitud y 1-2 mm de grosor, con pulvínulo proximal generalmente visible, más pálido, 3 mm de longitud y el distal ligeramente más grueso y oscuro que el resto del pecíolo, 7-9 mm de longitud; **láminas** discóloras, estrechamente elípticas a oblongas, (9-)11-17(-19) × 4-7(-8,5) cm, a veces ligeramente asimétricas, haz verde oscuro y envés verde intenso (en vivo) y oliváceo pálido (en seco), membranosas; redondas o cuneado-redondeadas en la base, agudas en el ápice o a veces con apículo, el apículo 10-12 × 4-6 mm; **vena media** amplia, resaltado-acanalada en el envés, acompañada de otras dos venas basales

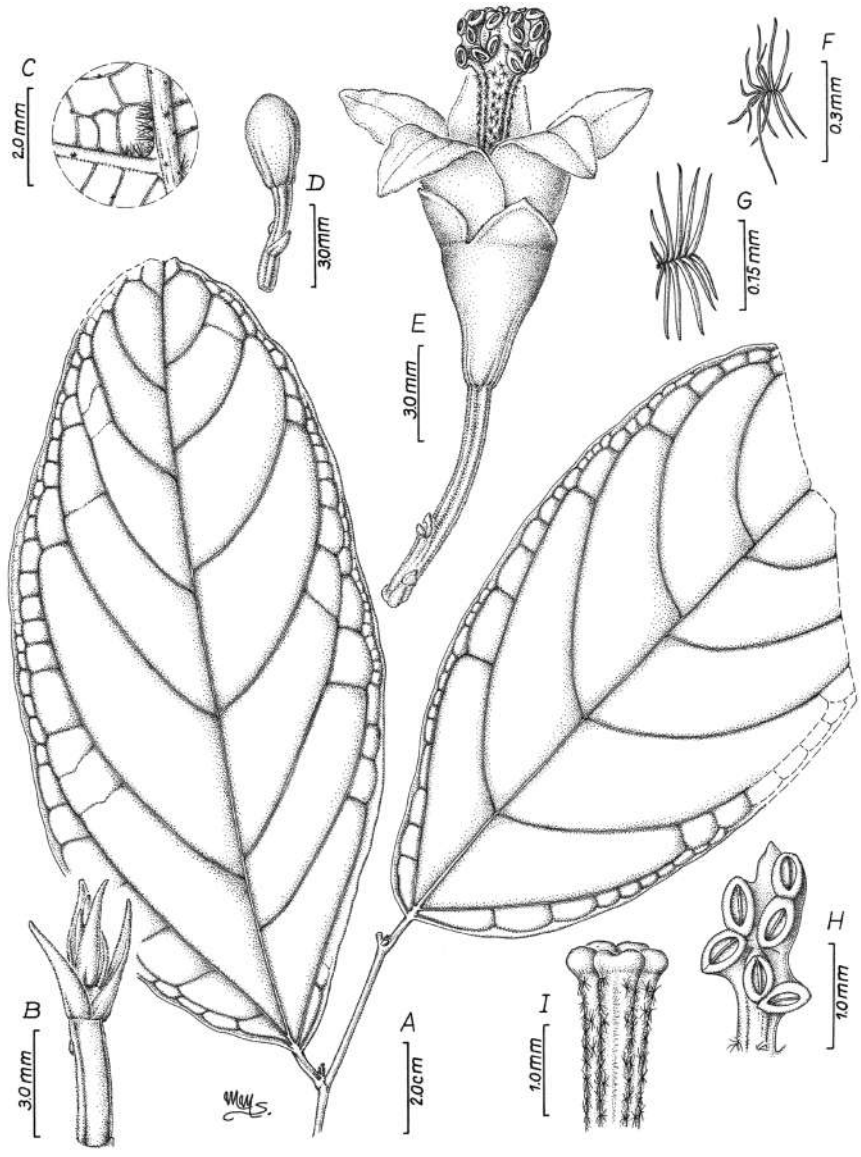



**Figura 7.** ***Quararibea aguarunae*** Fern.Alonso**. A.** Detalle de la parte distal de una rama joven. **B.** Detalle del ápice de la rama, mostrando la yema terminal y los catáfilos. **C**. Detalle de un domacio barbado en su base. **D**. Detalle de un botón floral con el pedicelo, mostrando la ubicación de las bractéolas. **E.** Flor en vista lateral mostrando el pedicelo, el cáliz, la posición de la corola y la disposición y estructura del androceo en la antesis. **F., G.** Indumento estrellado-fasciculado del pedicelo floral y de la cara externa del cáliz. **H**. Detalle de un lóbulo distal de la columna estaminal, mostrando las anteras. **I.** Detalle de la parte distal del estilo, mostrando el indumento y los lóbulos estigmáticos [A-I, a partir de *Díaz 8248* (COL 570589)]. Lámina elaborada por Marcela Morales, (ICN).

submarginales; con 5-6 venas secundarias, laterales a cada lado de la vena media, erecto-patentes, incluyendo las dos venas submarginales a los lados de la vena media; venación de tercer orden paralela y de cuarto orden escasamente resaltada, sólo en el envés; láminas de aspecto subglabro, con indumento estrellado-lepidoto muy disperso en el haz y con el mismo tipo de indumento, limitado a la venación, en el envés; con 6-8 **domacios** en la confluencia de las venas laterales con la vena media; membranosos, a veces ligeramente elípticos, 1-2 × 0,5-1 mm, barbados con una banda o fascículo de pelos conspicuos en la parte basal. **Flores** aromáticas, agrupadas de a 1-2 en ramas cortas, generalmente no

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

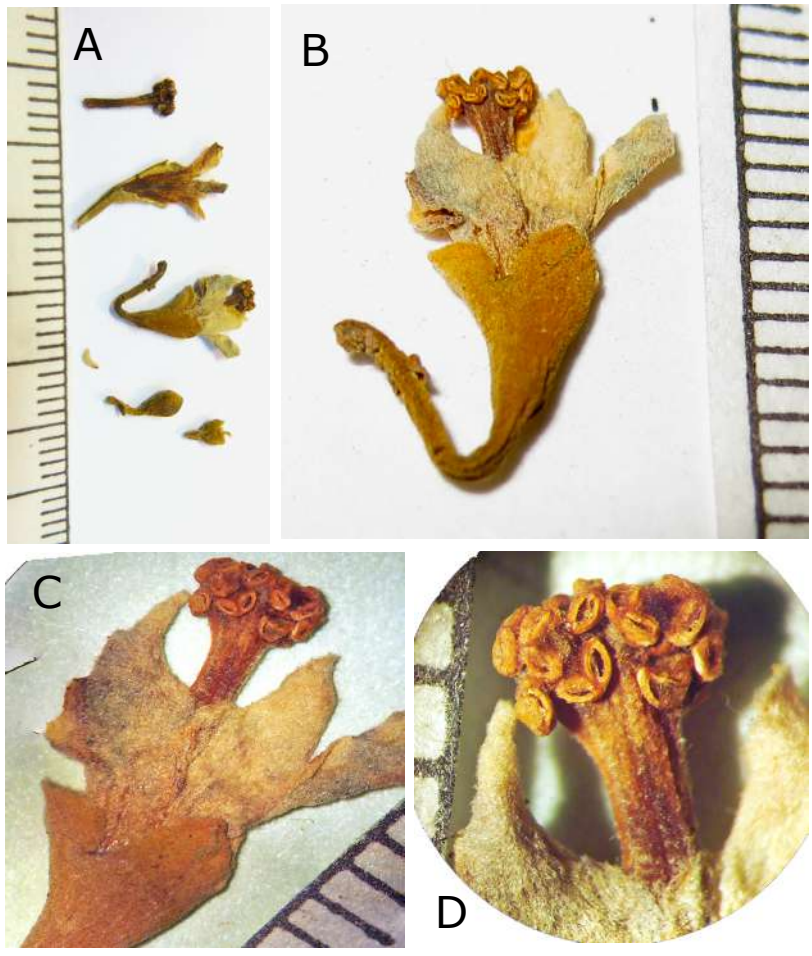



**Figura 8.** ***Quararibea aguarunae*** Fern.Alonso**.** Holotipo *Diaz 8248 (*COL 570589), detalles. **A.** Botón floral, flor completa, flor seccionada sagitalmente y columna estaminal. **B.** Flor completa en vista lateral con pedicelo, bractéolas, cáliz, corola y androceo. **C.** Detalle de los pétalos en su cara externa y de la columna estaminal. **D.** Parte superior ensanchada del androceo con las tecas agrupadas por pares.

acompañadas de hojas. **Botones** florales anchamente obovoides, con indumento lepidoto fino; **pedicelo** floral (5-)6-8 mm de longitud, con 2(-3) **bractéolas** diminutas, c. 1 × 1 mm, ubicadas más o menos al mismo nivel en el tercio basal (a 2-2,5 mm de la base) del pedicelo, prontamente caducas; con indumento estrellado-lepidoto corto; **cáliz** verde-marrón (en vivo), obcónico, 5,5-6,5 × 3,5-4 mm, ampliamente rasgado en tres lóbulos subiguales, lóbulos del cáliz anchamente triangulares, 1,5-2,5 mm de longitud; recubierto de indumento estrellado-lepidoto muy corto; **corola** de pétalos blancos, patente recurvados en la antesis, de tamaño y aspecto uniforme, oblanceolados, 8-10 mm × 2,5 mm en su parte más ancha (la zona subterminal), agudos en el ápice, cuneado-unguiculados en la base, ondulado-rugosos en su cara superior (en vivo), con indumento estrellado-fasciculado, corto, blanquecino por ambas caras. **Androceo** con **columna estaminal** 11-14 mm de longitud, con indumento estrellado, corto, disperso; columna estaminal rematada por un ensanchamiento lobulado c. 2,5 mm de diámetro, con cinco ramas o lóbulos estaminales escasamente diferenciados, 1-2 mm de longitud, con 18-22 pares de tecas de 0,5 mm de diámetro; **estilo** cilíndrico, 12(-14) × 1 mm, con indumento estrellado conspicuo dispuesto en líneas longitudinales, rematado en un estigma subcapitado-lobado, c. 2,5 mm de diámetro. **Fruto** no visto.

**Etimología**. El nombre de la especie hace referencia a la comunidad indígena Aguaruna de Kusu-Listra, del Distrito de Imaza (Amazonas, Perú) en cuyo territorio fue recolectado el material tipo de este árbol. El pueblo indígena aguaruna o awuajún, vive en los departamentos de Amazonas, Cajamarca, Loreto y San Martín, en la amazonía peruana (**Cornejo,** 2015; **Fernández Alvarado et al.,** 2023).

**Distribución y hábitat.** La colección típica se ubica en colinas a 600 y 700 m de altitud, en la región de Bagua, provincia de Amazonas, en Perú. La otra localidad donde se recolectaron muestras que hemos asignado a esta especie, está en Loreto, más concretamente en la Provincia de Danten del Marañon, Distrito de Manseriche, sobre los 800-900 m, también en ambiente de bosque de colinas bajas y en este caso se indica sobre suelos arcillosos (*Huamantupa 16011*).

**Fenología**. Los registros conocidos se encontraban en floración entre agosto y noviembre. No se conocen los frutos de esta especie.

**Notas taxonómicas.** Puede diferenciarse bien de otras especies del género con flores pequeñas como *Q. cryptantha* y *Q. duckei* Huber (**Fernández-Alonso,** 2021; 2022) por la siguiente combinación de caracteres: hojas muy delgadas, membranáceas, con pecíolos de 9-12 mm de longitud y láminas de 9-19 cm de longitud, con domacios membranosos y barbados, ubicados en la confluencia de las venas laterales secundarias con la vena media en la mitad basal del limbo; pedicelo floral c. de 8 mm de longitud, cáliz muy pequeño (5,5-6 mm de longitud), profundamente 3-lobado; pétalos cortos de 8-10 × 2,5 mm, androceo con columna estaminal de 11-14 mm de longitud y ramas estaminales inconspicuas (1-2 mm de longitud). De la colección proveniente de Loreto, Provincia de Danten del Marañón (*Huamantupa 16011*, F, sub. *Quararibea wittii* K. Schum & Ulbr.), existe información y fotografías de campo (**Grant & Konrat,** 2023; GBIF) de la muestra con flores, que han sido tenidas en cuenta en este estudio. Dos de ellas se reproducen con permiso en este trabajo (**Figura 15S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323).

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** PERÚ. **Departamento de Loreto:** Provincia Danten del Marañón, Distrito de Manseriche, cerros Kampankis, serranía entre los ríos Santiago y Morona, entre el río Marañon y la frontera con Ecuador, Campamento 4, 4º12'S 77º33'O, 886 m, bosque de colinas bajas y medias sobre suelos arcillosos, árbol de 12-16 m, 18 ago 2011 (fl), *I. Huamantupa 16011 et al.* (F 2307667 (**Figuras 14S, 15S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323), USM).

**7. *Quararibea cajamarcana*** Fern. Alonso, sp. nov. (**Figuras 9, 16S, 17S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)

**TIPO:** PERÚ. **Departamento de Cajamarca:** Provincia de San Ignacio, Distrito Namballe, La Colmena, bosque primario tipo pacasal; 4º59'S 79º6'O, 800-900 m, árbol 15 m, 18 dic 1996 (fl), *J. Campos 3179 & P. Díaz, J. Pezantes* (holotipo: HUT 47271; isotipos: MO 2025904/ A:6077464, US 3405241/ cb 01222033).

**Diagnosis**. This species is similar to *Quararibea caldasiana* Fern.Alonso, from which it is distinguished by having leaves with membranous blades with straight margins, not revolute (vs. papery or subcoriaceous blades, with revolute margins in *Q.caldasiana*), flowers solitary opposite the leaves and also 1-2 flowers emerging from the abscission scars in the lower defoliated area of the terminal branches (vs. 2-4(-5) flowers grouped in very short twigs, usually axillary), spatulate, obtuse petals, 3.5-5 mm wide in the distal third, petal blade flat and patent at anthesis (vs. linear-spatulate, subobtuse petals, 2.5-3.5 mm wide in the distal third, petal blade rough-torulose, recurved-reflexed at anthesis), stamen column with distal antheriferous glomerule 4–5 × 5.5 mm (vs. stamen column with distal antheriferous glomerule 2.5 × 3–3.5 mm).

**Árboles** (10-)12-20 m, con copa densa y generalmente alargada; **ramas** principales dispuestas de modo horizontal; ramas menores con ejes cilíndricos, marrón-rojizas, 4-6 mm de diámetro, rugoso-estriadas longitudinalmente, profusamente ramificadas; **ramitas** de último orden rojizas, cortas, finamente tomentosas, con entrenudos (15-)20-25 mm de longitud y 1,5-2 mm de grosor, con sólo 2-3 hojas en posición distal. **Yemas** terminales más o menos

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327




**Figura 9.** ***Quararibea cajamarcana*** Fern.Alonso. **A.** Perú, Cajamarca, *Campos 3179* (holotipo US 3405641). **B.** Detalle de los pedicelos florales, bractéolas y flores en vista lateral.

compactas, con 4-5(-6) catáfilos estipulares rectos o más frecuentemente falcados, 8-10 × 1-2 mm, raramente catáfilos divergentes en la yema, con fino indumento ferrugíneo de pelos fasciculados. **Hojas** dispuestas de modo dístico en las ramas; **estípulas** prontamente caducas, estrechamente linear-lanceoladas, 6-8 × 1 mm, acuminadas, **pecíolo** (9-)10–12 × 1-1,5 mm, sin pulvínulos claramente delimitados; **láminas** discóloras, haz marrón oliváceo o marrón-rojizo y ligeramente lustroso; envés pálido verdoso (en seco); membranáceas, elípticas a oblongo-elípticas, de 7-12(-14) × 3,5-5(-5,5) cm; base cuneada o más raramente redondeada, con ápice agudo; **vena media** prominente en el envés; con (5)6-7 de **venas secundarias** a cada lado de la vena media, claramente broquidódromas hacia el margen; venas impresas en el haz y más pálidas que la lámina y resaltadas en el envés; **domacios** no presentes; venas de tercer y cuarto orden de tipo poligonal, reticuladas, claramente visibles en el haz y escasamente resaltadas en el envés; haz glabrescente y envés con indumento fasciculado, amarillento,

conspicuo en las venas media y secundarias. **Flores** solitarias, dispuestas en las ramas terminales, opuestas a las 2-3 hojas presentes y también con 1-3 flores, separadas, dispuestas en las nudosidades o rastros de abscisión, en parte inferior defoliada de cada rama; **pedicelo** floral generalmente recto, 8-12 × 1 mm; **bractéolas** 2-3, persistentes, en posición media o subasal en el pedicelo, erectopatentes, linear-lanceoladas, subuladas, 2-3 mm de longitud, con indumento fino amarillento fasciculado. **Botón floral** verde-amarillento, obovoide a elipsoide, redondeado distalmente, con leves costillas longitudinales, 10-11 × 8 mm, con indumento fasciculado denso, anaranjado; **cáliz** verde pálido en vivo, anaranjado o cobrizo (en seco), 10-12 × 6-7 mm en la parte distal, cónico-triangular, rematado en 3(-4) lóbulos cortos, anchos y ligeramente recurvados en el margen, 4-5 × 2-3 mm, con indumento externo ferrugíneo muy fino, tuberculado-fasciculado o a veces finamente flocoso, en el interior indumento seríceo, adpreso, pálido amarillento; **corola** blanca o a veces blanco crema, con pétalos patentes o escasamente flexionados en la antesis; espatulados, obtusos, 25-29 mm de longitud, c. 2 mm de ancho en la mitad basal y 3,5-5 mm de ancho en la zona distal; haz glabrescente, en seco con aspecto venoso-reticulado y envés con indumento denso y fino, estrellado amarillento. **Androceo** blanco, con **columna estaminal** 20–23 mm de longitud, con indumento denso estrellado de radios largos, con ensanchamiento distal globoso 4-5 × 5,5 mm, con anteras agrupadas de a dos en 4-5 lobulaciones distales escasamente definidas, con 30-35 anteras en total, **anteras** globosas con pared gruesa y poro de apertura pequeña, más o menos circular, anteras c. 0,7-0,9 mm de diámetro; **estilo** 23-25 mm de longitud, sobrepasando ligeramente al nódulo estaminal, con indumento estrellado pálido, densamente dispuesto, ensanchado en **estigma,** este irregularmente lobado-sinuoso, c. 3 mm de diámetro; **pedúnculo fructífero,** cáliz fructífero, **fruto** y semilla no vistos.

**Etimología.** El nombre de la especie hace referencia a la región de procedencia del material tipo, el departamento peruano de Cajamarca, en su vertiente amazónica al río Marañón, en la amazonía peruana.

**Distribución y hábitat.** Conocida del piedemonte amazónico del norte del Perú (Departamentos de Cajamarca y Amazonas) y del Occidente de Ecuador (Provincia de Pastaza), entre (350) 650-900 m. Ha sido recolectada en ambiente de bosque maduro o primario (parcelas) y también como especie presente en bosque intervenido.

**Fenología.** Se ha registrado floración en los meses de octubre a enero. No se cuenta con información sobre colecciones fructificadas en esta especie.

**Notas taxonómicas**. La colección *Rojas et al. 729* (MO) procedente del Departamento de Amazonas, distrito de Bagua y recolectada a 380 m, con botones florales; aunque tiene hojas más anchamente elípticas y pedicelos florales (botón) en apariencia más cortos, consideramos que también corresponde a esta misma especie. La colección *Pérez 5823* de Pastaza en Ecuador, de cotas altitudinales similares (600-900 m), coincide con las características de esta especie en hábito, hojas y flores en general. No obstante, presenta estructuras que recuerdan a domacios axilares, pero inusualmente amplios y lanoso-barbados, desigualmente desarrollados, aparentando ser una anomalía o un desarrollo inusual (tipo agalla) debido a algún agente externo (virus, insectos). Este tipo de agallas se observa menudo en algunas especies de los géneros *Matisia* y *Phragmotheca* Cuatrec.*,* pero no se distribuyen exlusivamente en la confluencia de las venas media y secundarias del envés foliar.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** PERÚ. **Departamento de Amazonas:** Provincia de Pedro Ruiz; Distrito de Bagua, Pedro Ruiz-Bagua km 24, valle del río Uctubamba, 5º53’S 78º8’O, 650 m, pendientes al lado del río, árbol 12 m, 29 nov 1999 (fl), *T.D. Pennington 16834 & A. Daza* (K 005996893; K 005996894, MOL (**Figura 17S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)); ibídem, Distrito de Bagua, Aramango-Muyo, bosque intervenido en una quebrada, 5º25’S 79º30’O, 380 m, árbol 20 m, 16 nov 1999 (fl-botón-), *R. Rojas 729 et al.* (HUT, MOL, MO). **Departamento de Cajamarca:** Provincia de San Ignacio, Distrito Namballe, Las Juntas de Namball (Naciente del río Chinchipe por unión de los ríos Mayo y Canthis), en bosque, 5º7’S 79º1’O, 750 m, árbol 20 m, 14 ene 1997 (fl), *J. Campos et al. 3329* (HUT, MO 2026508/ A:6075305).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

ECUADOR**. Provincia de Pastaza:** Cantón Arajuno, territorio de la Comunidad Shuar Washents, alrrededor de la Plataforma Olan 2, 00º20'S 77º40'O, 750-900 m, bosque siempreverde piemontano, en bosque maduro, árbol 15 m, 3 oct 2012 (fl), *A.J. Pérez et al. 5823* (QCA 218200 (**Figura 17S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)).

**8. *Quararibea caquetensis*** Fern.Alonso, sp. nov. (**Figuras 10, 18S, 19S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323).

**TIPO:** COLOMBIA. **Departamento de Caquetá**: Cordillera Oriental de Colombia, vertiente Oriental, municipio de San Vicente del Caguán, en la carretera de Neiva a San Vicente del Caguán, entre las veredas Sibaté y Los Morros, bosque primario intervenido, 1000-1300 m, árbol 15 m, 27 nov 1990 (fr –inmad-), *J. Betancur 2238 & S. Churchill* (holotipo: COL 500087; isotipos: COAH 8922, HUA 84380).

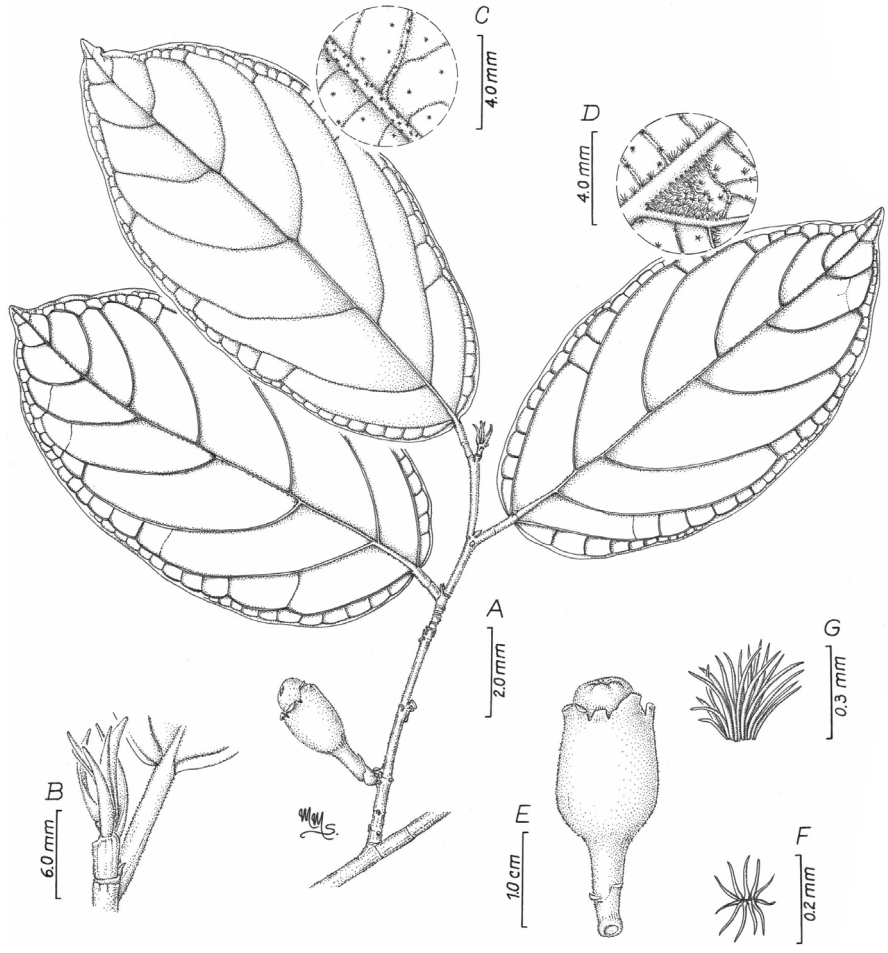



**Figura 10.** ***Quararibea caquetensis*** Fern.Alonso **A.** Parte distal de una rama mostrando la posición de la flor y la corola persistente después de la antesis. **B.** Detalle del ápice de la rama, mostrando la yema terminal, los catáfilos estipulares y la cicatriz estipular al lado del pecíolo. **C.** Detalle del indumento de la lámina en el haz, finamente estrellado-lepidoto. **D.** Detalle del indumento estrellado en el envés a lo largo de la vena media y del domacio barbado-estrellado ubicado en la confluencia de la vena media con las venas laterales. **E.** Pedúnculo fructífero con cicatrices bracteolares, cáliz fructífero crateriforme-urceolado y fruto joven parcialmente expuesto en la zona distal. **F.** Indumento estrellado ubicado en la superficie de la lámina. **G.** Indumento estrellado-fasciculado largo, ubicado en los domacios y vena media del envés. [A-G, del tipo *Betancur et al. 2238* (COL, HUA)]. Lámina elaborada por Marcela Morales (ICN).

**Diagnosis**. This species is similar to *Quararibea turbinata* (Sw.) Poir., from which it is distinguished by having smaller leaves, 9-12 × 4-6 cm (vs. 10.5-21 × 5-10.5 cm in *Q. turbinata*), leaf domatia densely bearded with brown stellate hairs (vs. membranous-sacciform leaf domatia with simple hairs in a distal position), fruit calyx urceolate-cupular, 12-14 × 13 mm, covering at least two-thirds of the fruit (vs. cup-shaped fruiting calyx, 12-15 × 4-5 mm, covering only 1/3 of the fruit), and narrowly ovoid fruit, 11-13 × 10 mm (vs. globose fruit, 18-20 × 20-25 mm).

**Árbol** c. 15 m, ramas cilindrícas, oscuro negruzcas con corteza marrón rojiza, finamente rugosa, muy aromática en seco (olor característico a fenogreco). Ramas terminales con entrenudos 10-15 mm de longitud y 2 mm de grosor; **yemas** terminales estrechamente cónico-falcadas, rígidas, con 5-6 catáfilos estrechamente lanceolado-subulados, incurvos, 5-6 × 1,5 mm. **Hojas** dispuestas de modo dístico, con **estípulas** linear-lanceoladas, 3-4 mm de longitud, prontamente caducas; **pecíolo** 8-11 mm, marrón, con indumento muy fino, con un ligero engrosamiento anular en el tercio inferior, con un sólo pulvínulo en posición distal, 7-9 × 2 mm longitud, más oscuro que el resto del pecíolo; **láminas** marrón pálido (en seco), membranosas, lanceoladas, ligeramente asimétricas, 9-12 × 4-6 cm; base redondeada a subcuneada, ápice agudo, margen ligeramente ondulada; **vena media** amplia, aplanada, y dos pequeñas venas basales submarginales a los lados de la vena media; **venas secundarias** 5(-6) a cada lado de la vena media, erecto-patentes, arqueadas y broquidódromas hacia el margen; venación terciaria más o menos paralela y perpendicular con respecto a las venas secundarias; venas de 4º y 5º orden con patrón reticulado, escasamente resaltadas; **domacios** barbado-estrellados, muy conspícuos, ubicados en la confluencia de la vena media con las venas secundarias (**Figura 19S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323); haz no lustrosa, con venación ligeramente excavada, con indumento marrón a lo largo de la vena media; envés con venación resaltada, con indumento estrellado, marrón-castaño, muy visible a ambos lados, a lo largo de la vena media y en parte de las venas secundarias. **Flores** no vistas. **Fruto** dispuesto en ramas cortas, con **pedúnculo** grueso, 9-12 mm de longitud y 3 mm de grosor, marrón-lepidoto, con cicatrices de inserción de 2 bractéolas en la mitad basal; fruto joven rodeado por el cáliz acrescente, verde; **cáliz fructífero** subcilíndrico, en forma de copa estrecha, 12-14 x 10-12 mm, con el borde superior irregularmente 4-7 lobado, externamente marrón, recubierto de indumento lepidoto de aspecto aterciopelado; **fruto (joven)** propiamente dicho, marrón, estrechamente ovoide, 13 × 10 mm, con indumento lepidoto; mesocarpo fibroso. **Pirenos** no vistos.

**Etimología.** El nombre hace referancia al departamento del Caquetá en la amazonía de Colombia, en cuyos bosques de la franja subandina fué recolectada esta especie.

**Distribución y hábitat.** Especie sólo conocida del piedemonte amazónico de la Cordillera Oriental de Colombia, en la franja de bosque húmedos subandinos, hacia los 1000-1300 m, en lo que sería la zona de transición del bh-PM a bh-T (**Basto,** 2019). En la localidad tipo, San Vicente de Caguán, que cuenta con escasa información sobre su flora (**Correa et al**., 2021), es un árbolito frecuente de acuerdo con la información de herbario.

**Notas taxonómicas.** *Quararibea caquetensis* presenta alguna afinidad con *Quararibea turbinata* (Sw.) Poir., de Brasil y Las Antillas, pero puede diferenciarse bien porque esta última presenta hojas mayores (9-12× 4-6 cm) con domacios tipicamente sacciformes con una banda distal de pelos simples; además, su cáliz fructífero es típicamente cupular de 11× 5 mm y recubre apenas 1/3 parte del fruto (**Ferreira & al.,** 2018). Esta nueva especie presenta también algún parecido con *Q. costarricensis* Alverson, de Costa Rica y Panamá, de la que se diferencia porque esta especie presenta hojas cartáceas o subcartáceas de mayor tamaño [(7-)9-23 x 5-14 cm], sin domacios en el envés y frutos elipsoides a ovoides de mayor tamaño (24-27 × 15-19 mm), recubiertos sólo hasta la mitad por el cáliz fructífero urceolado-cupulado (**Alverson,** 1989).

**9. *Quararibea nicaraguensis*** (W.S. Alverson) Fern.Alonso, **comb. nov.** (**Figuras 11, 20S, 21S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

=*Quararibea funebris* (La Llave) Vischer subsp. *nicaraguensis* W.S. Alverson, Ann. Missouri Bot. Gard. 74(4): 919, f. 1, 1987.

**TIPO**: NICARAGUA. **Departamento de Matagalpa:** finca Santa María de Ostuma, Cordillera Central de Nicaragua, 1400 m, 18 ene 1965, (fl.), *L.O. Williams 27978, A. Molina, T.P. Williams, D.N. Gibson, C. Laskowki* (holotipo: WIS v0101083; isotipos: F 0052185F, NY 00133615, US 00007855).

**Descripción abreviada** [Basada en **Alverson** (1987) y en las colecciones revisadas citadas]. Árbol 5-25 m, con tronco liso. **Ramas** verticiladas con corteza pálida. **Hojas** con **estípulas** caducas, estrechamente triangulares, densamente lepidotas; pecíolos 7-18 mm largo; **láminas** marcadamente cartáceas, obovadas a elípticas, 7-22 × 3-10 cm, con ápice agudo a acuminado, base cuneada a redondeada, de con 5-7 pares de **venas secundarias** a cada lado de la vena media, prominentes por el envés, con notorios domacios barbados axilares. **Flores** solitarias o escasamente agrupadas; pedicelos florales 11-15 mm longitud, densamente puberulentos, con tres bractéolas, anchamente triangulares, 1,5 mm de longitud y 1,5 mm de ancho en la zona basal; cáliz infundibuliforme, 9-11 mm de largo; densamente pubescente con pelos estrellado-equinados en la cara externa y con indumento seríceo adpreso en la interna; con lóbulos distales claramente triangulares, 3 mm de longitud; pétalos blancos, espatulados, recurvados en la antesis, 15-16  de longitud y 5-6 mm de anchura en el tercio distal. **Androceo** con columna estaminal 16-22 mm de longitud y 1,5 mm grosor, densa y finamente pubescente con tricomas estrellados, con 24-30 tecas; lóbulos apicales inconspículos, c. 0,5 mm de longitud. **Estilo** filiforme, 17-26 mm longitud, tomentoso; estigma capitado, c. 2 mm de diámetro. **Pedúnculo fructífero** delgado, 10-19 mm de longitud, con 2-3 bractéolas persistentes hacia la mitad. **Cáliz fructífero** acrescente, cupulado, recubriendo el fruto en 1/3-1/2 de su longitud. **Frutos** drupáceos, anchamente elípticos a ligeramente obovados (**Figura 11 B**), 20-25 × 14-18 mm, mamilados con un breve apículo o mamelón central; exocarpo densamente tomentoso con pelos adpresos estrellado-equinados; mesocarpo blando-fibroso, endocarpo corneo-fibroso; **pirenos** 2, o 1 por aborto, c. 13 × 8 mm.

**Distribución y hábitat.** Esta especie se encuentra en bosques de zonas altas en el noroeste de Nicaragua, en los departamentos de Esteli, Jinotega, Matagalpa y Madriz. Localmente común en bosques primarios húmedos de zonas elevadas y en bosques de niebla entre los 1200 y 1600 m (**Alverson,** 1987).

**Fenología.** Floracion observada de agosto a septiembre y frutos de octubre a enero, de acuerdo con las colecciones de herbario.

**Especímenes adicionales examinados.** NICARAGUA. **Departamento de Esteli:** El Zacatón, sitio El Delirio, camino a La Laguna de Miraflor, 1400 m, 11 ene 1984 (fr), *Moreno 22676* (MO, WIS). **Departamento de Jinotega:** entre Santa Lastenia y la entrada a Aranjuez, 1200-1250 m, 19 ene 1984 (fr), *Sandino 4704* (MO); ibídem, finca Aventina, sierra al E de Jinotega, 1400-1500 m, estéril, 23 ene 1947, *Standley 10002* (F); vecindad de la finca San Roque, sierra al E de Jinotega, 1300-1500 m, 5 jul 1947 (fr), *Standley 10856* (F, US). **Departamento de Madriz:** Cerro Volcán Somoto (Volcán Tepesomoto), 25 sep 1980 (fl), *Moreno 2892* (MO). **Departamento de Matagalpa:** cerca de Santa María de Ostuma, en los flancos del Cerro El Picacho, 1500 m, 1 dic 1982 (fl, fr), *Alverson & Moreno 1982* (CR, MO, PMA, US (**Figura 21S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323)); ibídem, (plántula), *Alverson 1984* (MO, WIS); ibídem, 1350-1585 m, 30 ago 1985 (fl), *Nee 27660* (MO, WIS); Fuente Pura a 11 km de Matagalpa, carretera a Jinotega, 1400-1450 m, 7 oct 1980 (fr), *Moreno 3381* (MO, WIS); Cordillera Dariense, Santa María de Ostuma, 1500 m, 12 ago 1977 (fl), *Neill 2323* (MO); ibídem, 1500 m, 15 ene 1963 (fr), *Williams et al. 23952* (F, NY, US); entre la hacienda La Harmonia y el Cerro La Carlota, 1200-1300 m, árbol 20 m, 10 dic 1983 (fr), *W.D. Stevens 22574* (MEDEL 46734, MO).

**Notas taxonómicas.** Consideramos que, debido a las dimensiones menores de muchas de sus estructuras florales, *Q. nicaraguensis* es distinta de *Q. funebris*, como ya fué señalado cuando fué descrita como subespecie de esta última (**Alverson,** 1987). Sin embargo,




**Figura 11.** ***Quararibea nicaraguensis*** (Alverson) Fern.Alonso. **A.** Espécimen de Nicaragua, Matagalpa, *Stevenson 22574* (JAUM 046734). **B.** Detalle de los pedúnculos fructíferos y los frutos.

algunas diferencias notorias ya señaladas en dicha descripción, junto con su restricción geográfica a las zonas altas del Noroeste de Nicaragua ameritan, en nuestro concepto, su reconocimiento como una especie independiente y no como una subespecie de *Q. funebris*. La menor longitud de los pétalos de sólo 15-16 mm (vs. 33-40 mm en *Q. funebris*), el escaso desarrollo de la columna estaminal y los lóbulos estaminales (columna de c. 22 mm de longitud y lóbulos de c. 0,5 mm de longitud vs. columna de 30-55 mm y lóbulos de 2-4 mm en *Q. funebris*), los pedicelos fructíferos mas gráciles que en *Q. funebris* y su cáliz fructífero claramente diferente (11-13 mm de longitud vs. 18-26 mm de longitud en *Q. funebris*), que recubre al fruto en menor medida (solo 1/3 a ½ de su longitud), la acercarían más a otras especies del género con flores más pequeñas y lóbulos estaminales más cortos, como es el caso de *Q. stenophylla* Pittier, *Q. asterolepis* Pittier y *Q. nigrescens* N. Zamora et al. (**Alverson,** 1986; **Zamora & al.,** 2017; **Fernández-Alonso**, en prep.).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

**Clave para la identificación de las secciones del género *Matisia* (basada en Fernández-Alonso, 2001a).**

1—Hojas con venación claramente pinnada, con una sola vena basal (vena media) y con venas secundarias numerosas, al menos 8 a cada lado de la vena media; cáliz floral generalmente de 45 mm de longitud o mayor...**Sección 4. *Macrocalyx*** Fern.Alonso

1—Hojas con tres o más venas basales principales y con menos de 8 venas secundarias a cada lado de la vena media; cáliz floral menor de 45 mm de longitud .....2

2—Láminas foliares con 5-7 o más venas basales primarias; flores numerosas dispuestas en nudosidades de las ramas o troncos, o a veces en nudosidades ubicadas en sectores subterminales defoliados de las ramas terminales ..... **Sección 5. *Matisia***

2'—Láminas foliares con 3(-5) venas basales primarias; flores solitarias o a veces pareadas, opuestas a las hojas, raramente agrupadas en ramitas cortas (braquiblastos) en las zonas terminales y subterminales de las ramas jóvenes .....3

3—Pedicelos florales con bractéolas verticiladas o subverticiladas, agrupadas en la zona distal del pedicelo, a modo de calículo .....**Sección 1. *Calyculatae*** Fern.Alonso

3'—Pedicelos florales con las bractéolas no verticiladas en posición distal, dispuestas a distinto nivel en el pedicelo floral o ausentes .....4

4—Láminas foliares con 3 o más venas basales principales y generalmente con menos de 4 venas secundarias a cada lado de la vena media; con pedicelos florales de más de 40 mm de longitud y con las bractéolas distribuidas predominantemente en la zona media del pedicelo .....**Sección 3. *Longipedes*** Fern.Alonso

4'—Láminas foliares con 3 venas basales, siendo la vena media mucho más desarrollada que las dos laterales, con más de 4 venas secundarias a cada lado de la vena media; con pedicelos florales generalmente de menos de 40 mm de longitud y bractéolas distribuidas en el tercio distal del pedicelo o ausentes ..... **Sección 2. *Castano*** Fern.Alonso

**Clave para la identificación de las especies del género *Matisia* sección 1. *Calyculatae* Fern.Alonso**

1--Cáliz floral y cáliz fructífero sin alas longitudinales visibles (muy raramente con 1-3 alas parciales –solo en la zona distal- en *M. sanblasensis*)..... (GRUPO 1**).....3**.

1'--Cáliz floral y cáliz fructífero con alas longitudinales visibles (3)5-10 alas .....2

2--Cáliz floral y cáliz fructífero con (3-)5 alas longitudinales..... (GRUPO 2**).....9**

2'--Cáliz floral y cáliz fructífero con 10 alas longitudinales (raramente con sólo 5-8 alas desarrolladas en *M. boyacensis*)..... (GRUPO 3**).....16**

**GRUPO 1.**

3—Yemas terminales con catáfilos 18-25 mm de longitud; láminas con indumento denso estrellado, de radios largos (2-3 mm) en el envés; flores en racimos largos (hasta 50 ó más cm), péndulos, bracteados .....**22-*M. racemifera*** Fern.Alonso

3'—Yemas terminales con catáfilos hasta de 10-13 mm de longitud; láminas con indumento estrellado, fasciculado o flocoso, de radios cortos (hasta 1,5 mm de longitud) en el envés; flores generalmente solitarias, opuestas a las hojas .....4

4—Yemas terminales con catáfilos estipulares fasciculados, estrechamente lanceolados o linear-subulados; hojas membranoso-cartáceas, largamente apiculado-caudadas (cauda de 2-5 cm), con la superficie superior gruesamente abollada (bullada); pedicelo fructífero 3-5 mm de longitud, con bractéolas de 3-4 mm de longitud ..... ..... **27-*M. valdes-bermejoi*** Fern.Alonso

4'—Yemas terminales con catáfilos no fasciculados, elíptico-ovados; hojas cartáceas o subcartáceas, no caudadas ni abolladas (bulladas); pedicelo fructífero mayor de 6 mm de longitud; bractéolas mayores de 4 mm de longitud .....5

5—Hojas con láminas linear-lanceoladas o estrechamente lanceoladas, con 3 venas basales y 2-3 venas secundarias a cada lado de la vena media; pedicelo fructífero con bractéolas 16-20 mm de longitud; fruto estrechamente elipsoide, rostrado ..... **7-*M. buenaventurae*** Fern.Alonso

5'—Hojas con láminas ovadas, obovadas u oblanceoladas, con (3)4-5 venas primarias basales y 3-6 venas secundarias a cada lado de la vena media; pedicelo fructífero con bractéolas generalmente menores de 15 mm de longitud; fruto ovoide, fusiforme o anchamente elípsoide .....**6**

6—Pedicelo floral 6-10 mm de longitud .....**7**

6'—Pedicelo floral 13-30 mm de longitud .....**8**

7—Yema terminal estrechamente triangular, 6-10 × 2-3 mm; láminas foliares con 5-6 venas secundarias a cada lado de la vena media; indumento equinado-tuberculado en el envés; pedicelo floral con 3 bractéolas verticiladas 9-13 × 2-8 mm; cáliz fructífero recubriendo el fruto en ½ de su longitud; fruto anchamente elipsoide 24-33 × 15-24 mm .....**10-*M. exalata*** W.S. Alverson

7'—Yema terminal cónica u ovoide, 4-6 × 3 mm; láminas foliares con (4-)5 venas secundarias a cada lado de la vena media; indumento flocoso en el envés; pedicelo floral con 2-3 bractéolas subverticiladas 6-9 × 1,5-2 mm; cáliz fructífero recubriendo el fruto en solo 1/3 de su longitud; fruto ovoide-fusiforme 40-46 × 25-32 mm .....**11-*M. floccosa*** Fern.Alonso

8—Hojas con láminas cartáceas o subcoriáceas, obovado-elípticas a oblongas; indumento estrellado muy fino en el envés; pedicelo floral 15-30 mm de longitud, con bractéolas subverticiladas, caducas, 6-8 mm de longitud; cáliz fructífero recubriendo el fruto en 1/3 de su longitud .....**16-*M. leptandra*** (Cuatrec.) Cuatrec.

8'—Hojas con láminas membranosas o membranoso-cartáceas, anchamente oblanceoladas a oblanceoladas; indumento estrellado-fasciculado, flocoso en el envés; pedicelo floral 13-16 mm de longitud, con bractéolas verticiladas, persistentes, 15-18 mm de longitud; cáliz fructífero recubriendo el fruto en 1/2 de su longitud ..... **18-*M. oibae*** Fern.Alonso

**GRUPO 2.**

9—Hojas con láminas membranoso-cartáceas; pedicelo floral (40-)45-85 mm de longitud .....**24-*M. sanblasensis*** (A. Robyns) Cuatrec.

9'—Hojas con láminas cartáceas, subcoriáceas o coriáceas; pedicelo floral 10-45(-50) mm de longitud .....**10**

10—Árbolitos o árboles 2-9 m (raramente hasta 15 m); hojas con láminas con 3 venas basales y 2-3 venas secundarias a cada lado de la vena media; pedicelo floral con bractéolas en la base del cáliz, dos de ellas muy anchas, de 10-12 × 5 mm .....**13-*M. huaoranica*** Fern.Alonso

10'—Árboles 10-35 m; hojas con láminas con más de 3 venas basales y (3-)4-5 venas secundarias a cada lado de la vena media; pedicelo floral con bractéolas al final del pedicelo, de tamaño similar .....**11**

11—Hojas con láminas cartáceas o subcartáceas; cáliz fructífero con 5 alas grandes, uniformes; cáliz fructífero recubriendo el fruto en ½ de su longitud .....**12**

11'—Hojas con láminas subcoriáceas o coriáceas; cáliz fructífero con (1-)3-5 alas no uniformes, desigualmente desarrolladas; cáliz fructífero recubriendo el fruto en 1/3 a ½ de su longitud .....**13**

12—Hojas con láminas con (3-)4 venas secundarias a cada lado de la vena media; pedicelo floral con bractéolas subverticiladas estando al menos 1 de ellas a diferente nivel, bractéolas 8-18 × 2-3,5 mm; pedicelo fructífero 33-50 mm de longitud; fruto elipsoide-obovoide .....**20-*M. pacifica*** Fern.Alonso

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):676-707, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3327

12'—Hojas con láminas con 4-5 venas secundarias a cada lado de la vena media; pedicelo floral con bractéolas verticiladas de 10-18 × 4-6 mm; pedicelo fructífero 18-30 mm de longitud; fruto ovoide-subgloboso .....**6-*M. bracteolosa*** Ducke

13—Hojas con láminas con 4-5 venas secundarias a cada lado de la vena media, con indumento equinado-fasciculado denso en el envés; pedicelo fructífero 25-52 mm de longitud .....**2-*M. andaquina*** Fern.Alonso

13'—Hojas con láminas con 3(-4) venas secundarias a cada lado de la vena media, con indumento estrellado diminuto o glabrescente en el envés; pedicelo fructífero 10-20 mm de longitud .....**14**

14—Hojas con láminas estrechamente lanceoladas o lanceolado-elípticas; pedicelo floral con bractéolas subverticiladas, las bractéolas 6-8 × 1,5 mm; pedúnculo fructífero 16-20 mm de longitud; cáliz fructífero recubriendo 2/3 del fruto ..... ..... **4-*M. archidonae*** Fern.Alonso

14'—Hojas con láminas estrechamente oblongas u oblanceoladas; pedicelo floral con bractéolas verticiladas, las bractéolas 3-7 × 2-3 mm; pedúnculo fructífero 10-15 mm de longitud; cáliz fructífero recubriendo solo 1/3 del fruto .....**15**

15—Árboles 10-15 m; láminas con 3 venas basales primarias; flores solitarias opuestas a las hojas; pedicelo floral con bractéolas persistentes, 5-7 × 2-3 mm; cáliz floral 14-18 mm de longitud; fruto ovoide o subpiriforme .....**17-*M. lomensis*** (Cuatrec.) Cuatrec.

15'—Árboles 15-35 m; láminas con 3 venas basales primarias y 2 más submarginales; flores agrupadas en numerosos braquiblastos nodosos con 2-5(-7) flores, ubicados en las ramas terminales; pedicelo floral con bractéolas persistentes, 3-5 × 2-3 mm; cáliz floral 9-12 mm de longitud; fruto globoso a anchamente ovoide .....**19-*M. oritolumbaquina*** Fern.Alonso

**GRUPO 3**

16—Yemas terminales con catáfilos (15)20-45 × 4-15 mm; indumento estrellado largo, con radios mayores a 2,5 mm de longitud .....**17**

16'—Yemas terminales con catáfilos hasta 9-15(-20) mm de longitud; indumento estrellado o fasciculado con radios de menos de 2 mm de longitud .....**18**

17—Estípulas 35-50 × 15-25 mm; pecíolo 25-38 mm de longitud; láminas oblanceoladas a obovadas, con 3 (+2) venas basales primarias y no bulladas (ampollosas) o levemente bulladas por el haz; pedúnculo fructífero 10 mm de longitud ..... ..... **12-*M. hirsutissima*** Fern.Alonso

17'—Estípulas 20-25 × 4-5 mm; pecíolo 18-22 mm de longitud; láminas anchamente oblanceoladas o anchamente obovadas, con 4 (+2) venas basales primarias y llamativamente bulladas (ampollosas) por el haz; pedúnculo fructífero 12-15 mm de longitud ..... ..... **25-*M. serpicostata*** Fern.Alonso

18—Catáfilos estrechamente lanceolados, 9-20 × 1-5 mm; estípulas estrechamente lanceoladas, 6-13 x 1-4 mm; pedúnculo fructífero 3-10 mm de longitud .....**19**

18'—Catáfilos triangulares o estrechamente triangulares menores de 10 mm de longitud; estípulas estrechamente triangulares, menores de 6-7 mm; pedúnculo fructífero mayor de 10 mm de longitud .....**20**

19—Yemas terminales con catáfilos 9-20 × 3,5 mm; estípulas estrechamente lanceoladas, 9-13 × 3-4 mm; hojas con láminas lanceoladas a estrechamente lanceoladas; pedúnculo fructífero 3-7 mm; cáliz fructífero recubriendo 1/3 (1/2) del fruto ..... ..... **23-*M. rufula*** Fern.Alonso

19'—Yemas terminales con catáfilos 9-13 × 1-1,5 mm; estípulas linear-lanceoladas, 6-13 × 1-1,5 mm; hojas con láminas oblanceoladas a estrechamente oblongas; pedúnculo fructífero 7-10 mm; cáliz fructífero recubriendo 1/2 a 2/3 del fruto .....**3-*M. aquilarum*** Fern.Alonso & Campos-Pineda

20—Pedúnculo fructífero 12-20 mm de longitud .....**21**

20'—Pedúnculo fructífero mayor de (20-)25 mm de longitud .....**23**

21—Árbustos o arbolitos 2-5(-7) m; láminas membranáceas ..... ..... **26-*M. tarapacana*** Fern.Alonso

21'—Árboles (8-)10-25 m; láminas cartáceas o coriáceas .....**22**

22—Yemas terminales con catáfilos linear-subulados, agudos, 4-8 × 1,5 mm, con indumento estrellado-fasciculado; láminas glabrescentes, con 3 venas basales principales y 2 venas secundarias a cada lado de la vena media, en la mitad distal de la lámina; fruto verde amarillento en la madurez, elipsoide a anchamente elipsoide, 20-25 × 15-17 mm .....**1-*M. altoamazonica*** Fern.Alonso

22'—Yemas terminales con catáfilos anchamente lanceolados, obtusos apicalmente, 4-6 × 2-3 mm, con indumento tomentoso-flocoso; láminas con indumento corto estrellado, áspero al tacto; con 5 venas basales y 1-2 venas secundarias a cada lado de la vena media, ubicadas en el tercio distal de la lámina; fruto marrón castaño en la madurez, ovoide, 32-34 × 25 mm .....**8-*M. chocoensis*** Fern.Alonso

23—Flores dispuestas en zona defoliada subterminal de ramas cortas, asociadas a las cicatrices de abscisión de las hojas; pedicelo floral con bractéolas anchamente ovadas a triangulares ligeramente soldadas entre sí; cáliz fructífero con alas amplias, sinuosas, muy elevadas, (4-)5-7 mm de alto .....**21-*M. pseudobracteolosa*** Fern.Alonso

23'—Flores dispuestas en las ramas, opuestas a las hojas; pedicelo floral con las bractéolas triangulares o cordadas y libres en su base; cáliz fructífero con alas sinuosas, hasta de 4(-5) mm de alto .....**24.**

24—Hojas con estípulas persistentes, subcoriáceas; láminas subcartáceas, anchamente obovadas; pedicelos florales con dos de las tres bractéolas muy anchamentre triangulares y cordadas en su base, 10-11 mm de anchura y una tercera bractéola más estrecha; fruto ovoide, apiculado .....**9-*M. esmeraldana*** Fern.Alonso

24'—Hojas con estípulas decíduas, membranáceas o subcartáceas; láminas coriáceas o subcoriáceas, ovadas, obovadas, oblongas o elípticas; pedicelo floral con las tres bractéolas de similar anchura, 3,5-9 mm, subtriangular-cordadas; fruto globoso a elíptico-ovoide .....**25**

25—Hojas ovadas a obovadas, con domacios barbados en la confluencia de las venas secundarias del envés con la vena media; cáliz fructífero con 10 alas pronunciadas, hasta de 3-4 mm de alto; fruto estrechamente elipsoide a estrechamente ovoide, el doble de largo que de ancho ..... **5-*M. jefensis*** (A. Robyns & S. Nilsson) W.S. Alverson

25'—Hojas oblanceoladas a ovado-elípticas, sin domacios en el envés; cáliz fructífero con 5-7(10) alas no uniformes, generalmente cinco más elevadas; fruto globoso, ovoide o anchamente elipsoide, tan largo como ancho .....**26**

26—Árboles hasta de 30 m; hojas con láminas oblanceoladas u oblanceolado-oblongas, con indumento equinado-fasciculado en el envés; pedúnculo fructífero 35-55 mm de longitud; cáliz fructífero con 5 alas bien desarrolladas hasta de 4(-5) mm de alto en zona media y distal, alternando con otras cinco poco elevadas, de 2-3 mm; fruto ovoide, 35-40 × 30-35 mm .....**14-*M. idroboi*** Cuatrec.

26'—Árboles 10-15 m; hojas con láminas ovadas a elípticas, con indumento fasciculado y flocoso en el envés; pedúnculo fructífero 26-34 mm de longitud; cáliz fructífero con (3-)5-8(-10) alas con con desigual desarrollo, cinco elevadas en su zona media hasta 3-4 mm de alto; fruto globoso a anchamente elipsoide, 20-23 × 23 mm ..... ..... **5-*M. boyacensis*** Torrejano-M. et al.

## Información suplementaria

Ver la información suplementaria en https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3327/5323

## Agradecimientos

Al Real Jardín Botánico del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (CSIC), que facilitó el desarrollo de las investigaciones llevadas a cabo en el género *Matisia* Bonpl. (Malvaceae), con apoyo del proyecto PIE del CSIC: 200930I071. A los curadores de herbarios BM, BR, CHOCO, COAH, COL, CR, CUVC, F, FMB, K. HJBGP, HUAZ, HUT, JAUM, MA, MRDEL, MO, MOL, NY, PMA, QCA, U, UDBC, US, USM y WIS, que facilitaron la consulta de las muestras o el envío de préstamos para estudio; igualmente a los colegas que remitieron especímenes o imágenes para identificación. A Carlos Parra (COL) su colaboración con el envío de préstamos desde COL, el manejo de los materiales en estudio en las instalaciones del Instituto de Ciencias Naturales (UN, Bogotá) y las valiosas observaciones al manuscrito; igualmente a Julio Betancur y Laura Clavijo (COL) por las facilidades dadas durante las visitas al Herbario Nacional. Mi agradecimiento también al Dr. Larry Door (US) por el envío de algunas imágenes e información asociada sobre de las colecciones de E.H. Little en Colombia. A Ernesto Campos (SCZ) por su habitual colaboración con la edición de algunas imágenes o láminas incluidas en este trabajo. A Marcela Morales, Eugenia de Brieva y Juan Luis Castillo que ayudaron con la elaboración de algunas láminas incluidas en este trabajo.

## Conflicto de intereses

El autor declara que no tiene conflicto de intereses.

## Referencias

**Alverson W.S.** (1986). *Quararibea* Aubl. s. l. (Bombacaceae) in Mexico, Central America and the Antilles: A taxonomic study. [Ph.D. thesis]. [Madison, Wisconsin]: University of Wisconsin.

**Alverson, W.S.** (1987). A new subspecies of *Quararibea funebris* (Bombacaceae) from Nicaragua. *Annals of the Missouri Botanical Garden, 74*(1), 919-922.

**Alverson, W.S.** (1989). *Matisia* and *Quararibea* (Bombacaceae) should be retained as separate genera. *Taxon, 38,* 377-388. doi: https://doi.org/10.2307/1222268

**Anónimo.** (1993). Elbert Luther Little, Jr. Oklahoma Scientist of the Year. A botanist who began in Oklahoma and achieved and international reputation. *The Procedings of the Oklahoma Academy of Sciences, 73,* 81-82.

**Basto, M.B.** (2109). *Zonas de vida en el departamento del Caquetá, Colombia, basado en los escenarios de emisión de cambio climático para el periodo 2011-2100.* Universidad Surcolombiana. Doctorado. Educ. y Cult. Ambiental. Neiva. Huila. [*Tesis Doctorado*, 224 pp.].

**Brako, L. & Zarucchi, J. L. (**1993) Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Perú. *Monographs in Systematic Botany of the Missouri Botanical Garden*, *45,* 1-1251.

**Castaño, N., D. Cárdenas, N. Marín, D. Daly, J. Betancur, W. Álvaro, A.A. Barona-Colmenares, S. Sua & M. Peña.** (2020). Diversidad florística del Camino Andakí, municipio de Belén de los Andaquíes (Caquetá, Colombia). *Revista Colombia Amazónica, 12,* 260–268.

**Cornejo, M.** (2015). Los pueblos achuar, awajún, kandozi y wampis. *Nuestros pueblos indígenas* 2. Ministerio de Cultura. Perú, 102 pp. Impr. Talleres Lucent. ISBN: 978-612-612-4162-44-4.

**Correa, M.A., Aldana, J., Caicedo, D.A., Lopez, O.M., Ortiz, C.P., Velasquez, A.** (2021). Flora del departamento del Caquetá, Colombia. Jardín Botánico Uniamazonía: 15 años investigando la flora amazónica colombiana. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, 4*(4), 6485-6504. 10.34188/bjaerv4n4-129

**Cuatrecasas, J.** (1948). Studies in South American Plants, I. *Lloydia, 11*(3), 185-225.

**Cuatrecasas, J.** (1971). Miscellaneous notes on neotropical flora. *Phytologia, 20,* 465-481.

**Dugand, A.** (1955). Noticias botánicas colombianas XI. *Caldasia 7*(32), 101-128.

**Faber-Langendoen, D.** (1992). Ecological constraints on rain forest management at Bajo Calima, western Colombia. *Forest Ecology and Management, 53,* 213-244.

**Fernández-Alonso, J.L.** (1992). Una nueva especie de *Matisia* (Bombacaceae-Quararibeae) del occidente de Colombia. *Anales del Jardín Botánico de Madrid, 50*(2), 171-174.

**Fernández-Alonso, J.L.** (1999). Nueva especie y notas del género *Quararibea* (Bombacaceae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *23*(Supl. Espec.), 49-52.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2001a). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae I. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia, Quararibea* y *Spirotheca. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 25*(95), 183-206.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2001b). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae II – Novedades taxonómicas y corologicas en *Matisia* y *Quararibea* del Norte de Suramérica. *Caldasia, 23*(2), 251-283.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2016). *Matisia* (Malvaceae). p. 1547-1551, En Bernal R., Gradstein S.R., Celis M. (eds.). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*, vol 2. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional Colombia.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2021). Malvaceae Neotropicae novae vel minus cognitae X. Nuevas especies de *Quararibea* de Colombia y Ecuador. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, *78*(2),1-16. e112. https://doi.org/10.3989/ajbm.2584

**Fernández-Alonso, J.L.** (2022). Malvaceae Neotropicae novae vel minus cognitae XI. Una nueva *Quararibea* de Panamá y notas sobre especies afines. *Caldasia 44*(3), 641-647. doi: https://doi.org/10.15446/caldasia.v44n3.97215

**Fernández-Alonso, J.L.** (2024). Cuatro nuevas especies de *Quararibea* "grupo grandifolia" (Malvaceae) de Colombia y Ecuador. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 48*(186), 38-64. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.2233

**Fernández-Alonso, J.L.** (2026). Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XIV. Ocho especies nuevas de *Matisia* de Sudamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 50*(196), ???-???. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3318

**Fernández-Alonso, J.L. & Campos-Pineda, E.** (2023). *Matisia gentryi* and *M. tinamastiana* (Malvaceae), two species newly recorded from Panamá and an updated key to *Matisia* species in this country. *Check List, 19*(6), 1013-1020. https://doi.org/10.15560/19.6.1013

**Fernández-Alonso, J.L. & Campos-Pineda, E.** (2024). *Malvaceae neotropicae novae vel minuscognitae XII*. Nuevas especies de *Matisia* de Colombia y Panamá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 48*(189), 897-921. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3072

**Fernández Alvarado, J.C., Carrasco, D.I., Bocanegra, B., Cervera, R.L., Rojas, C.B.** (2023). La educación y cosmovisión Awajún. *Universidad, Ciencia y Tecnología, 24*(121), 28-41. https://doi.org/10.47460/uct.v27i121.752

**Ferreira C.M., de Toni K.L., Bovini M.** (2018). Miscellaneous additions to *Quararibea* (Malvaceae) from the Atlantic Forest of Southeast Brazil. *Systematic Botany, 43,* 1011-1019. doi: https://doi.org/10.1600/036364418X697616º

**Ferreira, C.M.** (2020). *Quararibea*, in Flora do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB23600. [Consultado en 22 nov. 2024]

**Grant, S., von Konrat, M.** (2023). Field Museum of Natural History (Botany) Seed Plant Collection. Version11.16. Field Museum. Occurrence dataset https://doi.org/10.15468/nxnqzf accessed via GBIF.org on2025-04-03. https://www.gbif.org/occurrence/1847942729

**Harris, J.G., Harris, M.W.** (2001). *Plant identification terminology: An illustrated glossary.* 2nd ed. Spring Lake Publishing.

**IUCN** (2022). *Guidelines for using the IUCN Red List categories and criteria*. Version 15.1. Standards and Petitions Committee. IUCN. https://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf

**Little Jr, E.L.** (1948). New species of trees from western Ecuador. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, *38,* 87-105.

**Marín, N.L., Cárdenas, D, Castaño, N., Sua, S.** (2020). Diversidad florística de la cuenca media y alta del río Hacha, Municipio de Florencia (Caquetá). *Revista Colombia Amazónica, 12,* 249-255.

**Pacheco, M., Delgado, M.A.** (ed.). (2013). *Maderas de Colombia. WWF-Colombia,* Global Forest and Trade Network. Programa subregional Amazonas Norte y Chocó Darien. 88 p. ISBN: 978-958-8353-53-1.

**Poveda, C., Rojas, C.A., Rudas, A., Rangel, O. (**2004). El Chocó Biogeográfico: Ambiente físico. En: Rangel O, editor. *Colombia Diversidad Biótica IV: El Chocó biogeográfico/ Costa Pacífica.* Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. p. 1-21.

**Robyns, A.** (1972). Bombacaceae neotropicae novae IV Two new species of *Quararibea* from Amazonia. *Bulletin du Jardin botanique National de Belgique, 42,* 347-352.

**Thiers, B.** (2025). *Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff.* New York Botanical Garden, New York. https://sweetgum.nybg.org/science/ih/

**Zamora N.A., Cascante-Marín A., Choi S., Kim S.Y.** (2017). A new species of *Quararibea* (Malvaceae) from Costa Rica. *Phytoneuron, 67,* 1-6.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):708-731, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4032



Artículo original

# Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XVI. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia* sect. *Longipedes* y clave para sus especies

## Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XVI. Taxonomic and chorological novelties in *Matisia* sect. *Longipedes* and a key for its species

**José Luis Fernández-Alonso**

Departamento de Biodiversidad y Conservación, Real Jardín Botánico RJB-CSIC, C/ Claudio Moyano 1, 28014 Madrid, España

## Resumen

Como nuevo avance al trabajo de revisión que adelanto en el género *Matisia* (Malvaceae), en esta contribución se describen e ilustran dos especies nuevas de Colombia de *Matisia* sección *Longipedes*. Además se presenta nueva información descriptiva y corológica de otras tres especies de la sección y se incluye una clave para las 14 especies actualmente ubicadas en la sección *Longipedes* del género *Matisia.*

**Palabras clave:** Claves, corología, Matisieae, nuevas especies, Suramérica, taxonomía.

## Abstract

As a further advance in the taxonomic revision that I am carrying out on the genus *Matisia* (Malvaceae), this contribution describes and illustrates two new species of *Matisia*, section *Longipedes,* from Colombia. In addition, new descriptive and chorological information is presented for three other species of this section*,* and a key is included for fourteen species currently placed in *Matisia* section *Longipedes.*

**Keywords:** Keys, chorology, Matisieae, new species, South America, taxonomy.

## Introducción

En los trabajos de revisión que venimos adelantando por largo tiempo en el género neotropical de árboles *Matisia* Bonpl. -Malvaceae, Matisieae-, estudios centrados fundamentalmente en la parte morfológica y descriptiva y en la caracterización del hábitat y distribución conocida de las diferentes especies, se propuso una subdivisión del género en cinco secciones (**Fernández-Alonso,** 2001a; 2001b, 2011, 2016; **Fernández-Alonso & Campos-Pineda**, 2024). En un par de trabajos recientes (**Fernández-Alonso**, 2026a, 2026b), han sido propuestas once especies nuevas de la sección *Calyculatae* Fern.Alonso del género *Matisia*, provenientes del norte de Sudamérica, completando la parte descriptiva formal que estaba pendiente en esta sección. Se presentó así mismo una primera clave original para las 27 especies reconocidas en *Matisia* sección *Calyculatae,* para facilitar su reconocimiento (**Fernández-Alonso**, 2026b) y como paso previo a la publicación de la revisión taxonómica formal de la sección (en prep.). En esta tercera entrega, se completa la información descriptiva abordada en *Matisia* sección *Longipedes* Fern.Alonso (**Fernández-Alonso,** 2003; **Fernández-Alonso & Campos-Pineda,** 2024), con la descripción de dos especies nuevas, la publicación de algunas precisiones taxonómicas y corológicas en otras tres especies y la presentación de una primera clave para la identificación de las especies de *Matisia* sección *Longipedes*.

**Citación:** Fernández-Alonso JL. Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XVI. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia* sect. *Longipedes* y clave para sus especies. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):708-731, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4032

**Editor:** Elizabeth Castañeda

**Correspondencia:**
Fernández-Alonso;
jlfernandeza@rjb.csic.es

**Recibido:** 21 de enero de 2026
**Aceptado:** 26 de mayo de 2026
**Publicado en línea:** 30 de junio de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

## Materiales y métodos

El presente trabajo en el que se tratan cinco especies de la seccion *Longipedes* del género *Matisia*, es una continuación y complemento de las entregas XIV y XV de esta misma serie Malvaceae Neotropicae Novae...(**Fernández-Alonso**, 2026a, 2026b). En esta ocasión se revisaron en total 190 colecciones depositadas en los herbarios AFP, BR, CHOCO, COL, CUVC, F, FMB, G, HUA, K, JAUM, JBB, MA, MEDEL, MO, NY, P, TOLI, UDBC, US y VALLE (acrónimos según **Thiers,** 2025). Ha sido fundamental la nueva informacion recabada en recientes recolecciones provenientes de diferentes proyectos y consultas recibidas a través de algunos colegas. En especial el material de los departamentos de Antioquia (A. Cogollo, H. David), Cauca (J. Sánchez Taborda) y Chocó (N.F. Parra Lizcano y B. Villanueva). Se contó además con algunas colecciones personales e imágenes de campo, obtenidas en expediciones o cursos prácticos efectuados en el departamento del Chocó, en los años 1990 con la Agencia Española de Cooperación Internacional AECID y el Herbario CHOCO y en 1998 con la Asociación Colombiana de Herbarios (ACH) en Quibdó.

En el estudio morfológico y de distribución geográfica se siguió básicamante la metodología taxonómica ya referida en **Fernández-Alonso** (2025) y en contribuciones anteriores (**Fernández Alonso** 1996, 2001a). En la terminología descriptiva además de la referida en los trabajos mencionados, se siguió a **Font i Quer** (1985), **Harris & Harris** (2001) y **Ellis *et al.*** (2009). Se tomaron también algunas fotografías de acercamiento de indumentos en yemas terminales, estípulas y estructuras florales, con lupa binocular Nikon SMZ645 y lente de 100x acoplada a una cámara Canon PowerShot SX260HS. Con la información actual, no se contempló en este estudio la evaluación del estado de conservación de las especies de acuerdo con las categorías UICN (2022), objetivo previsto para un trabajo posterior.

## Resultados y discusión

**1--*Matisia samanae*** Fern.Alonso, sp. nov. (**Figuras 1-3, 1S-3S**)

**TIPO**: COLOMBIA. **Departamento de Antioquia:** Región de San Carlos-Samaná, municipio de San Carlos, Alto de Samaná, Vereda Miraflores, dentro del bosque, 820-900 m, 14 jun 1989, (fl), *R. Fonnegra 3042, F.J. Roldán y J. Betancur* (holotipo HUA 61794, isótipos BR 0000027975831, COL, MO, NY, US). (**Figura 1S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4032/5356)

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia intricata* (Robyns & Nilsson) Alvers. from which it differs by having leaves with petioles 20-50 mm long (vs. petioles 15-30(-35) mm long in *M. intricata*), leaf blades oblong or obovate-oblong (vs. broadly oblanceolate), floral pedicel 6-9 cm long, with three bracteoles located in the middle or basal third of the pedicel (vs. floral pedicel up to 4-6 cm long, with three bracteoles located distally, near the base of the calyx), androecium with a stamen tube 38-42(-45) mm long and stamen branches 8-9 mm long (vs. stamen tube 25-28 mm long and stamen branches 4-5 mm long), and fruit calyx generally urceolate and constricted distally, covering most (2/3) or all of the fruit lenght (vs. broadly conical fruit calyx covering 1/3 to ½ of the fruit length).

**Árboles** (10-)15-22 m; corteza externa color marrón, verrugosa o cuarteado-fisurada; corteza interna color crema o anaranjada. **Ramas** con hojas dísticas, con frecuencia de tamaños diferentes en la misma porción de la rama. **Yemas terminales** poco conspicuas, de aspecto anchamente cónico, a veces compactas o bien con 4-6 catáfilos estipulares independientes, en posición erecta o erecto-patente; catáfilos 4-6 × 2-3 mm. **Hojas** con **estípulas** poco conspicuas, 2-4 mm de longitud, ferrugíneas, prontamente caducas; **pecíolo** amarillento-tomentoso, flocoso, 20-50 mm de longitud, con pelos estrellado-fasciculados finos, con dos pulvínulos, el proximal poco conspicuo y el distal rectangular, más notorio, 0,8-1 cm de longitud; **láminas** ásperas al tacto, sublustrosas, cartáceas o subcoriáceas en la madurez, de oblongas a obovado-oblongas, 8,5-19 × 3,5-6,5, asimétricas, de base redonda o ligeramente cordado-redondeada; **venas** primarias generalmente 4-5, raramente con dos

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):708-731, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4032

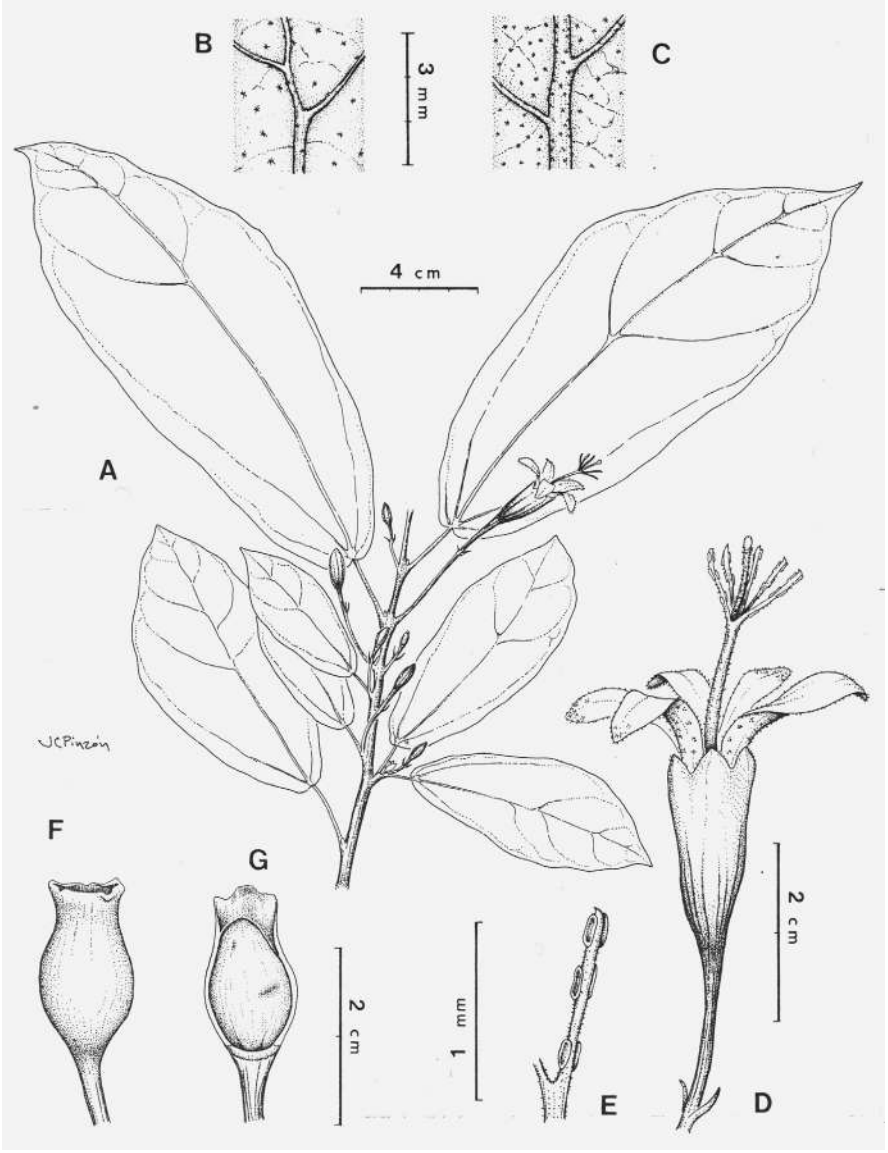



**Figura 1.** ***Matisia samanae*** Fern.Alonso. Lámina de la planta. **A.** Rama terminal con botones florales y una flor. **B.** Detalle del indumento de la lámina por el haz. **C.** Detalle del indumento por el envés. **D.** Flor al inicio de la antesis en vista lateral, mostrando el pedicelo con las bractéolas. **E.** Detalle del extremo de la columna estaminal y de una rama estaminal. **F.** Fruto joven rodeado por el cáliz, en vista lateral. **G.** Corte sagital del cáliz fructífero mostrando al fruto joven en su interior. [A-E a partir de *Cogollo 4977* (JAUM 21318); F-G a partir de *Cogollo 282* (JAUM 12838)]. Ilustrador, J.C. Pinzón (ICN-UN).

venas submarginales poco conspicuas, excavado impresas por el haz y muy resaltados por el envés; con 3 **venas secundarias** a cada lado de la vena media, ubicadas en el tercio distal; venación de tercer orden paralela y perpendicular a las venas primarias y secundarias; venas de cuarto, quinto y sexto orden bien marcadas también por el envés, estas con pelos cortos estrellados, dispuestos sobre la reticulación; **envés** con indumento estrellado corto sobre los nevios, a veces muy notorio, estrellado ferrugíneo en el envés e indumento estrellado disperso por la cara superior; venación terciaria paralela y cuaternaria reticulada, ambas poco resaltadas. Zonas floríferas cortas al final de las ramas; **pedicelo floral** (5,5)6-9 cm de longitud, con **bractéolas** persistentes, ubicadas en la zona media, raramente en el tercio basal del pedicelo; linear-subuladas 8-11 mm de longitud, con indumento

estrellado-fasciculado de pelos cortos. **Botón floral** fusiforme o estrechamente fusiforme (**Figuras 1S-3S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4032/5356), 10-estriado-aristado longitudinalmente; **cáliz** marrón-azufrado (en vivo), infundibuliforme o cónico-infundibuliforme, 18-21 × 7-10(-12) mm, con 10 costuras o aristas longitudinales generalmente visibles, con 3-4 lóbulos distales triangulares 2-3 mm de longitud; con indumento estrellado-fasciculado; **corola** blanca, cinco pétalos similares, patentes o reflexos en la antesis; estrechamente linear-espatulados, y triangular obtusos en el ápice, 32-38 × 4-5 mm de ancho en la zona distal y 2-2,5 mm en el tercio basal, externamente con indumento blanco, estrellado fino y densamente dispuesto en la cara interna, glabros. **Androceo** zigomorfo con columna estaminal 38-42(-45) mm de longitud, subglabra, con sólo algunas papilas gruesas y alargadas; con **ramas estaminales** 8-9 mm de longitud, orientadas unilateralmente, con pelos finos dispersos; generalmente con 8 tecas por rama, tecas alargadas 1,5-2 × 1 mm. **Estilo** 46-50 mm de longitud, con indumento estrellado fino y denso; **estigma** alargado-elíptico, estriado. **Pedúnculo fructífero** aparentemente péndulo, 70-90 mm × 2-3 mm de grosor en la mitad distal; bractéolas a veces presentes o con cicatrices de abscisión de las bractéolas caducas en la zona media. **Cáliz fructífero**




**Figura 2.** ***Matisia samanae*** Fern.Alonso. Detalles de las plantas fructificadas. **A.** Frutos inmaduros totalmente encerrados en el cáliz fructífero. **B.** Frutos maduros recubiertos por el cáliz, mostrando sólo su ápice. **C.** Detalle del cáliz fructífero y del fruto maduro en vista lateral, mostrando el indumento estrellado-fasciculado del cáliz. **D.** Sección sagital de cáliz y del fruto inmaduro y sección transversal del fruto en su zona media mostrando los cinco pirenos. [A de *Cogollo 282* (JAUM 12838); B de *Correa* 125 (HUA 117371); C de *Barreto 926* (HUA 200512); D, de *Vera 308* (MEDEL 48236)].

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):708-731, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4032

verdoso en fresco (marrón en seco), urceolado o raramente cupuliforme, rodeando al fruto en su mayor parte, a veces totalmente (**Figuras 2, 3**), por lo general constreñido en su zona distal, raramente recubriendo al fruto sólo hasta la mitad, 2-2,5 × 2,2 cm, a menudo 2-4 lobulado-rasgado distalmente, con indumento marrón, estrellado-fasciculado, densamente dispuesto. **Fruto** maduro verdoso-ferrugíneo, de orbicular a ovoide, generalmente achatado en la parte distal, 18-25 × 15-20(-22) mm; exocarpo marrón-rojizo, con brillo, con indumento tuberculado-lepidoto, muy corto; **mesocarpo** fibroso, marrón rojizo en seco; con cinco pirenos desarrollados (**Figura 2**), estrechamente fusiforme-elipsoides ca. 15 × 5 mm, ligeramente comprimidos lateralmente (inmaduros).

**Etimología.** El nombre hace referencia a la localidad tipo y a la cuenca del río Samaná, en el Magdalena Medio de los departamentos colombianos de Antioquia y Caldas, el principal sector de donde se conoce a esta especie.

**Distribución y hábitat.** Sólo conocida de la región de bosques muy húmedos o pluviales premontanos o de la zona de confluencia con bosque muy húmedos tropicales (500)700-1000(1600) m de Antioqia y Caldas. Por lo general son árboles de la franja de sotobosque, en el interior del bosque, de menor porte que la especie considerada afin (*M. intricata*), que crece en la región amazónica.

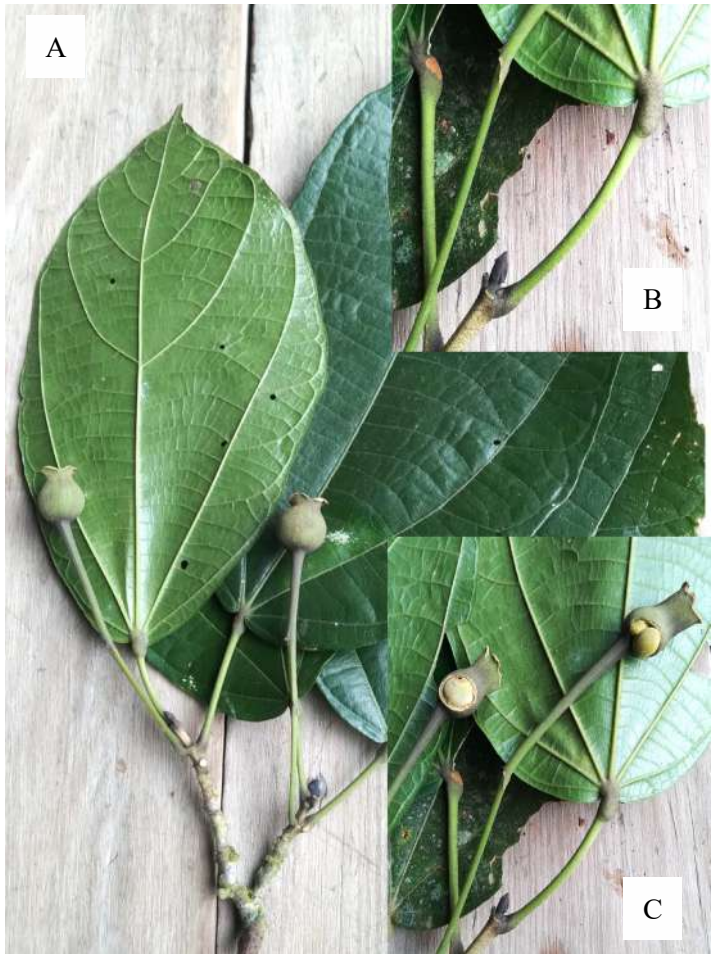



**Figura 3.** ***Matisia samanae*** Fern.Alonso. Fotografiado en río Samaná, Antioquia. **A.** Rama terminal mostrando las hojas glabrescentes y lustrosas y dos frutos inmaduros. **B.** Detalle de la yema terminal y el pulvínulo distal del pecíolo visto por el envés. **C.** Detalle del largo pedúnculo fructífero con las cicatrices de abscisión de las bractéolas y los frutos jóvenes inmaduros en la base del cáliz fructífero (seccionado), en vista lateral. [Fotos de A. Cogollo, JAUM].

**Nombres comunes y usos.** En el departamento de Antioquia se conocen los nombres de "bolenillo" en Cáceres (*Cogollo 8922,* JAUM); "guasco" en el municipio de Anorí (*Vera 202,* HUA) y "zapatillo" San Carlos (Correa *125,* HUA*).* En Anorí (*Vera 202*), donde se cataloga a esta especie como maderable, probablemente su corteza se utilice para cordajes improvisados (o "guasca", como se denomina en el campo) a lo que aludiría su nombre vernáculo.

**Afinidades y notas taxonómicas.** *Matisia samanae* es un árbol de los bosques muy húmedos o pluviales premontanos del Magdalena Medio (Colombia) entre los (600)800-1200 m, a diferencia de *M. intricata*, su especie más afín, propia de los bosques bajos de la Amazonía (Brasil, Colombia y Perú) por debajo de los 500 m. De *Matisia sanblasensis* (A. Robyns) Cuatrec., especie también presente en el norte de Antioquia, se separa con facilidad por presentar ésta hojas membranáceo-cartáceas con sólo tres venas basales y las bractéolas en posición distal, agrupadas a modo de calículo (Secc. *Calyculatae* Fern. Alonso). También guarda ligera relación con otras especies de la sección *Matisia*, como *M. palanquiana* (A. Robyns) W.S. Alverson de la costa pacífica de Ecuador y *M. tinamastiana* A. Estrada & Cascante de Costa Rica y Panamá (**Estrada & Cascante,** 1998, **Cascante,** 2020; **Fernández-Alonso & Campos-Pineda**, 2023). Ambas especies tienen hojas con mayor número de venas basales (más de 5) y frutos maduros siempre desprovistos de la cúpula calicina.

Entre las colecciones divergentes o atípicas asignadas a esta especie están, de la zona baja de Anorí, *Taborda 657,* que presenta hojas inusualmente estrechas y marcadamente acuminadas. La colección *C. Velasquez 243*, de San Carlos, Antioquia, también infértil, es una planta de hojas coriáceas, muy anchas y representaría quizás una transición a *M. sclerophylla* Cuatrec., del pacífico de Colombia (Cauca-Valle). Otra colección estudiada del municipio de Anorí corresponde a un árbol infértil, *C.E. González 2397* (COL 437443), y aunque vegetativamente se adscribe a esta especie por los caracteres foliares e indumento, presenta estípulas setáceas y probablemente represente a un taxón diferente, que no es posible identificar en ausencia de flores o frutos.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA. **Antioquia:** municipio de Anorí, vereda El Roble, Reserva La Forzosa, 6º59'N 75º08'O, 1750 m, árbol 12 m, mar 2006 (fr), *L. H. Barreto et al. 926* (HUA 200512); región de San Carlos - Samaná, corregimiento Alto de Samaná, vereda Miraflores, finca El Desespero, 6º05'N 74º56'O, 710-820 m, 27 oct 1989 (fr), *R. Callejas et al. 8622* (HUA 68188); ibídem, autopista Medellín-Bogotá, sector Río Samaná-Río Claro, municipio de San Luis, vereda La Josefina, 790 m, 17 dic 1982 (fr, joven), *A. Cogollo 282 & C.C. Estrada* (JAUM 12838); ibídem, San Luis, vereda La Josefina, camino hacia El Tulipán, margen derecho de la Quebrada La Mariola, a 1,5 km de la autopista Medellín-Bogotá, árbol 8 m, 30 abr 1991 (fl), *A. Cogollo et al. 4977* (COL, FMB 31298; JAUM 21318, JAUM 21319); municipio de Cáceres, vereda Cacerí, Reserva N. R. Refugio Bajo Cauca-Nechí, 430-450 m, bh-T/bmh-T, árbol 8 m, n.v. "bolenillo", 11 jun 1996 (fl), *A. Cogollo et al. 8922* (JAUM); Oriente antioqueño, cañón del río Melcocho, 18 nov 1922, *A. Cogollo s.n.* (JAUM); municipio de San Carlos, vereda Patio Bonito, Alto El Cerrón, Línea de transmisión S. Carlos-S. Marcos, 1100 m, transición bmh-PM/bh-T, 17 feb 1998, *E. Correa et al. 125* (HUA 117371); ibídem, Cordillera Central, municipio de Anorí, vereda La Forzosa, 1600 m, árbol 7 m, estéril, 25 ago 1999, *C.E. González 2469* (COL 437444); municipio de Remedios, sitio La Calera, desvío Remedios-Zaragoza, hacia Segovia, 900 m, árbol 5 m, estéril, 17 dic 1997, *F.J. Roldán et al. 3069* (HUA); municipio de San Luis, vereda Manizales, 1656 m, árbol 9 m, 24 dic 2012 (fr), *D. Suescun et al. 1179* (HUA 184175); municipio de Anorí, vereda El Zafiro, sector Chica, 1701 m, árbol 8 m, estéril, 22 nov 2010, *A. Taborda 473 & L. Londoño* (HUA 181338); ibídem, corregimiento La Liberia, Secor Usurá, 444 m, árbol 14 m (fl), 20 ene 2011, *A. Taborda et al. 657* (HUA 181209); municipio de Amalfí, flanco N de la Cordillera Central, vereda Salazar, finca Bodega Vieja, Bp-PM, bosque primario intervenido, 1300-1600 m, árbol 16 m, 15 ene 2006 (fr), *G. Téllez et al. 483* (COL 536116); municipio de San Carlos, vereda Patio Bonito, Alto El Cerrón, 1100 m, árbol 7 m

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):708-731, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4032

infertil, 6 may 1998, *C. Velásquez et al. 243* (HUA 117361); municipio de Anorí, vereda Concha Abajo, 650 m, Bmh-T, árbol 12 m, estéril, n.v.:"guasco", maderable, 16 sep 2003, *L.E. Vera et al. 202* (MEDEL); ibídem, árbol 14 m, 16 sep 2003 (fr), *L.E. Vera et al. 205* (MEDEL); ibídem, árbol 12 m, bosque primario intervenido, 26 sep 2003 (fr), *L.E. Vera et al. 308* (MEDEL 48236). **Caldas:** municipio de Samaná, corregimiento de Florencia, 1600-2000 m, 4 oct 1990 (fr), *G. Mahecha et al. 3845* (UDBC 3845).

**2**--***Matisia satingana*** Fern.Alonso, sp. nov. (**Figuras 4,5, 4S**)

**TIPO.** COLOMBIA**. Departamento de Nariño:** municipio de Olaya Herrera, Bocas de Satinga, vereda Guabillales, río Sanquianga, en ambiente de cuangarial, árbol 20 m, 5 mar 1993 (fr), *J.I. Del Valle 218* (holotipo COL 570584, isotipos MEDEL s.n., 2 pliegos).

**Diagnosis.** This species is similar to *Matisia mutatana* Fern. Alonso from which it differs by being trees up to 20 m tall with membranous, oblanceolate or obovate leaves (vs. small trees 5 m tall, with broadly obovate papery leaves in *M. mutatana*), with 3(-4) main

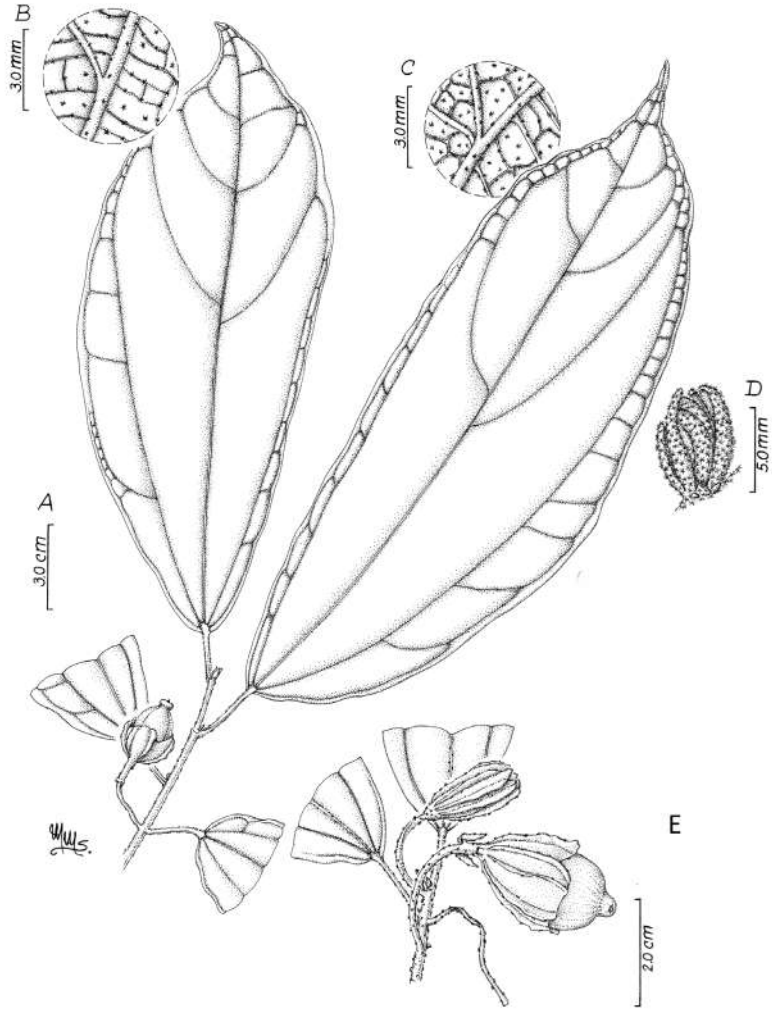



**Figura 4.** ***Matisia satingana*** Fern.Alonso. Lámina. **A.** Parte terminal de una rama con un fruto. **B.** y **C.**, aspecto del indumento de la lámina por haz y envés respectivamente; **D.** Detalle de los catáfilos de la yema terminal, obtusos y densamente cubiertos de indumento estrellado-fasciculado. **E.** Detalle de las bractéolas persistentes y de las alas del cáliz, después de la antesis y en el cáliz que acompaña al fruto maduro. [A-C. a partir de *Olmedo s.n*. (MEDEL); E, a partir del holotipo *Del Valle 218* (MEDEL)]. Ilustradora, Marcela Morales.

basal veins and fine fasciculate-stellate indumentum on the underside (vs. 4-5 main basal veins and flocculent indumentum on the underside), and having a 35-50(-55) mm fruiting peduncle, more or less flexuous (vs. 50-65 mm fruiting peduncle, rigid).

**Árboles** generalmente pequeños o medianos, (6-)7-20 m y 10-30 cm DAP. **Ramas** con corteza externa pardo-amarillenta, arenosa al tacto, lenticelada y corteza interna blanquecina. **Yemas terminales** de aspecto ovoide-elíptico, compactas, 4-5 × 2-2,5 mm, con catáfilos obtusos y densamente recubiertos de indumento estrellado-fasciculado; ramas jóvenes con lenticelas conspicuas. **Hojas** dísticas en la rama; **pecíolo** 13-22 mm de longitud y 2-3 mm de grosor, generalmente con dos pulvínulos poco resaltados; **estípulas** inconspicuas muy prontamente caducas; **láminas** membranosas, oblanceoladas o a veces obovadas, (16-)20-27 × 6-10(-12) cm, generalmente acuminadas o caudadas en el ápice, acumen hasta 15-24 × 5-10 mm, estrechamente redondeado-obtusas en la base; con 3 o a




**Figura 5.** ***Matisia satingana*** Fern.Alonso. Colección tipo, *Del Valle 218*. **A.** Espécimen holotipo COL. **B.** Detalle de la yema terminal, el cáliz fructífero y el fruto maduro. **C.** Frutos en diferente estado de desarrollo en una rama. [A y B del holotipo (COL 570584), C, del isotipo (MEDEL)]

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):708-731, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4032

veces 4 **venas** basales que se prolongan hasta el tercio distal de la lámina, cerrándose en el margen de modo broquidódromo; a veces con una o dos venas más, submarginales, poco conspicuas; venas impreso-excavadas en el haz y conspicuas y resaltadas en el envés; vena media con 3(-4) venas laterales (secundarias) a cada lado, erecto-patentes con respecto a la vena media, ubicadas en la mitad o tercio distal de la lámina; venación de tercer orden perpendicular y paralela; venación de cuarto orden poligonal, poco resaltada en haz y envés; hojas glabrescentes o con **indumento** estrellado-fasciculado muy fino y disperso en el haz y más notorio en el envés. **Flores** dispuestas 1-2, opuestas a las hojas. **Pedicelo** floral generalmente flexuoso, más raramente recto, 25-40 mm de longitud, con indumento equinado-fasciculado, de aspecto ferrugíneo; **bractéolas** generalmente tres, ubicadas en el tercio distal a distinto nivel, en posición subterminal, lineares o linear-lanceoladas, 4-8 × 1,5 mm. **Botón floral** con 10 alas longitudinales, 5 ligeramente más elevadas que las otras cinco. **Cáliz** floral tubular, con 10 alas amplias y sinuosas, cinco más desarrolladas alternando con otras cinco. **Corola** blanca (*fide schaedis*), no vista. **Androceo** con columna estaminal y ramas estaminales blancas (*fide schaedis*), no vistas. **Pedúnculo** fructífero 35-50(-55) mm de longitud, generalmente péndulo y sinuoso, a veces ligeramente engrosado en la porción distal, conservando alguna de las bractéolas linear-falcadas en posición subterminal. **Cáliz fructífero** cupular, recubriendo en sus 2/3 o hasta la mitad al fruto (**Figura 4S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4032/5356), irregularmente 2-4 lobado-rasgado, con 10 alas conspicuas y de aspecto finamente sinuoso, siendo ligeramente más elevadas en la mitad distal del cáliz, hasta 2,5 mm de alto. **Fruto** marrón pálido, en la madurez blanquecino y carnoso; cuando maduro de ovoide a ovoide-eliptico, levemente 5-costado, generalmente apiculado o rostrado, con apículo cilíndrico ca. 4-8 × 5-6 mm en su base; con 5 pirenos fusiformes, ligeramente comprimidos.

**Etimología:** El nombre hace referencia a la localidad típica, en los guandales de Bocas de Satinga, en el municipio de Olaya Herrera (Nariño, Colombia).

**Distribución y hábitat.** Distribuida en el litoral pacífico del sur de Colombia, en donde se conoce de los departamentos de Nariño, Cauca y Valle. Se encuentra a menudo asociada a ambientes con humedad edáfica como los cuangariales y el bosque de guandal mixto (**Del Valle,** 1996; **Urrego & Del Valle,** 2002). En toda esta región del pacífico de Nariño, *M. satingana* crece cerca de otros congéneres como *M. alata* Little, *M. calimana* Cuatrec*., M. castaño* H. Karst & Triana*, M. esmeraldana* Fern.Alonso, *M. giacomettoi* Romero, *M. soegengii* Cuatrec. *y M. longipes* Little (**Fernández-Alonso,** 2016, **Fernández-Alonso,** 2026a).

**Fenología.** En las colecciones de herbario se conocen sólo registros de plantas con frutos, de los meses febrero a agosto.

**Nombres comunes y usos.** Se han localizado cuatro nombres para este árbol, en la mayoría de los casos, similares a los aplicados a otras especies del género *Matisia* en el corredor pacífico de Colombia y Ecuador. “castaño” en Olaya Herrera, Nariño (*Olmedo, s.n*.); “culo de mujer” Olaya Herrera, Nariño (*Del Valle, 218*); “vainillo” Bocas de Satinga, Nariño, (*R. Carmona 18*) y “zapatillo”, probablemente una mala transcripción de “zapotillo”, en Olaya Herrera (*Carmona et al. 54* (COL, JAUM)).

**Afinidades y notas taxonómicas.** En el departamento del Valle, en las zonas más alejadas de las localidades típicas de las costa de Nariño, se presentan plantas (*Devia 2693*) que pudieran representar una transición hacia *M. cuatrecasasiana* Fern.Alonso*,* propia de este sector pacífico del departamento del Valle del Cauca. Aunque presentan hojas con bases más amplias y pedicelos fructíferos más engrosados, pueden diferenciarse porque la especie mencionada presenta pedicelos fructíferos más largos (9-16 cm) y cálices fructíferos desprovistos de alas.

**Especímenes adicionales examinados (paratipos).** COLOMBIA. **Cauca:** municipio de El Tambo, río San Juan del Micay, vereda San Isidro, 50 m, árbol 7 m, 31 ago 1988 (fr), *C. Concha 369 et al.* (AFP 744, COL 368368); municipio de López de Micay, vereda San Isidro, 100 m, árbol 7 m, 29 ago 1988 (fr), *J. Rubiano 369* (COL 617653). **Nariño:** municipio de Olaya Herrera, Bocas de Satinga, vereda Naidizales, 28-30 m, árbol pequeño, n.v.: “vainillo”,

28 feb 1990 (fr), *R. Carmona 18 et al.* (MEDEL s.n., 2 pl.); ibídem, vereda Naidizales, 2º21'N 78º22'O, 20-30 m, árbol 8 m, n.v.: "zapatillo", 3 mar 1990 (fr), *R. Carmona 54 et al.* (COL 617652, JAUM); Ibídem, vereda Naidizales, n. v: "vainillo",13 mar 1990, *R. Carmona 88* (JAUM); municipio de Olaya Herrera, Bocas de Satinga, vereda Guabillales, río Sanquianga, en ambiente de cuangarial, n.v.: "culo de mujer", 5 mar 1993 (fr), *J.I. del Valle 219* (JAUM); Olaya Herrera, Bocas de Satinga, vereda Nueva Floresta, creciendo en bosque de guandal mixto, arbusto 4 m, n.v.: "castaño", "culo de mujer", 12 jun1992, (fr), *L. Olmedo s.n.* (MEDEL s.n.). **Valle del Cauca:** municipio de Buenaventura, corregimiento de Puerto Merizalde, Isla El Ají, mar 1990 (fr), *W. Devia 2963 et al.* (COL 443905).

**3**--***Matisia cuatrecasasiana*** Fern.Alonso, Rev. Acad. Colomb. Ci. Exact. 25(95): 189 (-191; fig. 2). 2001 [Jun 2001] (**Figuras 6, 5S, 6S**)

**TIPO:** COLOMBIA. **Departamento del Valle del Cauca:** río Calima (Región del Chocó), margen izquierda, Quebrada La Brea, bosques, 25-40 m, 20 may 1946, (fr), *J. Cuatrecasas 21141* (holotipo COL 77401/cb 000002414, isotipos BR 0000006961015; F, P cb06645678, US 3501796/ cb 01221645, VALLE).

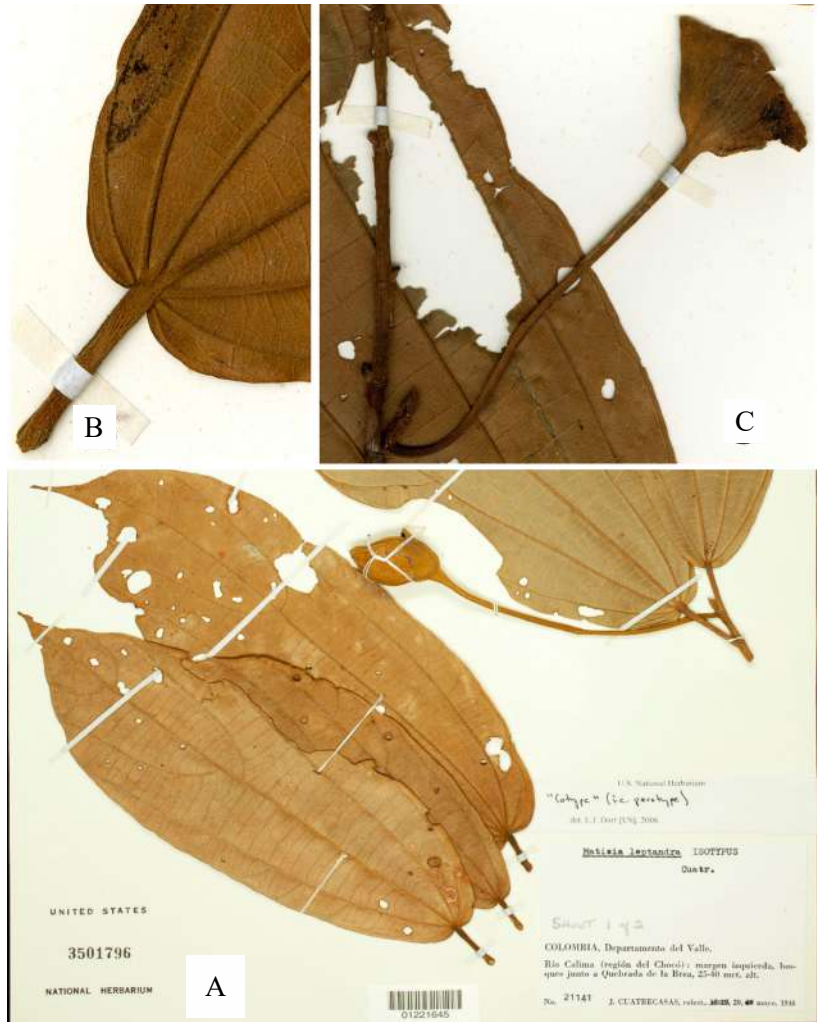



**Figura 6.** ***Matisia cuatrecasasiana*** Fern.Alonso. Tipo *Cuatrecasas 21141*. **A.** Detalle de las hojas, el pedúnculo fructífero y el fruto maduro. **B.** Detalle del pecíolo y de la venación en el envés. **C.** Detalle del pedúnculo y cáliz fructífero anchamente acampanado en una ramita terminal. [A, del isotipo US 3501796/ cb 01221645; B-C del isotipo BR 0000006961015].

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):708-731, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4032

**Árboles** (8-)10-20 m de alto y hasta 50 cm DAP; con copa alta, aparasolada; tronco y **ramas terminales** con corteza gris-blanquecina, cuarteado-agrietada, llamativamente tuberculada, de aspecto suberoso. **Yemas terminales** cónico-ovoides, compactas (**Figura 5S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4032/5356), con catáfilos anchamente triangular agudos, 4-6 × 3 mm, con indumento marrón. **Hojas** con **estípulas** prontamente caducas, estrechamente triangulares con indumento marrón-ferrugíneo; **pecíolos** (18-)20-30 mm de longitud y 2 mm de anchura en su zona media, marrones en seco, con 2 pulvínulos, el distal más conspicuo, ca. 1 cm de largo; **láminas** verdes discoloras, verde-amarillenta en vivo; de subcartáceas a cartáceas, rígidas, de estrechamente oblanceoladas a eliptico-oblongas, 17-25 × 7-9(-10) cm, redondeado-subcordadas en la base, con senos laterales hasta 3-5 mm de profundidad; acuminadas en el ápice, acumen 1-3 cm de longitud; con 4-6 **venas basales**, de las cuales 2 poco conspicuas; con tres venas secundarias a cada lado de la vena media, dispuestas en el tercio superior de la lámina; venación primaria y secundaria broquidódroma, excavada por el haz y resaltada en el envés; venación terciaria paralela y perpendicular a la secundaria, venación cuaternaria reticulada, poco resaltada en el envés; haz con denso indumento tuberculado-fasciculado, corto, al tacto áspero-arenoso; envés con indumento tuberculado-fasciculado y estrellado-tomentoso. **Flores** péndulas al final de ramas cortas, generalmente opuestas a las hojas; **pedicelo floral** flexuoso, 8-11 cm × 1,5-2 mm de grosor, densamente cubierto de indumento tuberculado-fasciculado; **bractéolas** prontamente caducas, insertas en el tercio basal del pedicelo o raramente en su zona media; **cáliz** ocráceo verdoso, luego pardo-amarillento, 1,8 × 0,7 cm, tubular infundibuliforme; con 4-5 lóbulos distales, triangulares, 3-4 × 3-4 mm; **pétalos** ocráceos espatulados, obtusos, c. 30 mm de longitud y 5-6 mm de ancho en el tercio distal (**Figura 5S**). **Androceo** con columna estaminal 20-22 × 1 mm y ramas estaminales 8-9 mm de longitud con ca. 6 anteras por rama, densamente dispuestas; anteras sinusoide alargadas 3-3,5 × 1 mm; **gineceo** con estilo 35 × 1,5 mm, densamente cubierto de indumento estrellado blanquecino; estigma no visto; pedúnculo **fructífero** marrón-amarillento, aparentemente péndulo, (8-)9-16 cm de longitud, 2 mm de grosor en su zona media y basal y hasta 3 mm de grosor en la zona distal (**Figura 6**), con bractéolas o sus cicatrices de abscisión ubicadas en el tercio basal del pedicelo o raramente en su zona media; **cáliz fructífero** cupuliforme generalmente muy abierto y acampanado, 15-18 × 20-25 mm, con el margen superior con 3-5 lóbulos muy obtusos, de aspecto truncado, finamente estriado en sentido longitudinal, recubriendo al fruto en la mitad basal. **Frutos** inmaduros verdes, en la madurez amarillos (marrones en seco), ovoides y apiculados o anchamente ovoide-globosos, cortamente apiculados, 3,5 × 3,0 cm, con apículo ca. 4-5 × 3-4 mm, mucronado en el centro; **exocarpo** con indumento rojizo, tuberculado-lepidoto densamente dispuesto, con brillo; **mesocarpo** fibroso, marrón rojizo, que rodea a los cinco pirenos elipsoides y comprimidos lateralmente, pirenos 17-18 × 6 mm. Semillas no vistas.

**Ilustraciones publicadas. Fernández-Alonso** (2001a, 191, fig.2).

**Etimología.** Especie nombrada en memoria de José Cuatrecasas y su enorme contribución al conocimiento de las Malvaceae arborescentes neotropicales (**Fernández-Alonso,** 2001a).

**Distribución y hábitat.** Sólo se conoce de los bosque pluviales y bosques de transición muy húmedo a pluvial, de la región del Bajo Calima en el departamento del Valle del Cauca, en el pacífico de Colombia.

**Fenología.** Hay registro de floración en diciembre y varios registros de fructificación en los meses de marzo a julio y en diciembre.

**Afinidades y notas taxonómicas.** *Matisia cuatrecasasiana* tiene alguna afinidad con *Matisia leptandra* Cuatrec., pero difiere en el pedicelo floral claramente más largo, las bractéolas no verticiladas ubicadas en la mitad o el tercio distal del pedicelo y el cáliz fructífero estriado longitudinalmente. También es afin a otras especies de la sección *Longipedes,* como *M. intricata* pero se diferencia de ella porque *M. cuatrecasasiana*

presenta hojas estrechamente oblanceoladas o elíptico-oblongas, con sólo 3 venas secundarias a cada lado de la vena media y con pedúnculo fructífero más largo (8-16 cm de longitud) y este con las bractéolas o sus cicatrices de abscición dispuestas en la mitad o el tercio inferior del pedúnculo. También puede diferenciarse de *M. samanae*, porque ésta presenta láminas oblongas u anchamente oblongas, pedicelo fructíferos más cortos (7-9 cm) y cáliz fructífero que recubre al fruto en 2/3 partes o más. También se diferencia de *M. longipes* Little porque *M. cuatrecasasiana* presenta el cáliz floral y fructífero sólo estriado, sin costillas longitudinales. De *M. sanblasensis*, especie que también presenta pedicelos muy largos, se separa con claridad por la posición de las bractéolas, junto al cáliz en posición distal, como es habitual en la sección *Calyculatae*.

En relación con el estudio de las dos colecciones citadas en el protólogo de *M. leptandra* (Cuatrec.) Cuatrec. (**Cuatrecasas**, 1948), con la selección y diagnosis de una de ellas -*Cuatrecasas 21141*- como tipo de *M. cuatrecasasiana* Fern.Alonso (**Fernández-Alonso,** 2001a), así como sus afinidades y diferencias, todo ello quedó ampliamente discutido en el citado trabajo. A diferencia de *M. leptandra*, los pedúnculos de *M. cuatrecasasiana* son mucho más largos (hasta 9-16 cm de longitud) y presentan las cicatrices de inserción de las trés bractéolas a diferente nivel en la mitad basal del pedicelo, como corresponde a las especies de la sección *Longipedes* Fern.Alonso, a diferencia de lo que ocurre con las especies de la sección *Calyculatae* (**Fernández-Alonso,** 2001a). La descripción de *M. leptandra* (**Cuatrecasas,** 1948) se ajusta básicamente a las características de la colección designada como tipo (*Cuatrecasas 22086*), a excepción de la referencia expresa al pedúnculo fructífero y al fruto, que se basó en la segunda colección mencionada (*Cuatrecasas 21141*). Contando ya con una descripción enmendada de *M. leptandra* (**Fernández-Alonso,** 2001b), donde se restringió la circunscripción de este binomio a las plantas típicas, encuadrables en la sección *Calyculatae*, ya quedó eliminada la ambiguedad detectada. La colección *A. Gentry 35468* de Buenaventura es muy similar, pero presenta hojas más anchas y membranosas y pedicelo floral más corto que en la serie típica y puede representar una transición hacia otra especie de esta sección aquí descrita (*M. satingana*), propia de los bosques del sur de Colombia (Cauca, Nariño).

La alta diversidad de especies simpátricas del género *Matisia* presentes en la región biogeográfica chocona (**Gentry,** 1986), hace particularmente difícil el entendimiento de este grupo cuando se dispone de material fragmentario (ausencia de flores o frutos), ya que hay varios grupos de especies que presentan gran semejanza en los caracteres vegetativos, principalmente en lo que se refiere a hojas e indumento. La progresiva recolección de nuevas muestras a lo largo de los últimos 30 años, permite ahora aclarar algunos casos y dar a conocer algunas especies nuevas. Otra recolección atípica de la misma localidad (*González 2651*) difiere también en las hojas más anchamente obovadas y glabrescentes y en los pedicelos florales más cortos. Al no contar con suficiente información morfológica (flores) y de campo, no cabe plantearse el reconocimiento de alguna entidad taxonómica independiente para estas plantas.

**Especímenes adicionales examinados.** COLOMBIA. **Valle del Cauca:** municipio de Buenaventura, corregimiento de San Isidro, Vereda La Trojita, 40 m, árbol 6 m, 7 mar 1989 (fr), *W. Devia 2713 & F. Prado* (US 3109753/cb 01221643); Bajo Calima, río Calima, cerca de San Isidro, al N de Buenaventura, concesión Cartón de Colombia, BmhT transición a BpT, 50 m, 4ºN 77ºO, árbol 15 m, 8 dic 1981 (fr), *A. Gentry 35468* (COL 258967); ibídem, municipio de Buenaventura, Bajo Calima, 3º56'N 76º59'O, 50 m, 18 dic 1987 (fl,fr), *A. Gentry 59548* (COL 464716/ cb000002413, MO, CUVC); ibídem, Buenaventura, Bahía Málaga, comunidad de La Plata, bosques maduros y secundarios, bh-T, 3º56'N 77º10'O, 70 m, árbol 10 m, 4 jul 2014 (fr), *R. Gonzalez et al. 2651* (FMB 107317); ibídem, municipio de Buenaventura, quebrada San Joaquín, concesión Pulpapel, 100 m, árbol 20 m, 50 cm dap, 8 may 1968 (fr), *J.M. Idrobo et al. 6217* (COL 299685, 300140); ibídem, río Calima, quebrada La Brea, 30-40 m, árbol pequeño, 19 may 1946 (fr), *R.E. Schultes & M. Villarroel 7382* (COL 59370, F 1317972, K 001487722).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):708-731, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4032

**4**--***Matisia sclerophylla*** Cuatrec., Revista Acad. Colomb. Ci. Exact. 6: 549. 1946 (**Figuras 7-8, 7S-8S**).

*Quararibea sclerophylla* (Cuatrec.) Cuatrec, Lloydia 11: 191. 1949

**TIPO:** COLOMBIA. **Departamento del Cauca:** río Micay, Costa del Pacífico, en Guayabal, 5-20 m, árbol 12 m, n.v.: "vaina", 25 feb 1943 (fl) *J. Cuatrecasas 14146* (**Lectotipo** COL 76376 1/2, COL 76377/cb COL 000002442 2/2 ¡**designado aquí**!; isolectotipos: COL 76375/cb COL 000002439; F 1250206/cb 0052150F, US 3501793/ cb 00901713). (**Figura 7S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4032/5356)

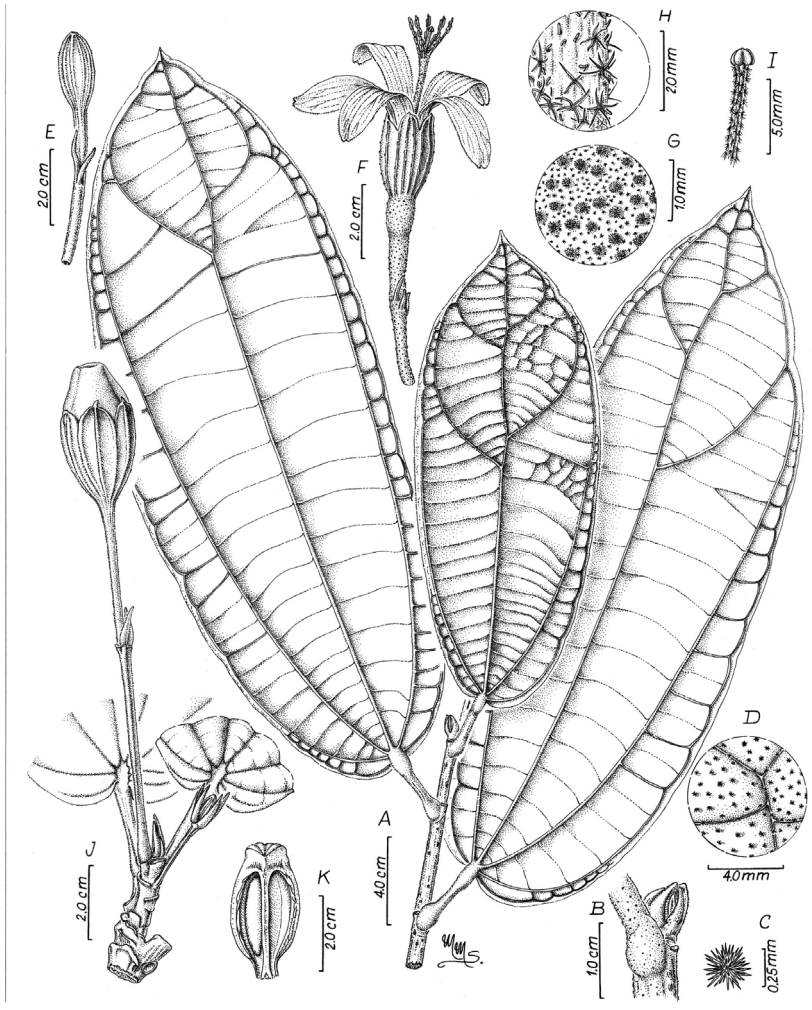



**Figura 7.** ***Matisia sclerophylla*** Cuatrec. Lámina de la planta. **A.** Parte terminal de una rama mostrando la disposición de las hojas y su venación. **B.** Yema terminal con la disposición de los catáfilos. **C.** Indumento de tipo fasciculado-equinado de los catáfilos. **D.** Indumento finamente fasciculado-estrellado de la hoja por el haz. **E.** Botón floral y su pedicelo mostrando las bractéolas en posición media en el pedicelo floral y las alas longitudinales del botón. **F.** Flor en vista lateral mostrando la parte superior del pedicelo, las bractéolas, el cáliz cilíndrico y lobulado distalmente, los pétalos en la antesis, la disposición de la columna estaminal con las ramas y la parte superior del estilo en posición central. **G.** Indumento finamente estrellado combinado con tricomas fasciculado-equinados más grandes, en el pedicelo floral. **H.** Indumento típicamente estrellado de radios largos en la columna estaminal. **I.** Parte superior del estilo con su indumento estrellado y el estigma pentalobulado en posición distal. **J.** Rama terminal con pedúnculo fructífero, con las bractéolas persistentes y el fruto en vista lateral. **K.** Corte del fruto mostrando el ápice truncado depreso y dos pirenos abiertos. Ilustración de Marcela Morales, a partir de la serie típica *Cuatrecasas 14146* (lectotipo COL 76376 1/2; COL76377 2/2). Ilustradora, Marcela Morales.

**Árboles** 8-15 m, hasta de 30 cm DAP. **Ramas** terminales grisáceas o rojizo-negruzcas (en seco), subcilíndricas, a veces nodosas o rugosas, gruesas, 4-5 mm de grosor, glabras. **Ramas** jóvenes marrones o rojizas, con los últimos entrenudos verdes, 3-4 cm de longitud, con escasas lenticelas conspicuas; indumento corto adpreso, estrellado-tomentoso. **Yema terminal** cónica, con catáfilos adpresos, triangulares, 3-4 × 2-3 mm; con indumento marrón de aspecto ferrugíneo, fino fasciculado-equinado o fasciculado-estrellado. **Estípulas** inconspicuas, estrechamente triangulares, 3(-5) mm de longitud, prontamente caducas. **Pecíolo** corto y muy engrosado, 9-18 mm de longitud, con pulvínulo proximal poco diferenciado, globoso-cónico, ca. 6-7 × 3 mm y un gran pulvínulo distal cilíndrico 10-13 × 3-4 mm, estrellado-tomentuloso. **Láminas** verde intenso, muy lustrosas por el haz, verde amarillento oliváceo por el envés (en seco marrón rojizas, oscuras); rígido coriáceas, muy gruesas, de estrechamente oblongas a oblongo-elípticas, 24-45 × 12-20 cm, base equilátera y cordada, senos o aurículas basales, rebasando 5-15 mm la zona de unión de la lámina al pecíolo. **Ápice** estrechado bruscamente, agudo o apiculado, con apículo 1-2 × 1 cm. Margen entero plano o ligeramente revoluto. **Venas** basales verde amarillento 3 y dos más submarginales, de muy corto recorrido, menos frecuentemente 4-5 venas basales, siendo las tres centrales claramente mayores. **Venas secundarias** muy reducidas, 1-2 venas ascendentes a cada lado de la vena media, en el tercio superior de la lámina, muy resaltadas y pronunciadas en el envés; **venación de tercer orden** paralela muy llamativa, conectando las venas basales y las secundarias entre sí, rematada de modo broquidódromo desde la base a lo largo de toda la margen; venación de cuarto orden reticulada, poligonal; ambas muy conspicuas y resaltadas en el envés e impresas y visibles en el haz. **Haz** lustroso, a menudo gruesamente bullado o subbullado (ampolloso), subglabro, con indumento finamente fasciculado-estrellado disperso. **Envés** de aspecto glabro, finamente papiloso y esparcidamente piloso-estrellado. **Flores** solitarias opuestas a las hojas. **Botón** floral joven rodeado en posición subterminal por tres bractéolas subverticiladas, estrechamente triangular lanceoladas, 8-10 × 2-3 mm; botón desarrollado elíptico-ovoide, con 10 alas longitudinales muy pronunciadas, uniformemente desarrolladas. **Pedicelo floral** verde pálido en fresco, cilíndrico, 3,5-6,5(-7,5) cm, con pubescencia muy fina estrellada, ferrugíneo tomentosa, combinada con tricomas fasciculado-equinados más grandes distribuidos de modo disperso, con las bractéolas de aspecto craso, dos en la zona media, y una tercera en el tercio distal, todas linear-lanceoladas, frecuentemente recurvadas. **Cáliz** amarillento, rígido, tubular-cónico o elipsoide-tubular, 20-25 × 10-12 mm, en la zona distal ligeramente constreñido de unos 10 mm en la boca del tubo y rematado en (3-)4 dientes triangular-redondeados, uniformes, cortos 3 × 3 mm, con 10 costillas obtusas, rectas y uniformes, de aspecto craso, con pubescencia externa marrón tomentosa uniforme acompañada de algunos tricomas mayores fasciculado-equinados dispersos, de aspecto flocoso, pubescencia interna serícea adpresa, amarillenta (**Figura 7S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4032/5356). **Corola** blanca, en fresco de aspecto craso, en seco membranosa, con pétalos patente-recurvados en espiral en la antesis, linear espatulados, 45-47 mm de longitud y 6-7 mm de ancho en la mitad distal y ca. 2-3 mm en el tercio basal; subobtusos y ligeramente escotados en el extremo apical, lustrosos y glabrescentes en la cara interna y tomentoso-seríceos en la cara externa. **Androceo** con columna estaminal blanca (rojiza en seco), larga, arqueado-ascendente (**Figura 7S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4032/5356), duplicando en longitud al cáliz, 45-50 mm, con indumento blanquecino típicamente estrellado de pocos radios. **Ramas estaminales** blancas, ubicadas de modo subradial, 10-12 mm × 1-1,5 mm, con 5-7 lóculos anteríferos en cada rama, agrupados de a dos, anteras amarillentas, por el color del polen, que se tornan marrones en las flores viejas, anteras estrechamente linear-elípticas, 1,5-3 de longitud × 1 mm de anchura. **Estilo** ca. 40-45 mm longitud, ligeramente más corto que las ramas estaminales; con fino indumento estrellado en su cara externa en el tercio distal. **Estigma** terminal, marrón, subcapitado, pentalobulado, ligeramente lustroso. Fruto joven verde. **Frutos** péndulos con pedúnculo **fructífero** (7-)8,5-11 cm, ocasionalmente con alas longitudinales poco conspicuas, con bractéolas persistentes en la zona media, linear-

lanceoladas, 9-11 × 2 mm. **Cáliz fructífero** cilíndrico, cónico, urceolado o en forma de barril, constreñido apicalmente, 10-15 × 20-25 mm, cuando maduro irregularmente lobado rasgado en la parte distal, recubriendo al fruto ½ de su longitud, con 10 alas longitudinales conspicuas, desde el ápice del pedicelo hasta el margen superior del cáliz. **Fruto** elipsoide o estrechamente elipsoide-fusiforme, adelgazado y truncado gradualmente en el ápice, (20-)23-25 × 13-15 mm, con parte estrecha apical (rostro) ca. 5 × 6 mm; ápice depreso con un mucrón central, epicarpio color crema marrón, finamente lepidoto (**Figura 8S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4032/5356). Con **mesocarpio** fibroso, rojizo en seco; con cinco pirenos fusiformes, comprimidos, ca. 18 × 4 mm.

**Etimología:** El nombre hace referencia a la consistencia de las hojas, inusualmente coriáceas y rígidas en la madurez.

**Distribución y hábitat.** Especie conocida de los bosques pluviales primarios del corredor pacífico de los departamentos del Cauca y Valle del Cauca, por debajo de los 500 m de altitud. Se encuentra también en ambientes sucesionales de transición cerca de las franjas cultivadas. Según algunos registros (*Faber-Langendoen et al. 1439,* CUVC), estos bosque primarios se asientan sobre depósitos aluviales de arcilla amarillo-gris, en suelos pobres con alta saturación de aluminio (*M. Monsalve B. 1142,* CUVC).

**Fenología:** Hay registros de floración entre febrero y septiembre y de plantas con frutos entre abril y noviembre.

**Nombre comunes y usos:** n.v.: "vaina" en el departamento del Cauca (*J. Cuatrecasas 14146*, Tipo) y n.v. "zapatillo" en el departamento del Valle (*D.I. Goitia 4011*).

**Afinidades y notas taxonómicas.** Esta especie puede reconocerse bien porque presenta yemas terminales, pedicelo floral y cáliz con indumento fino estrellado tomentoso, combinado con indumento fasciculado-equinado de mayor tamaño; hojas rígidamente coriáceas, oblongo-elípticas, lustrosas en la cara superior y con sólo 3(-4) venas basales y 1(-2) venas secundarias a cada lado de la vena media, dispuestas en el tercio distal de la lámina. La especie afín *M. genesiana* Fern.Alonso puede reconocerse sin dificultad porque presenta pedicelos florales con bractéolas de menor tamaño (3-7 × 3 mm) ubicadas entre la base y la zona media del pedicelo, hojas obovadas, ásperas, con 3-5 venas basales y 2-4 venas secundarias a cada lado de la vena media, dispuestas en la mitad distal de la lámina.

La colección original *Cuatrecasas 14146* fué citada en el protólogo como "Colección de la Comisión Botánica del Valle", que en principio haría referencia al herbario original que J. Cuatrecasas tenía en Palmira, Valle, sin ninguna otra indicación (**Cuatrecasas**, 1946). Como no se han localizado duplicados de esta colección original, en la revisión de colecciones efectuada en el herbario VALLE (**Parra & Pérez,** 2017, **Thiers,** 2025) se ha procedido a seleccionar aquí como lectótipo dos de los tres pliegos actualmente montados en COL: COL 76376 –con una hoja y flores- (1/2) y COL 76377 una rama con hojas (2/2). El tercer espécimen montado en COL (COL 76375 –rama con hojas-) se considera aquí como un isolectotipo, al igual que los duplicados existentes en el herbario F (F 1250206, isolectotipo) y en US (US 3501793, isolectotipo).

Por otra parte, es necesario comentar que se han asignado a esta especie las colecciones del departamento del Valle del Cauca (Bajo Calima) que presentan ligeras diferencias en las venas primarias y en la longitud de los pedicelos florales y que, en nuestra opinión, representan una transición hacia *M. anchicayana* Fern.Alonso, propia de elevaciones medias en el departamento del Valle del Cauca. Otras colecciones atípicas infértiles, de San Carlos, Antioquia a 1100 m (*Velasquez 243*, MEDEL) son vegetativamente similares, pero con pecíolos más largos que los de *M. sclerophylla* y posiblemente representarían a alguna variante de *M. samanae* (en este trabajo), donde han sido incluidas.

**Especímenes adicionales examinados.** COLOMBIA. **Cauca:** Costa Pacífica, municipio de Timbiquí, resguardo indígena Calle Santa Rosa, en bosque primario y sucesional a lo largo de las quebradas Bibango, El Rosario y La Muerfera, hasta las zonas cultivadas, 02º57'N 77º 35'O, 16 m, árbol 15 m, 9 sep 2018 (fl), *J.A. Sánchez 3128 et al.* (CUVC, 2 pl. y fotos, **Figura 8**). **Valle del Cauca:** Bajo Calima, *D. Faber-Langendoen 437* (CUVC); ibídem, *529* (CUVC), ibídem, *609* (CUVC); ibídem, concesión Bajo Calima,

20 km al Noroeste de Buenaventura, km 22,5, remanentes de bosque primario, sectores de bosque pluvial talado sobre depósitos aluviales, 3º51'N 77º08'O, 50 m, arbolito 5m, 10 cm dap, infértil, 22 jun 1988, *D. Faber-Langendoen et al. 1439* (CUVC); Bajo Calima, ca. 10 km al N de Buenaventura, concesion Cartón de Colombia, transición bmh-T a BpT, 3º56'N 77º8'O, 50 m, arbolito estéril, 7 dic 1981, *A. Gentry 35401* (COL 259832, 2 pl.); ibídem, concesión Cartón de Colombia, 50 m, transecto 3, arbolito 9 cm dbh, estéril, 7 dic 1981, *A. Gentry 35454* (COL 274289, 2 pl.); ibídem, transecto 4, 3º56'N 77º8'O, arbolito 8 cm dap, estéril, 10 dic 1981, *A. Gentry 35521* (COL 258761); Bajo Calima, camino a Junachaco-Palmeras, 50 m, bosque pluvial, árbol 15 m, 19 jul 1984 (fl, fr), *A. Gentry et al 48320* (COL

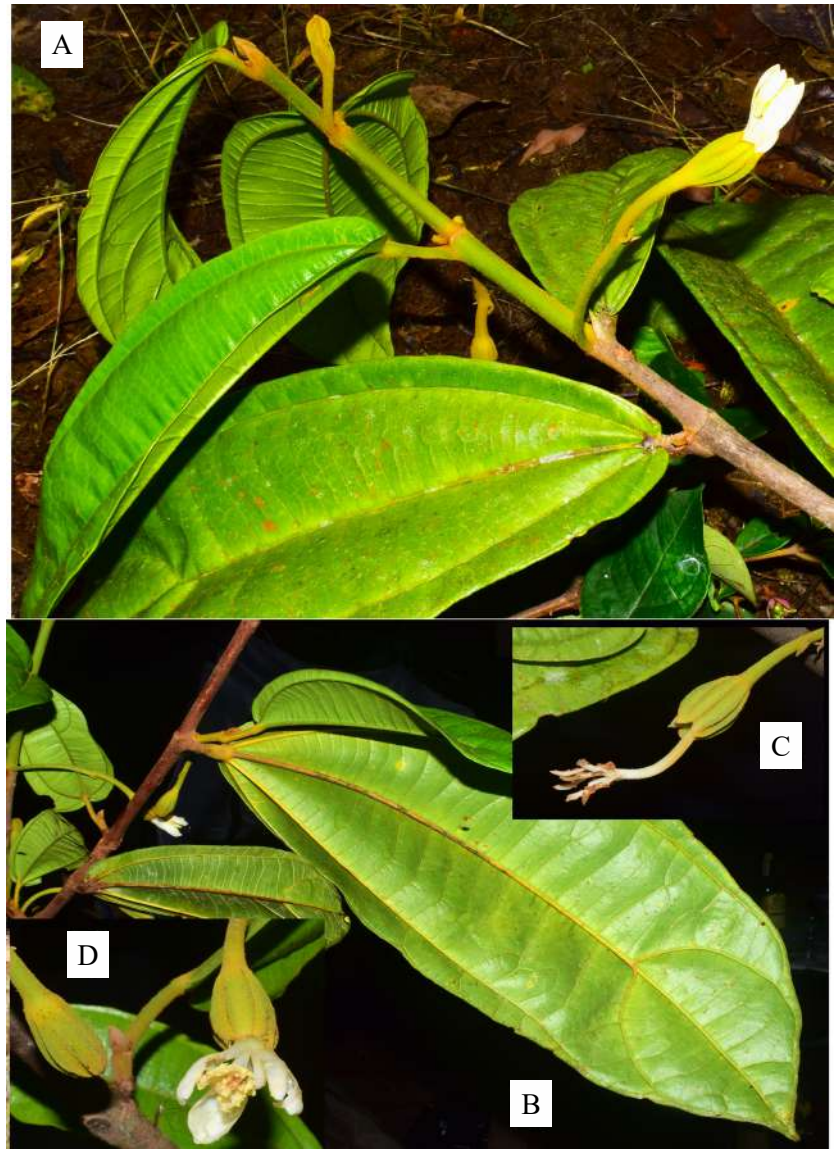



**Figura 8.** ***Matisia sclerophylla*** Cuatrec. Imágenes de campo de la colección *J.A. Sánchez et al. 3128* (CAUP) tomadas en Timbiquí, Cauca. **A.** Rama con hoja adulta y flores opuestas a las hojas. **B.** Ápice de una rama mostrando la disposición de las flores y el indumento de la yema terminal. **C.** Detalle de una flor al inicio de la antesis mostrando la corola erecto-patente, los pétalos cóncavos en su cara interna y las ramas estaminales con las anteras recubiertas de polen amarillo. **D.** Detalle de una flor al final de la antesis, sin la corola, con el androceo sigmoide y las anteras marrones ya vacías. [Fotografías facilitadas por J.A. Sánchez Taborda].

407900, 2 pl.; JAUM 7827); ibídem, Bajo Calima, estéril, 17 abr 1987, *A. Gentry 57033* (CUVC); ibídem, Bajo Calima, bh-T, 50 m, estéril, n.v.: "zapatillo", ene 1964, *D.I. Goitia 1* (UDBC 4011); municipio de Buenaventura, Bajo Calima, concesión Pulpapel, Carretera al Dindo, 3º55'N 77º00'O, 100 m, bpT, suelos pobres con alta saturación de aluminio, árbol 5 m, 25 ago 1986 (fr), *M. Monsalve B. 1142* (CUVC 37321); ibídem, concesión Pulpapel, carretera La Gasolina, 3º 55'N 77º00'O, 100 m, árbol 8 m, 12 nov 1986 (fr), *M. Monsalve B. 1228* (CUVC 55568); ibídem, Buenaventura, comunidad La Estrella, finca Don Edgardo Vinazco, km 22, en la vía a Bahía Málaga, 24 m, árbol 7 m, 25 may 2015 (fr), *B. Villanueva et al. 2429* (JAUM 72359, JAUM 72378; TOLI 12986); ibídem, Centro Forestal Tropical Pedro Antonio Pineda, Concejo Bajo Calima, comunidad Las Brisas, 63 m, árbol 9 m, 4 nov 2015 (fr), *B. Villanueva et al. 2494* (JAUM 72359, JAUM 72378; TOLI 14081); ibídem, Buenaventura, bosque Doña Rosi, km. 13, en la vía a Bahía Málaga, 34 m, 3º58'N 76º00'O, árbol 12 m, ramificación verticilada, 19 abr 2017 (fr), *B. Villanueva 3844* (TOLI 19730); ibídem, Concejo comunitario Bajo Calima, comunidad Las Brisas, bosque en Quebrada Larga, 55 m, árbol 14 m con frutos péndulos, 19 ago 2022 (fr), *B. Villanueva et al. 6322* (JBB 11426/ cb JBB 36804, JBB 36805).

**5**--***Matisia victoriana*** Fern.Alonso, Revista Acad. Colomb. Ci. Exact. 25(95): 195 (196; figs. 4-2, 5). 2001 [Jun 2001] **(Figuras 9S, 9-10)**

**TIPO**: COLOMBIA. **Departamento del Chocó:** Costa pacífica del Chocó, Cabo Corrientes, municipio de Nuquí, Estación Biológica El Amargal 50 m, feb 1992 (fl), *G. Galeano 3217* (holotipo COL 444315 (1/3), COL 444316 (2/3), COL 444320 (3/3), isotipos COL *444317,* HUA 0000994, MA 789150, NY 00804217).

**Árboles** del dosel o emergentes 25-35 m, con tronco acanalado en la base y fuste cilíndrico hasta 25 m y 60 cm DAP, copa extendida y comprimida, corteza muerta amarillenta, corteza viva amarilla, vidrioso-quebradiza. **Ramas** patente-péndulas, con corteza marrón-grisácea, muy nodosas, cuarteadas; ramitas jóvenes, pecíolos y láminas jóvenes con indumento denso marrón ferrugíneo, de pelos fasciculado-tuberculados. **Yemas terminales** cónico triangulares, compactas, marrón-ferrugíneas con indumento tuberculado-grumoso denso (**Figura 9 y 9S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4032/5356), con catáfilos anchamente triangulares, acuminados 4-5 × 3 mm; **estípulas** estrechamente triangulares, ca. 3-4 mm de longitud, prontamente caducas e igualmente marrón-ferrugíneas. **Hojas** agrupadas al final de las ramas, discóloras, verde oscuro por el haz y amarillento por el envés (en vivo), en seco marrones; **pecíolo** 2-3(-4) cm × 2-4 mm, indumento marrón; pulvínulos 2, el proximal de ca. 0,5 cm y el distal 0,8-1 cm × 0,3-0,5 cm; **láminas** subcoriáceas a cartáceas, obovadas a romboide-trapezoides, de semilimbos muy desiguales, 26-36 × 12-19 cm, cordadas en la base con senos amplios 5-10 mm de alto; agudas en el ápice, con apículo ca. 0,5 cm, ásperas en ambas superficies; haz con indumento ferrugíneo, disperso, tuberculado, en la base de las venas y envés con indumento tuberculado-fasciculado ferrugíneo en las venas y más fino y algo menos denso en la lámina; con 7-9 venas basales de los cuales las 2-3 más externas submarginales, poco conspicuas y de corto recorrido; con 3-4 pares de **venas laterales secundarias**, partiendo de la vena media, ubicados en el tercio distal de la lámina; venación de tercer orden paralelo-arqueada y perpendicular a las venas primarias, venación de cuarto orden reticulada, poco resaltada. **Flores** opuestas a las hojas, en ramitas cortas terminales. **Pedicelo floral** 4,5-5 cm de longitud, con 3 bractéolas en la zona media, prontamente caducas, e indumento ferrugíneo; **cáliz** acampanado-infundibuliforme, 1,3-1,6 × 1,2 cm después de la antesis, surcado-aristado longitudinalmente, con costillas poco resaltadas, inciso-lobado en el margen distal, estriado longitudinalmente, amarillo-azufrado en la cara externa, con indumento tuberculado-fasciculado; **corola** color canela; pétalos espatulados, 4,5-5 × 0,6-0,8 cm, en el exterior estrellado-tomentosos y en el interior seríceos, con pelos estrellados de pocos radios, muy dispersos y adpresos; **androceo** con columna estaminal 5-costada, 38-45 mm de longitud; con indumento estrellado, blanco; ramas estaminales ca. 1 cm de longitud, con 5-6 anteras por rama, dispuestas generalmente de modo alterno, no

en pares; tecas estrechamente reniformes, 2-2,5 mm de longitud. **Pedúnculo fructífero** 5-5,5 cm de largo, **cáliz fructífero** cupular-cónico, 2 cm de largo y 2,8 cm ancho, con 3-4 leves aristas longitudinales (en seco) e irregularmente lobado-rasgado en la porción distal (**Figuras 9-10**), ferrugíneo tomentoso, que recubre al fruto 1/3 a ½ de su longitud. **Fruto** ovado-fusiforme, comprimido en el ápice, 25-30 × 15-18 mm; exocarpo con indumento estrellado-ferrugíneo, marrón claro, brillante; pirenos fusiforme-elipsoides de ca. 18-20 × 5 mm (**Figura 10**).

**Ilustraciones publicadas. Fernández-Alonso** (2001a: 196, figs. 4-2, 5).

**Etimología**: Esta especie del pacífico de Colombia se nombró en memoria de Victor Manuel Patiño Rodríguez (1912-2001), eminente etnobotánico colombiano, que dedicó buena parte de su vida al conocimiento de las plantas útiles del neotrópico, con especial referencia a las de la planicie pacífica de Colombia, a sus usos históricos y recientes y a su conservación (**Anónimo**, 2006; **Patiño,** 2012).

**Distribución y hábitat.** Conocida sólo de los bosques muy húmedos y pluviales de la región central del Chocó, donde comparte el dosel del bosque con especies como *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., *Exarata chocoensis* Gentry y *Brossimum utile* (Kunth) Oken, entre otras.




**Figura 9.** ***Matisia victoriana*** Fern.Alonso. **A.** Detalle de la ubicación de las flores en las ramas. **B.** y **C.** Flores después de la antesis mostrando los pedicelos florales desprovistos de las bractéolas, los pétalos y el androceo. **D.** Ápice de rama mostrnado un pedúnculo y cáliz fructífero y la yema terminal de la rama. [A, de *Jacome 183* (COL 459632); B, de *Gentry 41002* (COL 263486); C, de *Serna 2480* (COL 533104); y D, de *Acero 163* (UDBC 20920)].

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):708-731, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4032

**Fenología**: Hay registros de floración de los meses de febrero-abril y septiembre. Plantas con frutos en abril y agosto.

**Nombres comunes y usos**: Se han recogido los nombres comunes de "Almirajó macho" y "Zapotillo" en la región del Cabo Corrientes, Chocó (*Cediel 196; Galeano 4947*).

**Afinidades y notas taxonómicas.** Especie claramente adscrita a la sección *Longipedes* Fern.Alonso, afin a *Matisia sclerophylla* y a *M. intricata*, de las que difiere en los siguientes caracteres: pecíolos 2-4(-5) cm de largo, láminas subcoriáceas, obovado-romboides, ásperas por el haz, con indumento de pelos tuberculado-fasciculado en hojas, pedicelo y cáliz floral (**Figura 9S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4032/5356), láminas con 5-6(-7) venas basales y dos adicionales submarginales poco conspicuas; cáliz fructífero cupuliforme, sin alas longitudinales. Se diferencia también de *M.samanae* Fern.Alonso porque esta presenta pedicelos florales más largos, de 7-9 cm, bractéolas ubicadas en la mitad inferior del pedicelo floral y fruto recubierto al menos en 2/3 partes por el cáliz fructífero.

**Especímenes adicionales examinados.** COLOMBIA. **Chocó:** Quibdó, Bahia Solano, 5 m alt, bmh-T., abr 1977 (fr), *E. Acero et al. 163* (UDBC 195 / 20920); ibídem, Costa pacífica del Chocó, Cabo Corrientes, Estación Biológica El Amargal, feb 1993 (fl), *J. Cediel 196* (COL 459679); ibídem, municipio de Bahía Solano, Parque Nacional de Utría,




**Figura 10.** ***Matisia victoriana*** Fern.Alonso. **A.** Rama con frutos maduros. **B.** Detalle de la base de la lámina y de la yema terminal. **C.** Pedúnculo fructífero, cáliz fructífero cupular, fruto y sección sagital del fruto mostrando el mesocarpo fibroso y la cara interna de un pireno [A-C, a partir de *Cabezas 1395* de Chocó, Nuquí (TOLI 23909)].

Terrón Colorado, en la trocha a Boroboro, cerca de la quebrada Munzú, 300 m, árbol estéril, 15 sep 1990, *J. Espina 4028 et al* (CHOCO, MO); ibídem, árbol estéril, *J. Espina 4073 et al* (CHOCO, MO); ibídem, árbol estéril, *J. Espina 4110 et al.* (CHOCO, FMB, MO); ibídem, árbol estéril, *J. Espina 4255 et al.* (FMB, CHOCO, MO); ibídem, municipio de Tadó en la vía a Yuto, km 5, quebrada La Francisca, finca de la Fundación Veteguma, 90 m, arbolito 2 m, estéril, 28 oct 2005, *J.L. Fernandez-Alonso 23733 & estud.* U. Chocó (CHOCO); ibídem*, c*orregimiento de Nuquí, Cabo Corrientes, Estacion Amargal, árbol, 5 abr 1994 (fl), *G. Galeano 3715* (COL); ibídem*,* Corregimiento de Coquí, quebrada Trapiche, al SE de Coquí, 100-160 m, 5º32'N 77º15'W, infertil, n.v.: "zapotillo", mar 1994, *G. Galeano 4947* (CHOCO 0000019; COL 407880, COL 408371, COL 408376); ibídem, municipio de Bahía Solano, P.N.N. Ensenada de Utría, entre Quebrada Chunga y Trocha al Valle, 250 m, arbolito estéril, 18 ago 1990, *F. García 1336 et al. (*CHOCO, MO); ibídem, árbol estéril, *F. García 1552 et al.* (FMB, CHOCO, MO); carretera de Tubadó a Quibdó, Tutunendó, 14 Km al NE de Quibdó, 90 m, bp-T, Transecto, árbol 20 m, estéril, 17 ene 1979, *A. Gentry 24313 & E. Rentería* (COL 197452, HUA 11302); vía de río Mecana a Alto de Mecana, 100-500 m, suelos lateríticos cerca de la cima, 6°15'N 7°25'O, árbol 25 m, 6 mar 1983 (fl), *A. Gentry 41002 & A. Juncosa* (COL 263486, MO); municipio de Nuquí, corregimiento de Arusí, Estación Biológica El Amargal, bmh-T, 5º34'N 77º31'O, n.v.: "almirajó macho", sep 1998 (fl), *J. Jácome 183*B (COL 459632/ cb 000009632, COL 459678, HUA, MEDEL, MO, US); Bahía Solano, Jardín Botánico del Pacífico, árbol 21 m infértil, 11 ene 2019, *W. López 2657* (TOLI 28662); ibídem, 200 m, árbol infertil, 28 nov 2019, *W. López 2734* (TOLI 23605, 2 pl.); ibídem, Cantón de San Pablo, corregimiento de Puerto Pervel, 5 m, 16 jun 2006, arbolito 5 m estéril, *A. Mosquera et. al 18* (COL 2pl., CHOCO, MA); ibídem, municipio de Lloró, bosque de la granja de la Universidad Tecnológica del Chocó, árbol 2,5 m, n.v. "zapotillo", 18 ago 2001, *L. Palacios 17* (CHOCO, COL); ibídem, municipio de Quibdó, corregimiento de Pacurita, árbol 9 m estéril, 6 nov 2001, *L. Palacios 21* (CHOCO, COL); ibídem, árbol 4 m, *L. Palacios 22* (CHOCO, COL 475734); ibídem, municipio de Nuquí, corregimiento de Arusí, Estacion Biológica El Amargal, bmh-T, 50m, en el interior del bosque, árbol 12 m, 8 abr 2004 (fl), *M. Serna 2480 et al* (COL 533104, JAUM).

**Las especies del género *Matisia* sección *Longipedes***

Como continuación a la publicación de una primera clave para las 27 especies reconocidas de *Matisia* sección *Calyculatae* (**Fernández-Alonso** 2001a; **Fernández-Alonso**, 2026b), se presenta en esta entrega la clave para las catorce especies hasta ahora reconocidas de *Matisia* sección *Longipedes* (**Fernández-Alonso,** 2001a)*,* incluyendo las descritas en este trabajo (*M. samanae* y *M. satingana*). Hay que puntualizar asimismo, que dos de las especies originalmente incluidas en la sección *Longipedes* cuando fué propuesta que son *M. palenquiana* (A. Robyns & S. Nilsson) W.Alverson del occidente de Ecuador y *M. tinmastina* Estrada & Cascante de Mesoamérica, fueron formalmente asociadas con posterioriad a la sección tipo, *Matisia* sección *Matisia* (**Fernandez-Alonso & Campos-Pineda**, 2023; 2024). La presencia en ambas especies de hojas con 5 o más venas basales, flores básicamente caulifloras o ramifloras y los frutos globosos con cáliz caduco en la fructificación, asocian claramente a estas especies con otras especies afines de *Matisia* sección *Matisia* como es el caso de las amazónicas *M. bicolor* Ducke y de *M. stenopetala* Standl. & Cuatrec. (**Fernández-Alonso,** 2001a; **Fernández-Alonso & Campos-Pineda**, 2023).

La relación de las catorce especies actualmente asignadas a *Matisia* sección *Longipedes* incluye a: *Matisia anchicayana* Fern.Alonso, *M. bullata* Fern.Alonso, *M. changuinolana* Fern.Alonso & Campos-Pineda, *M. cuatrecasasiana* Fern.Alonso, *M. genesiana* Fern.Alonso, *M. hirta* Cuatrec., *M. intricata* (Robyns & S.Nilsson) Alverson, *M. longipes* Little, *M. mutatana* Fern.Alonso, *M. petaquillae* Fern.Alonso & Campos-Pineda, *M. samanae* Fern.Alonso*, M. satingana* Fern.Alonso*, M. sclerophylla* Cuatrec. y *Matisia victoriana* Fern.Alonso.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):708-731, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4032

**Clave para la identificación de las especies de *Matisia* sección *Longipedes***

1--Cáliz floral y cáliz fructífero sin alas o sólo con venas longitudinales ligeramente resaltadas.....**GRUPO I**

1'--Cáliz floral y cáliz fructífero con 7-10 costillas o alas longitudinales, claramente delimitadas.....**GRUPO II**

**GRUPO I**

2—Yema terminal de las ramitas terminales con catáfilos estipulares 10-15 mm de longitud; estípulas persistentes, 15-20 mm de longitud; pedicelo floral 20-40 mm de longitud, con bractéolas persistentes insertas en su zona media, en más de un punto (no verticiladas)..... ***M. hirta***

2'—Yema terminal de las ramitas terminales con catáfilos estipulares menores de 10 mm de longitud; estípulas prontamente caducas, menores de 10 mm de longitud; pedicelo floral 40-110 mm de longitud, con bractéolas prontamente caducas, insertas a diferente nivel en el pedicelo.....**3**

3—Hojas estrechamente oblanceoladas o elíptico-oblongas, con 3 venas secundarias a cada lado de la vena media, dispuestas sólo en el tercio distal de la lámina; pedúnculo fructífero (8-)9-16 cm de longitud, con bractéolas (o sus cicatrices de abscisión) dispuestas en la mitad o en el tercio inferior del pedúnculo..... ***M. cuatrecasasiana***

3'—Hojas oblongas, anchamente oblanceoladas u obovadas, con (3-)4-5 venas secundarias a cada lado de la vena media, dispuestas en la mitad distal de la lámina; pedúnculo fructífero 4-8(-9) cm de longitud, con bractéolas (o sus cicatrices de abscisión) dispuestas a diferente nivel en el pedúnculo.....**4**

4—Pedicelo fructífero 7-9 cm de longitud, con bractéolas (o cicatrices de abscisión) dispuestas en la mitad inferior del pedicelo; cáliz fructífero recubriendo 2/3 o más del fruto..... ***M. samanae***

4'—Pedicelo fructífero 4-6 cm de longitud, con bractéolas (o cicatrices de abscisión) dispuestas entre la mitad superior (distal) del pedicelo; cáliz fructífero recubriendo sólo 1/3 o hasta la mitad del fruto.....5

5—Árboles grandes de 25-35 m; hojas con láminas obovadas o romboides, con 3-4 venas secundarias a cada lado de la vena media; cáliz fructífero recubriendo 1/3 a ½ del fruto; corola crema-anaranjado, columna estaminal 38-45 mm de longitud; fruto ovoide fusiforme de 25-30 × 15-18 mm..... ***M. victoriana***

5'—Árboles de 15-20(-25) m; hojas con láminas anchamente oblanceoladas, con 4-5 venas secundarias a cada lado de la vena media; cáliz fructífero recubriendo 1/3 del fruto; corola blanca; columna estaminal 25-29 mm de longitud; fruto anchamente ovoide de 32-35 × 20-28 mm..... ***M. intricata***

**GRUPO II**

6—Hojas con láminas generalmente membranáceas o raramente cartáceas; pedúnculo fructífero 30-55(-65) mm de longitud; cáliz fructífero con alas longitudinales sinuosas.....**7**

6—Hojas con láminas generalmente coriáceas o raramente membranoso-cartáceas; pedúnculo fructífero mayor de 55 mm de longitud; cáliz fructífero con alas longitudinales rectas.....**9**

7—Hojas con pecíolo 25-40 mm de longitud, con láminas oblongas u oblanceoladas, con 4-5 venas basales principales; envés con indumento conspicuo equinado-flocoso ..... ..... ***M. mutatana***

7—Hojas con pecíolo 14-22 mm de longitud, con láminas anchamente obovadas, con 3(-4) venas basales principales; envés glabrescente o con indumento fino estrellado-fasciculado ..... **8**

8—Árboles generalmente pequeños 4-8 m; yemas terminales ovoide-elípticas, compactas, 4-5 × 2-2,5 mm, con indumento denso estrellado-fasciculado; láminas con indumento estrellado-fasciculado disperso en el envés; pedúnculo fructífero 35-55 mm de

longitud, generalmente flexuoso; cáliz fructífero recubriendo al menos la mitad (de 2/3 a ½) del fruto; fruto ovoide a anchamente elíptico 20-25 × 15-20 mm..... ***M. satingana***

8—Árboles 8-18 m; yemas terminales estrechamente cónicas, 4-9 × 3-5 mm, con indumento fasciculado-tuberculado muy corto; láminas glabrescentes por el envés; pedúnculo fructífeero 30-35 mm de longitud, péndulo; cáliz fructífero recubriendo la mitad o menos (de 1/3 a ½) del fruto; fruto anchamente ovoide 30 × 20 mm..... ***M. changuinolana***

9—Arbolitos 4-15 m, con hojas rígidas, notoriamente coriáceas.....**10**

9'—Árboles 12-30 m, raramente arbolitos 5-10 m; con hojas no rígidas, membranoso-cartáceas.....**12**

10—Hojas con pecíolos 2-6 cm de longitud; láminas fuertemente bulladas o ampollosas en toda la lámina, con 7-11 venas basales.....***M. bullata***

10'—Hojas con pecíolos 9-20(-25) mm de longitud; láminas no bulladas o sólo gruesamente bulladas o ampollosas en la mitad distal, con 3-5 venas basales.....**11**

11—Pedicelo floral con bractéolas linear-lanceoladas, 8-10 × 2-3 mm, ubicadas entre la mitad y la zona distal del pedicelo; hojas anchamente oblongas, lustrosas, con 3 venas basales y 1-2 venas secundarias a cada lado de la vena media, dispuestas en el tercio distal de la lámina..... ***M. sclerophylla***

11'— Pedicelo floral con bracteolas estrechamente triangulares, 3-7 × 3 mm, ubicadas entre la la base y la zona media del pedicelo; hojas obovadas, ásperas, con 3-5 venas basales y 2-4 venas secundarias a cada lado de la vena media, dispuestas en la mitad distal de la lámina ..... ***M. genesiana***

12—Lámina de la hoja con 3-5 venas primarias basales; cáliz fructífero recubriendo 1/3 del fruto; fruto elipsoide o globoso..... ***M. longipes***

12'—Lámina de la hoja con 5 o más venas basales; cáliz fructífero recubriendo al menos 1/2 del fruto; fruto estrechamente elipsoide o estrechamente ovoide..... **13**

13—Árboles 5-15 m; láminas membranoso-cartáceas, obovadas a trapezoides; con 5-9 venas basales; envés con indumento estrellado lepidoto, áspero al tacto; pedúnculo fructífero 70-140 mm; cáliz fructífero recubriendo 2/3 o más del fruto..... ***M. anchicayana***

13'—Árboles 12-30 m; láminas subcoriáceas o cartáceas, oblanceoladas o a veces obovadas; con 5 venas basales; envés con indumento disperso equinado-fasciculado y fasciculado-flocoso, no áspero y poco notorio; pedúnculo fructífero 59-70 mm; cáliz fructífero recubriendo 1/2 del fruto..... ***M. petaquillae***

## Información suplementaria

Ver la información suplementaria en https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4032/5356

## Agradecimientos

Al Real Jardín Botánico del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (CSIC), que facilitó el desarrollo de las investigaciones llevadas a cabo en el género *Matisia* Bonpl. (Malvaceae), con cargo al proyecto PIE del CSIC: 200930I071: "Taxonomía del género neotropical *Matisia* Bonpl. (Malvaceae-Bombacoideae), I- Las Secciones *Calyculatae* y *Longipedes* y su diversificación en el norte de Suramérica". A los curadores de herbarios AFP, BR, CHOCO, COL,CUVC, F, FMB, HUA, K, JAUM, JBB, MA, MEDEL, MO, NY, P, TOLI, UDBC, US y VALLE, que facilitaron la consulta de las muestras o el envío de préstamos para estudio; igualmente a los colegas que remitieron especímenes o imágenes para identificación a lo largo de las ultimas dos décadas. A Carlos A. Parra (COL) su colaboración con el manejo de los materiales en estudio en las instalaciones del Instituto de Ciencias Naturales (UN, Bogotá) y los numerosos aportes y

observaciones a este manuscrito. A Julio Betancur y Laura Clavijo (COL) las facilidades dadas durante las visitas al Herbario Nacional Colombiano en el Instituto de Ciencias Naturales. A Leopoldo Medina y al personal del herbario MA su habitual colaboración con el procesamiento de las muestras recibidas. Agradezco también a Alvaro Cogollo (JAUM), Felipe Cardona, Heriberto David (HUA), J. Pérez-Zabala (MEDEL), J. Sánchez Taborda (CAUP), Boris Villanueva (JBB) y Nicolás F. Parra (TOLI), por el amable envío de algunas fotografías de campo e imágenes de herbario, algunas de las cuales fueron incluidas en este estudio. A Juan Carlos Pinzón y a Marcela Morales que ayudaron con la elaboración de las tres láminas incluidas en este trabajo. Al editor y revisores de este manuscrito, por sus valiosas observaciones.

## Conflicto de intereses

El autor declara que no tiene conflicto de intereses.

## Referencias

**Anónimo.** (2006). Victor Manuel Patiño Rodríguez. Una vida entera dedicada a investigar sobre los recursos naturales y sociales del Neotrópico. *Cespedesia, 28*(83), 1-32.

**Cascante, A.** (2020). Bombacaceae. In. Hammel, B.E., Grayum M.H., Herrera C, Zamora, N. (eds) *Manual de plantas de Costa Rica*, Volumen IV, parte 2, dicotiledóneas (Balanophoraceae–Clethraceae). *Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden*. *138,* 121-144.

**Cuatrecasas, J.** (1946). Notas a la Flora de Colombia VIII. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 6*(24), 533-551.

**Cuatrecasas, J.** (1948). Studies in South American Plants, I. *Lloydia, 11*(3), 185-225.

**Del Valle, J. I.** (1996). Los bosques de guandal del delta del río Paria (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 20*(78), 475-489.

**Ellis, B., Daly, D.C., Hickey, L.J., Johnson, K.R., Mitchell, J.D., Wilf, P., Wing, S.L.** (2009). *Manual of leaf architecture*. Cornell University Press and the New York Botanical Garden Press. https://doi.org/10.1079/9781845935849.0000

**Estrada, A., Cascante, A.** (1998) *Matisia tinamastiana* (Bombacaceae): una nueva especie arborescente del pacifico central de Costa Rica. *Brenesia, 49-50,* 79-83.

**Fernández-Alonso, J.L.** (1996). Contribuciones al conocimiento del género *Phragmotheca* Cuatrec. (Bombacaceae-Quararibeae). *Caldasia, 18*(3), 253-284.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2001a). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae I. Novedades taxonómicas y corológicas en *Matisia, Quararibea* y *Spirotheca. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 25*(95), 183-206.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2001b). Bombacaceae neotropicae novae vel minus cognitae II – Novedades taxonómicas y corologicas en *Matisia* y *Quararibea* del Norte de Suramérica. *Caldasia, 23*(2), 251-283.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2003). Bombacaceae Neotropicae novae vel minus cognitae VI. Novedades en los géneros *Cavanillesia*, *Eriotheca*, *Matisia* y *Pachira*. Rev. Acad. Colomb. Cienc. *27*(102), 25-37.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2016). *Matisia* (Malvaceae). p. 1547-1551, En Bernal R., Gradstein S.R., Celis M. (eds.). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*, vol 2. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional Colombia.

**Fernández-Alonso, J.L.** (2021). Malvaceae Neotropicae novae vel minus cognitae X. Nuevas especies de *Quararibea* de Colombia y Ecuador. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, *78*(2), 1-16. https://doi.org/10.3989/ajbm.2584

**Fernández-Alonso, J.L.** (2025). Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XIII. Una nueva especie de *Phragmotheca* (Malvaceae) de Panamá, y notas sobre el género. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 49*(190), 44-58. doi: https://doi.org/10.18257/ raccefyn.3128

**Fernández-Alonso, J.L.** (2026a). Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XIV. Ocho especies nuevas de *Matisia* de Sudamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,* 49 (en prensa).

**Fernández-Alonso, J.L.** (2026b). Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XV. Ocho

especies nuevas de *Matisia* y *Quararibea* de Sudamérica y otras novedades nomenclaturales. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,* 49 (en prensa).

**Fernández-Alonso, J.L. & Campos-Pineda, E.** (2023). *Matisia gentryi* and *M. tinamastiana* (Malvaceae), two species newly recorded from Panamá and an updated key to *Matisia* species in this country. *Check List, 19*(6), 1013-1020. https://doi.org/10.15560/19.6.1013

**Fernández-Alonso, J.L. & Campos-Pineda, E.** (2024). *Malvaceae neotropicae novae vel minus cognitae XII*. Nuevas especies de *Matisia* de Colombia y Panamá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 48*(189), 897-921. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3072

**Font i Quer, P.** (1985). *Diccionario de Botánica*. Editorial Labor. Barcelona, España.

**Gentry, A.H. (1986.** Species richness and floristic composition of Choco region plant communities. *Caldasia, 15,* 71-91.

**Harris, J.G. & Harris, M.W.** (2001). *Plant identification terminology: An illustrated glossary.* 2nd ed. Spring Lake Publishing.

**IUCN** (2022). *Guidelines for using the IUCN Red List categories and criteria*. Version 15.1. Standards and Petitions Committee. IUCN. https://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf

**Parra, C.A. & Perez, J.A.** (2017). Los herbarios de la Universidad Nacional de Colombia. pp. 8-21 en: E. Restrepo, C.H. Sánchez & G. Silva (eds.) *Naturaleza en Observación* (Colección del Sesquicentenario III). Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.

**Patiño, V. M.** (2012). Historia de la cultura material en la América equinoccial. Tomo I. Alimentación y alimentos. Bogotá: Ministerio de Cultura. 264 p.

**Thiers, B.** (2025). *Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff.* New York Botanical Garden, New York. https://sweetgum.nybg.org/science/ih/

**Urrego, L.E. & Del Valle, J.I. (**2002). Reconstrucción de la sucesión en un bosque de "guandal" (Pacífico Colombiano) durante el holoceno reciente. *Caldasia, 24*(2), 425-443.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):732-746, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3178



Artículo original

# Composición taxonómica y riqueza de la avifauna asociada a relictos de bosque seco tropical del departamento de Bolívar, Colombia

## Taxonomic composition and richness of birdlife associated with remnants of tropical dry forest in the department of Bolívar, Colombia

**Giancarlo Romero-Arrieta[1,*], Hugo A. Vides-Avilez[2], Alejandro Henao-Castro[1]**

[1] Programa de Biología, Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia
[2] Programa de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia

## Resumen

Las tierras bajas del Caribe colombiano albergan más de 600 especies de aves. El conocimiento que se tiene sobre la avifauna en el departamento de Bolívar, sin embargo, aún es limitado particularmente en los relictos de bosque seco tropical. Este ecosistema fue uno de los más extensos de Colombia, pero ha sido transformado radicalmente por actividades humanas como la ganadería, los monocultivos, los incendios y la tala. Nos propusimos, entonces, determinar la composición taxonómica y la riqueza de la avifauna en ocho relictos de bosque seco tropical de Bolívar. Las muestras se recolectaron en ocho localidades mediante conteos por puntos durante cuatro días por sitio. Se emplearon redes de niebla y grabaciones acústicas como métodos complementarios para confirmar la presencia de especies. El estudio documentó 323 especies de aves en los relictos de bosque seco tropical evaluados, destacándose las localidades en Montes de María entre las de mayor riqueza registrada. Los resultados resaltan la importancia de estos relictos para la conservación de la avifauna regional y respaldan la necesidad de incorporar el bosque seco tropical de Bolívar en estrategias de conservación, restauración y manejo del paisaje.

**Palabras clave:** Avifauna; Bosque seco tropical, Caribe colombiano; Riqueza de especies; Composición taxonómica.

## Abstract

The Colombian Caribbean lowlands harbor more than 600 bird species. However, the knowledge of the avifauna in the department of Bolívar is limited, particularly that in tropical dry forest remnants. Tropical dry forests were once one of the most extensive ecosystems in Colombia, but they have been heavily transformed by human activities such as cattle ranching, monocultures, fires, and logging. Here, we aimed to determine the taxonomic composition and species richness of the avifauna in eight tropical dry forest remnants in the department of Bolívar. Sampling was conducted in eight localities using point counts over four days per site; additionally, mist nets and acoustic recordings were used as complementary methods to confirm species presence. The study documented 323 bird species in the tropical dry forest remnants under evaluation, identifying Montes de María localities among those with the highest recorded richness. Our results highlight the importance of these remnants for regional bird conservation and support the inclusion of Bolívar's tropical dry forest in conservation, restoration, and landscape management strategies.

**Keywords:** Avifauna; Tropical dry forest, Colombian Caribbean; Species richness; Taxonomic composition.

**Citación:** Romero-Arrieta G, *et al*. Composición taxonómica y riqueza de la avifauna asociada a relictos de bosque seco tropical del departamento de Bolívar, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):732-746, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3178

**Editor:** Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**
Giancarlo Romero-Arrieta;
gianromeroa@gmail.com

**Recibido:** 22 de abril de 2025
**Aceptado:** 8 de abril de 2026
**Publicado en línea:** 11 de junio de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

## Introducción

El bosque seco tropical (BST) es un bioma forestal localizado en tierras bajas de zonas tropicales que presenta una estacionalidad marcada por lluvias alternadas con varios meses de sequía al año (**Bullock *et al.,*** 2011; **Pizano *et al.***, 2016). Originalmente fue un ecosistema extenso en Colombia, con unos 8.000.000 de hectáreas distribuidas en los valles geográficos de los ríos Cauca y Magdalena, la costa Caribe, y los Llanos Orientales; sin embargo, hoy su cobertura se ha reducido en un 92 % (**Pizano *et al.***, 2016). En la región Caribe colombiana el BST posee una gran diversidad beta, que se atribuye a su marcada alteración y configuración espacial, lo cual ha generado una variada diferenciación florística cuyos relictos son de importancia en términos de conocimiento, servicios ecosistémicos y conservación (**García-Q *et al.***, 2021).

Colombia cuenta con 1966 especies de aves, 161 de ellas son migratorias y 84 endémicas, en tanto que 140 se inscriben en alguna categoría de amenaza (**Echeverry-Galvis *et al.***, 2022). En las zonas bajas del Caribe colombiano se han documentado 617 especies agrupadas en 69 familias (**Bernal-González *et al.***, 2012). A pesar de esta situación, el conocimiento sobre la avifauna en esta región del país es limitado e incompleto; los estudios publicados en revistas científicas sobre aves acuáticas son esporádicos y aportan escasa información sobre la avifauna del BST (**Estela & Victoria**, 2005; **Bernal-González *et al.***, 2012). Aunque no se conocen las especies que habitan en los relictos de BST de Bolívar, en la región Caribe dichos remanentes se consideran los de mayor cobertura original, pero también, los más fragmentados (**Gillespie & Walter**, 2001; **Rodríguez *et al.***, 2012; **Pizano *et al.***, 2016; **Paternina *et al.***, 2017) y deteriorados por actividades humanas como la ganadería, los monocultivos, los incendios y la tala (**Losada-Prado & Molina-Martínez**, 2011; **Pizano *et al.***, 2016).

Entre los trabajos ornitológicos publicados sobre Bolívar solo se encuentra el de **Haffer & Borrero** (1965), quienes documentaron la avifauna de la serranía de San Jacinto a partir de pieles recolectadas. Por otro lado, se cuenta con la caracterización ecológica rápida realizada por **Álvarez *et al.*** (1997) en dos remanentes de BST en el municipio de Zambrano y la isla de Tierra Bomba, así como el trabajo de **Buelvas & Buelvas** (2015), quienes caracterizaron las aves del sendero el Yayal en el Santuario de Flora y Fauna Los Colorados mediante algunos estimadores de diversidad.

En general, el conocimiento sobre la biodiversidad del Caribe colombiano ha avanzado de manera lenta y presenta vacíos importantes en varios grupos biológicos, incluidos las aves. **Aldana-Domínguez *et al.*** (2017) señalan que, aunque la región alberga una gran riqueza biológica, la información disponible sobre la composición y la distribución de muchas especies es fragmentaria y poco representativa a escala regional. Esta situación es especialmente crítica cuando se trata del bosque seco tropical, cuyos inventarios son escasos y la pérdida de cobertura se ha acelerado durante las últimas décadas.

Según **BirdLife International** (2008), muchas aves se distribuyen en áreas específicas y la mayoría están restringidas a ciertos tipos de hábitats. Por ello, en el presente trabajo nos propusimos conocer la composición taxonómica y la riqueza del ensamblaje de aves en ocho relictos de BST en el departamento de Bolívar, lo que permitirá ampliar los conocimientos sobre la avifauna en esta zona de la región Caribe, con miras a establecer información técnica que funcione como referencia para su conocimiento, manejo y conservación. Con la información obtenida, se espera consolidar una primera aproximación integral a la riqueza y la composición de las comunidades de aves en relictos de bosque seco tropical del departamento de Bolívar. Con el estudio aspiramos a llenar vacíos de información existentes y resaltar el papel de estos fragmentos como reservorios de biodiversidad y puntos de referencia para futuros monitoreos y estrategias de conservación a escala local y regional.

## Materiales y métodos

El bosque seco tropical (BST) en el departamento de Bolívar se ubica principalmente en las zonas de desarrollo económico y social (ZODES), en los Montes de María y el norte bolivarense (**Gobernación de Bolívar**, 2020). Allí se seleccionaron ocho localidades

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):732-746, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3178

que cuentan con relictos representativos de BST: cerro Zumbador, cerro Capiro, cerro Mica Prieta y cerro El Trueno en la ZODES Montes de María. En el caso de la ZODE Norte bolivarense, las cuatro localidades escogidas fueron la reserva Matute, la reserva-finca La Ciénaga, la reserva forestal Monterrey y la Agrícola Camelias (**Figura 1**). Estas localidades se encuentran entre los 30 y 524 msnm, inmersas en un mosaico de coberturas naturales y transformadas, con niveles de precipitación que fluctúan entre los 500 y los 2.000 mm anuales.

Los usos principales del suelo incluyen la agricultura, la ganadería, los bosques comerciales y los rastrojos en estado de sucesión (**Pérez**, 2005). Sin embargo, algunos remanentes de BST con coberturas de vegetación secundaria, riparia y fragmentos conservados se han mantenido hasta hoy; en ellos pueden encontrarse especies características del BST como *Bursera simaruba, Cordia dentata, Anacardium excelsum, Sterculia apetala, Hura crepitans, Cavanillesia platanifolia, Astrocaryum malybo, Pereskia guamacho, Pseudobombax septenatum* y *Pterygota colombiana* (**Rodríguez *et al.***, 2012; **Pizano *et al.***, 2016). Estos remanentes se seleccionaron para llevar a cabo el trabajo de campo y determinar su avifauna (**Figura 2**).

Cada localidad se visitó una sola vez entre 2019 y 2023. Se muestrearon cuatro localidades durante los meses lluviosos y cuatro durante los meses secos. Los cerros Zumbador y Capiro se muestrearon a comienzos de noviembre de 2019 (época lluviosa) y los cerros Mica Prieta y Trueno a comienzos de febrero de 2020 (época seca). En Agrícola Camelias y la Reserva Matute, los muestreos se llevaron a cabo en septiembre de 2022 (época lluviosa) y en la Reserva Monterrey y la Reserva-Finca La Ciénaga en marzo de 2023 (época seca). El muestreo de aves se hizo mediante conteos por puntos, siguiendo las recomendaciones metodológicas propuestas por **Ralph *et al.*** (1996). En cada localidad se establecieron 20 puntos de conteo, separados entre sí por una distancia de 100 m, con el fin de garantizar la independencia espacial de los registros y cubrir la mayor diversidad de microhábitats dentro de cada relicto de bosque seco tropical.

En cada punto se registraron todas las aves observadas o escuchadas en un lapso de 10 minutos. Los censos se hicieron en jornadas matutinas (06:00–11:00 h) y vespertinas (16:00–18:30 h), periodos en los cuales la actividad de las aves suele ser mayor. Cada




**Figura 1.** Ubicación de las ocho localidades con relictos de bosque seco tropical en el departamento de Bolívar, Colombia. Fuente: elaboración propia utilizando QGIS, 2022

localidad se muestreó durante cuatro días consecutivos, manteniendo el mismo número de puntos de conteo y el mismo esfuerzo de muestreo en todas ellas, con el fin de garantizar la comparabilidad de los registros.

En las observaciones se utilizaron binoculares de 10×42, y la identificación de las especies se apoyó en guías especializadas en la avifauna de Colombia (**Hilty & Brown**, 2001; **Restall *et al.***, 2007; **Ayerbe-Quiñones**, 2018; **McMullan *et al.***, 2018). Además, en las jornadas de campo se emplearon redes de niebla y registros acústicos para confirmar la presencia de especies difíciles de detectar en los censos visuales y auditivos.

Con el fin de obtener un listado actualizado y detallado de la avifauna en el área de estudio, se hizo una revisión de libros, artículos y notas científicas publicadas, así como de informes técnicos de instituciones gubernamentales, ONG y tesis de grado con información relacionada. Además, se complementó el inventario de especies en cada una de las ocho localidades de estudio con registros provenientes de la base de datos **eBird** (2023) o de zonas muy cercanas en aquellos casos en los que no se encontraran registros para dichas localidades.

Las especies registradas mediante información primaria (muestreos en campo) se categorizaron según gremios alimenticios y mediante diagramas de barras. A partir de los datos publicados por **Hilty y Brown** (2001) y **Billerman *et al.*** (2022), se establecieron las siguientes categorías: aves frugívoras (F), es decir, que se alimentan principalmente de frutas; granívoras (G), que se alimentan principalmente de semillas secas; invertebrados terrestres (I), aves que se alimentan fundamentalmente de invertebrados terrestres; nectarívoras (N), que se alimentan principalmente de néctar; invertebrados acuáticos (IA), aves que se alimentan sobre todo de crustáceos, bivalvos y otros artrópodos acuáticos; herbívoras (H), que se alimentan principalmente de brotes o plantas acuáticas; carnívoras (C), que se alimentan fundamentalmente de carne de otros animales cazados, o de carroña; y omnívoras (O), es decir, especies de dieta generalista.

La categoría de endemismo se determinó siguiendo a **Chaparro-Herrera *et al.*** (2024). En cuanto al estado de amenaza e interés para la conservación de cada especie, se consultaron distintas fuentes de información como las listas rojas nacionales (**Ministerio de Aambiente y Desarrollo Sostenible-MADS**, 2024; **Renjifo *et al.***, 2017) e internacionales (**IUCN**, 2022), y los apéndices de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (**CITES,** 2022). Asimismo, el estatus de residencia y migración se determinó según los planteamientos de **Echeverry-Galvis *et al.*** (2022). En el caso de las aves acuáticas, se tuvo en cuenta lo propuesto por **Ruiz-Guerra & Cifuentes-Sarmiento** (2021).

La abundancia de las especies se estimó a partir del número de individuos registrados durante los conteos por punto en cada localidad, considerando tanto las detecciones visuales como las auditivas. Dado que cada punto se visitó durante cuatro días de muestreo, se utilizó el mayor número de individuos registrados por especie a lo largo de los cuatro muestreos, con el fin de evitar la sobreestimación asociada a la posible detección repetida de los mismos individuos en visitas sucesivas. En este contexto, la abundancia debe interpretarse como un índice de abundancia relativa derivado del máximo conteo, y no como una estimación directa del tamaño poblacional de las especies (**Ralph *et al.***, 1995; **Bibby *et al.***, 2000).

Las capturas mediante redes de niebla y los registros acústicos se utilizaron únicamente como métodos complementarios para confirmar la presencia de especies cripticas, por lo que estos registros se incorporaron exclusivamente al listado de especies y no fueron utilizados para estimar abundancias ni para los análisis de diversidad.

Para evaluar la suficiencia del muestreo se elaboraron curvas de acumulación de especies con base en los datos de incidencia y a partir de estimadores no paramétricos de riqueza (Chao 1, ACE y Jackknife 1), complementados con el índice de completitud para cada localidad (**Villareal *et al.***, 2004).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):732-746, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3178

Con el fin de facilitar la interpretación ecológica de la diversidad y permitir comparaciones más directas entre comunidades, los índices de diversidad se expresaron como números efectivos de especies o números de Hill (**Jost**, 2006; **Chao *et al.*,** 2014).

Se hizo un análisis enfocado en las especies asociadas al bosque seco tropical, para lo cual se filtraron las especies según sus preferencias generales de hábitat utilizando información disponible en guías de campo y en la plataforma Birds of the World. Las especies cuyo ecosistema principal corresponde a ambientes acuáticos, costeros o marinos se excluyeron de este análisis. Así, los análisis de diversidad y de composición centrados en el bosque seco tropical se hicieron únicamente con aquellas especies que pueden utilizar este tipo de hábitat.

## Resultados

En las ocho localidades de bosque seco tropical del departamento de Bolívar se registraron 322 especies de aves distribuidas en 24 órdenes y 56 familias (**Tabla 1S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3178/5333). Se identificaron 23 especies con alguna categoría de endemismo y siete catalogadas como amenazadas según la **UICN** (2022) y el Libro Rojo (**Renjifo *et al.***, 2017). Además, se registraron 62 especies migratorias, 68 reportadas en los apéndices de la CITES y 58 de hábitos acuáticos. El 74 % de las especies (n=241) fueron detectadas mediante métodos de recolección de información primaria y las restantes 81 en fuentes secundarias. Las especies con mayor número de registros durante los muestreos fueron *Brotogeris jugularis* (123 registros), *Eupsittula pertinax* (108) y *Ortalis garrula* (103), en tanto que 25 especies tuvieron un solo registro.

El número de especies encontradas representa el 93 % de la avifauna esperada según los índices de completitud de los estimadores usados (**Tabla 1**), lo que sugiere que el esfuerzo de muestreo fue adecuado, como se evidencia en la tendencia hacia la asíntota de los estimadores ACE, Chao 1 y Jacknife 1 (**Figura 2**). El índice de completitud promedio por localidad superó el 80 %, con La Ciénaga alcanzando el 90 %, en tanto que el monte Capiro y Agrícola Camelias presentaron los valores más bajos (81 %). Con el índice Jacknife 1 se obtuvieron los menores porcentajes (72 - 85), mientras que el ACE arrojó los valores más altos (82 % - 94 %), similares a los del Chao 1 (85 % - 91 %).

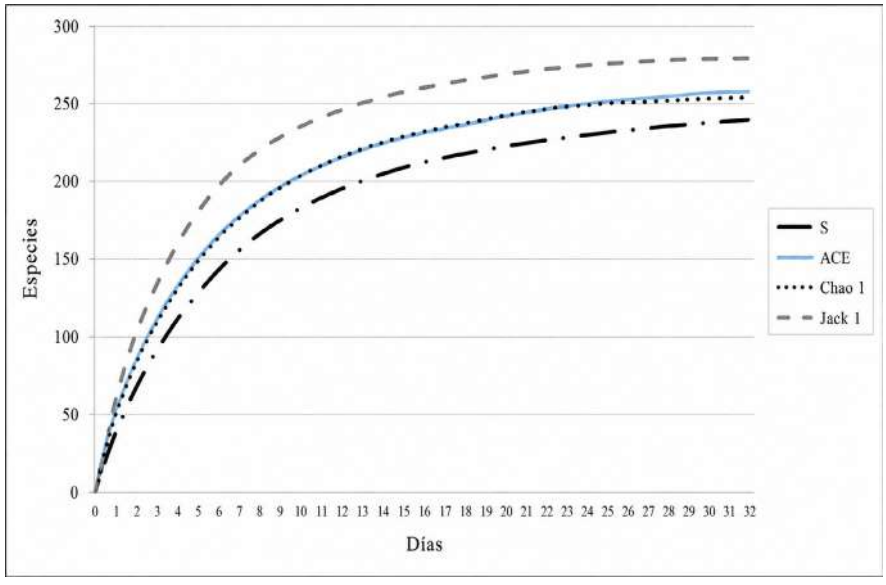



**Figura 2.** Curva de acumulación de especies de la avifauna del bosque seco tropical en el norte y el centro del departamento de Bolívar

**Tabla 1.** Porcentaje de índices de completitud a partir de los estimadores no paramétricos de diversidad de los relictos de bosque seco tropical del departamento de Bolívar

| **Índice de completitud por estimador** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Localidad** | **S** | **ACE %** | **Chao 1 %** | **Jacknife 1 %** | **Porcentaje** |
| **C. Zumbador** | 131 | 88 | 90 | 76 | 85% |
| **C. Capiro** | 145 | 84 | 87 | 72 | 81% |
| **C. Mica Prieta** | 71 | 90 | 92 | 73 | 85% |
| **C. Trueno** | 171 | 89 | 92 | 75 | 85% |
| **A. Camelias** | 98 | 82 | 85 | 77 | 81% |
| **R. Matute** | 88 | 91 | 93 | 78 | 87% |
| **R. Monterrey** | 85 | 91 | 91 | 79 | 87% |
| **R. La Ciénaga** | 119 | 94 | 91 | 85 | 90% |
| **General** | 241 | 95 | 97 | 87 | 93% |

De los 24 órdenes registrados, se documentaron 20 en las ocho localidades. Passeriformes presentó la mayor riqueza, con 134 especies, seguido de Accipitriformes y Apodiformes, con 16 y 15 especies, respectivamente. En contraste, Caprimulgiformes, Gruiformes, Nyctibiiformes y Tinamiformes solo registraron una especie cada uno (**Figura 3**).

De las 56 familias reportadas en el estudio, se documentaron 46 familias en las ocho localidades de estudio, siendo Tyrannidae la más diversa (38 especies), seguida de Thraupidae y Accipitridae (16 especies cada una). En contraste, 12 familias registraron solo una especie (**Figura 3**). Se identificaron 23 especies incluidas en el Listado de Aves Endémicas y Casi Endémicas de Colombia: Evaluación 2013-2023 (**Chaparro-Herrera *et al.***, 2024): 20 casi endémicas, dos endémicas (*Ortalis garrula* y *Forpus spengeli*) y una de interés (*Phaethornis anthophilus*).

La dieta de las especies registradas fue diversa, sin adherirse, en general, a un gremio trófico específico y con consumo de alimentos de diversas fuentes. La mayoría de las especies se alimentaban de invertebrados, frutas y granos (I/F/G) (74 especies), seguidas de aquellas con una dieta exclusiva de invertebrados (I) (51 especies) (**Figura 4**). En cambio, las dietas compuestas por carne e invertebrados acuáticos (C/IA), carne e invertebrados acuáticos e invertebrados (C/IA/I), herbívoras e invertebrados acuáticos (H/IA), invertebrados y carne (I/C), invertebrados e invertebrados acuáticos (I/IA), e invertebrados acuáticos y herbívoras (IA/H) correspondieron a una especie cada una (**Figura 4**).

Siete especies se catalogaron como amenazadas: cinco a partir de las listas nacionales (**Renjifo *et al.***, 2017; **MADS**, 2024) y cuatro incluidas en la lista internacional (**IUCN**, 2022). Tres especies mencionadas en la Resolución 0126 de 2024 (**MADS**, 2024) están en la categoría de vulnerable (VU) y coinciden con el Libro Rojo de Colombia, que también incluye a *Anas bahamensis* y *Contopus cooperi* como casi amenazadas (NT). La Lista Roja de la UICN clasifica cuatro especies como NT y una como VU.

Se registraron 68 especies de los apéndices de la CITES, principalmente el apéndice II (62 especies), seguidas por cuatro del apéndice III y dos del apéndice I. En cuanto a la migración, 62 especies se clasificaron como migratorias: 49 boreales, seis boreales con poblaciones residentes, cinco australes con poblaciones residentes y dos boreal-australes. Además, se identificaron 58 especies con hábitos acuáticos según **Ruiz-Guerra & Cifuentes-Sarmiento** (2021), lo que representa el 18 % del total registrado.

En el cerro El Trueno se registró la mayor riqueza (170 especies), seguido de cerro Capiro (144 especies), en tanto que el cerro Mica Prieta tuvo el menor registro (69

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):732-746, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3178

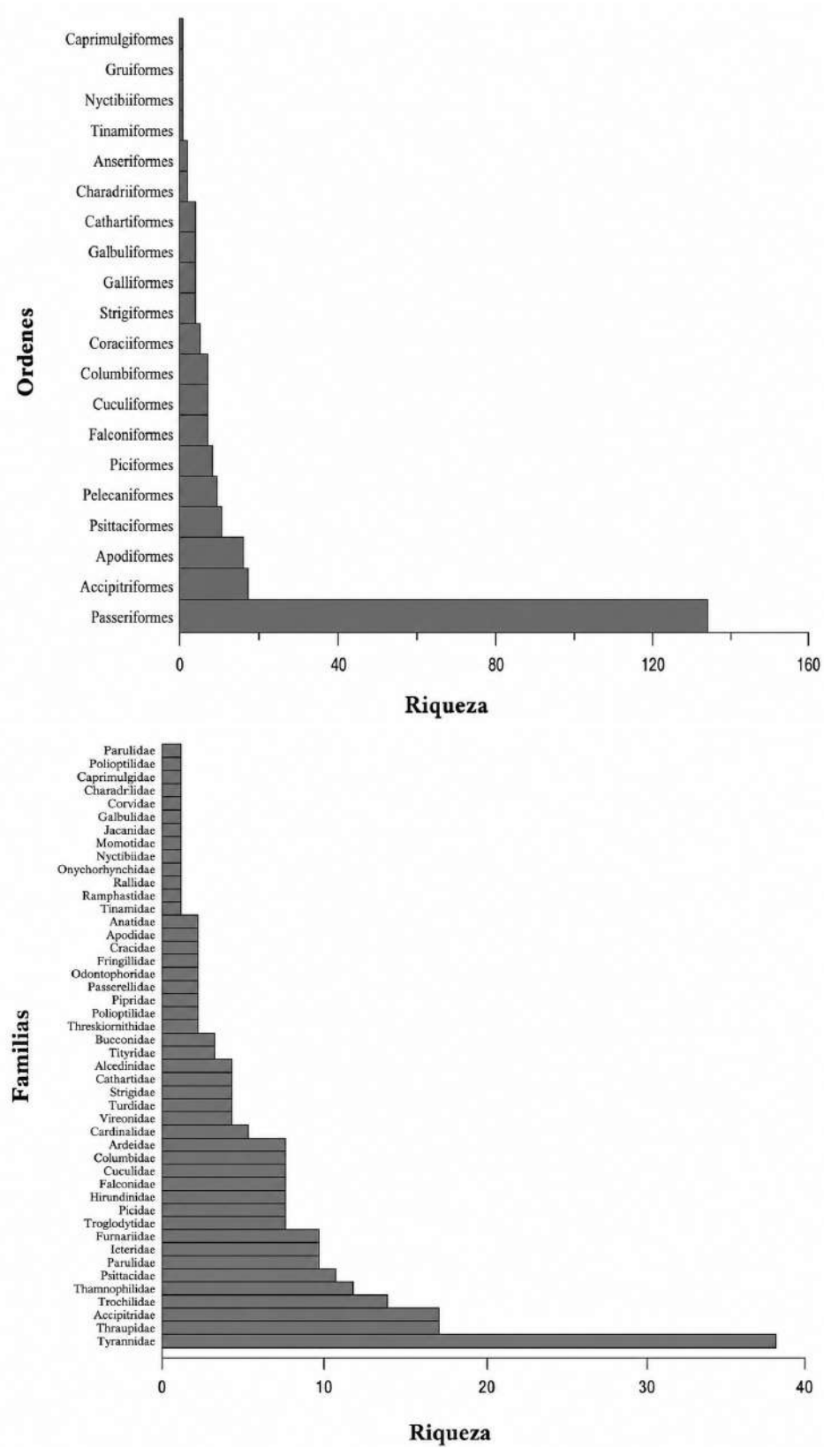



**Figura 3.** Riqueza de especies por órdenes y familias del bosque seco tropical de las localidades de Montes de María y Norte de Bolívar

especies). En cuanto al número de registros, La Ciénaga presentó el mayor valor (602), seguida por Agrícola Camelias (463), y el cerro Mica Prieta reportó la menor cantidad (268) (**Figura 5**).

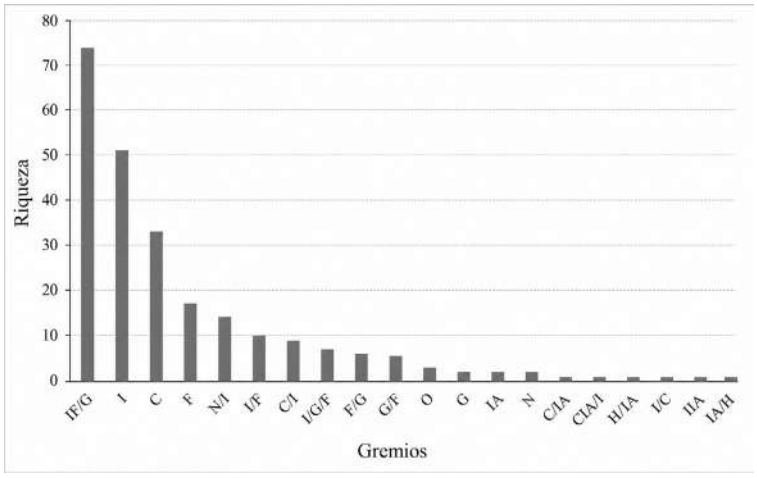



**Figura 4.** Riqueza de especies por gremio trófico en el bosque seco tropical del norte y el centro del departamento de Bolívar. F: dieta principalmente de frutas; G: fundamentalmente de semillas secas; I: mayormente de invertebrados terrestres; N: principalmente de néctar; IA: sobre todo de crustáceos, bivalvos y otros artrópodos acuáticos; H: fundamentalmente de brotes o plantas acuáticas; C: principalmente de carne de otros animales cazados, o de carroña; O: dieta generalista.

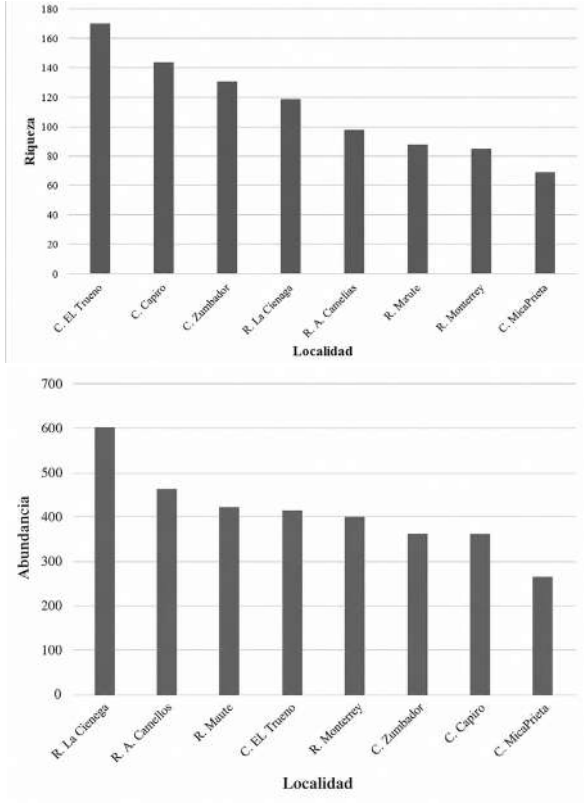



**Figura 5.** Riqueza y abundancia de especies de aves en el bosque seco tropical del departamento de Bolívar.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):732-746, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3178

La diversidad de la avifauna en las localidades evaluadas evidenció que la riqueza estimada (q0) fue mayor en el cerro El Trueno (180 especies), seguida por la del Capiro (158) y el Zumbador (144), en tanto que la menor se registró en los cerros Mica Prieta (68,3) y Matute (89). Al considerar la diversidad ponderada por abundancia (q1), los cerros Trueno (174) y Capiro (146) mantuvieron los valores más altos, evidenciando comunidades más equitativas, mientras que Mica Prieta (53,5) y Camelias (61,4) presentaron valores menores.

En términos de dominancia (q2), los cerros Trueno (148) y Capiro (123) continuaron destacándose, lo que indica una menor influencia de especies dominantes en comparación con otras localidades. Por el contrario, los valores más bajos en Camelias (37,9) y Mica Prieta (39,1) sugieren comunidades más dominadas por un menor número de especies (**Tabla 2**).

## Discusión

En los relictos de bosque seco tropical (BST) estudiados se registraron 242 especies a partir de la información primaria y 323 al incluir la información secundaria. En comparación con estudios previos (**Tabla 3**), este inventario representa el registro más alto documentado hasta ahora para relictos de BST en el departamento de Bolívar y uno de los más altos disponibles para el Caribe colombiano. En conjunto, esta riqueza corresponde a más de la mitad (51,75 %) de la riqueza de las especies de aves documentada para este ecosistema, lo que resalta la importancia de los relictos evaluados para la conservación de la avifauna regional.

La estructura de la dieta observada en los relictos de bosque seco tropical del departamento de Bolívar reveló una alta representación de especies que consumen invertebrados, frutas y granos, así como de insectívoras estrictas, lo que coincide con patrones documentados para ecosistemas secos tropicales. **Gillespie y Walter** (2001) señalan que en bosques secos de Centroamérica la marcada estacionalidad de la disponibilidad de recursos influye sobre la composición de las comunidades de aves y favorece la presencia de especies con dietas flexibles. Asimismo, Álvarez-Álvarez ***et al.*** (2018) registraron en un bosque seco tropical del suroeste de México variaciones significativas en la abundancia de las aves y en la representación de los tipos de dieta entre estaciones y usos del suelo, asociadas principalmente a cambios en la disponibilidad de alimento. **Ocampo-Ariza *et al.*** (2022), por su parte, evidenciaron que en paisajes agroforestales vinculados al bosque seco tropical la respuesta de los grupos funcionales (en particular de las aves insectívoras) difiere entre la estación seca y la lluviosa. En conjunto, estos antecedentes respaldan la interpretación de que la composición trófica registrada en el Bs-T de Bolívar está estrechamente ligada a la dinámica estacional del ecosistema.

**Tabla 2.** Diversidad de la avifauna por localidad expresada como números efectivos de especies (q0, q1 y q2); se excluyeron las especies asociadas a ambientes acuáticos.

| Localidades | q0 | q1 | q2 |
|---|---|---|---|
| C. Zumbador | 144 | 125 | 102 |
| C. Capiro | 158 | 146 | 123 |
| C. Mica Prieta | 68,3 | 53,5 | 39,1 |
| C. Trueno | 180 | 174 | 148 |
| A. Camelias | 120 | 61,4 | 37,9 |
| R. Matute | 89 | 62,6 | 43,0 |
| R. Monterrey | 94,8 | 62,9 | 43,9 |
| R. La Ciénaga | 108 | 80,9 | 59,1 |

**Tabla 3.** Comparación de la riqueza de especies de aves registradas en distintos estudios realizados en relictos de *Bosque Seco Tropical* (BST) en el Caribe colombiano y otras regiones

| Estudio | Localidad / Región - Departamento | N° de especies registradas |
|---|---|---|
| **Haffer & Borrero** (1965) | Serranía de San Jacinto, Bolívar | **90** |
| **Álvarez *et al.*** (1997) | Zambrano y la Isla de Tierra Bomba, Bolívar | **35** |
| **Buelvas & Buelvas** (2015) | Santuario de Flora y Fauna Los Colorados, Bolívar | **155** |
| **Galván-Guevara & Sierra** (2009) | Estación primatológica, Colosó – Sucre | **58** |
| **Strewe *et al.*** (2009) | Campus Universidad del Magdalena - Magdalena | **186** |
| **Turizo & Hernández-Palma** (2022) | Campus Universidad del Magdalena - Magdalena | **92** |
| **Paternina *et al*.** (2017) | Cuatro localidades con fragmentos de BST asociados a potreros – Córdoba | **180** |
| **Castro-Vásquez** (2016) | Todos los ecosistemas del departamento - Atlántico | **372** |
| **Posada *et al*.** (2019) | Atlántico | **9** |
| **Arteta & Lázaro** (2014) | Ocho localidades de bosque seco en la media Guajira - La Guajira | **54** |
| **Parra *et al.*** (2016) | Hibácharo, San Juan Nepomuceno, Hatonuevo - Atlántico, Bolívar, La Guajira | **138** |
| **Peñuela-Díaz & Garzón** (2019) | San Juan de Rio Seco, Beltrán, Pulí, Jerusalén, Guataquí y Nariño – Cundinamarca | **190** |
| **Gómez & Robinson** (2014) | Comunidades del valle alto del río Magdalena - No especificado | **227** |
| **Young *et al.*** (1997) | Bosques secos de Centro y Sur América | **635** |

La composición trófica observada también parte del contexto de fragmentación que caracteriza el bosque seco tropical del Caribe. **Paternina *et al.*** (2017) encontraron que en fragmentos de BST inmersos en matrices ganaderas de Córdoba los ensamblajes estuvieron dominados por especies generalistas o de dieta amplia, capaces de explotar recursos tanto del interior del bosque como de la matriz circundante. En los relictos evaluados en Bolívar se observó un patrón comparable, con alta representación de los frugívoros oportunistas, de omnívoros y de insectívoros generalistas. Aunque nuestro estudio no evaluó de manera directa las métricas de configuración del paisaje, estos resultados son consistentes con la idea de que la composición funcional de las comunidades de aves en la región está influida tanto por la estacionalidad del ecosistema, como por la heterogeneidad y transformación del entorno.

La curva de acumulación de especies y los estimadores no paramétricos indicaron una alta completitud del muestreo, con un valor global del 93 %. Aunque ningún inventario agota por completo la diversidad potencial de un paisaje heterogéneo, este resultado sugiere que el esfuerzo aplicado fue adecuado para caracterizar el ensamblaje de aves documentado en las localidades evaluadas. En términos taxonómicos, Passeriformes concentró la mayor riqueza de especies y Tyrannidae fue la familia más diversa, un patrón ampliamente documentado en ensamblajes de aves neotropicales (**Cracraft *et al.***, 2009; **Winkler *et al.***, 2020).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):732-746, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3178

Entre las especies de interés para la conservación, el endemismo de aves en el bosque seco tropical (BST) es relativamente bajo en comparación con otras regiones como los Andes tropicales o el bosque atlántico de Brasil, donde se registran 30 especies y subespecies de rango restringido, de las cuales seis son especies endémicas (**Gómez & Robinson**, 2014). En el caso del departamento de Bolívar, se han registrado 13 especies endémicas (**SiB Colombia**, 2022), y los resultados del presente estudio son consistentes con este patrón, documentándose únicamente dos especies endémicas, *Ortalis garrula* y *Forpus spengeli*. Además, se registraron 62 especies migratorias, lo que resalta la importancia de estos relictos no solo a escala local, sino también como parte de las rutas migratorias del Neotrópico. Asimismo, se identificaron tres especies con alguna categoría de amenaza según la Resolución 0126 de 2024 del MADS y cinco incluidas en categorías de amenaza de la UICN. A esto se suma el registro de 68 especies incluidas en los apéndices de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES), así como de 58 especies con hábitos acuáticos. En su conjunto, esto refuerza la importancia de los relictos evaluados como espacios prioritarios para la conservación de la avifauna del BST en el departamento de Bolívar.

La presencia de especies asociadas a zonas abiertas, cuerpos de agua o ecotonos es consistente con el contexto de transformación y heterogeneidad del paisaje que rodea a los fragmentos de bosque seco tropical (BST). En paisajes tropicales fuertemente intervenidos, múltiples especies de aves pueden utilizar de manera simultánea fragmentos de bosque, setos, potreros y áreas abiertas. **Şekercioğlu *et al.*** (2007) documentaron que en zonas agrícolas de Costa Rica, más de la mitad de las especies nativas hacen uso de áreas deforestadas siempre que persistan árboles remanentes, los cuales proveen microhábitats y actúan como nodos de conectividad. En la misma línea, **Kupfer *et al.*** (2006) plantean que en paisajes fragmentados la matriz no debe considerarse necesariamente como un lugar inhóspito, sino como un elemento que puede facilitar o restringir el movimiento de la fauna. En este marco, la presencia de especies asociadas a distintos ambientes en el inventario registrado aquí puede interpretarse como una expresión del mosaico de coberturas que caracteriza el paisaje en el que se encuentran los relictos evaluados.

La diversidad de la avifauna varió entre localidades, con los valores más altos de riqueza y diversidad efectiva (q0, q1 y q2) en el cerro El Trueno y los más bajos en el cerro Mica Prieta. Estos resultados reflejan diferencias en la composición y en la distribución relativa de abundancias entre localidades, con comunidades más equitativas en los cerros Trueno y Capiro, y una mayor concentración de registros en menos especies en Camelias y Mica Prieta. En otros relictos de BST, este tipo de variación se ha relacionado con diferencias en la heterogeneidad del paisaje y en la estructura local del hábitat (**Correa & Mancera-Rodríguez**, 2020), así como con contextos de transformación del entorno (**Paternina *et al.***, 2017). Si bien el presente estudio no evaluó de manera directa estas variables, los resultados obtenidos son consistentes con esa posibilidad. Además, aunque el esfuerzo de muestreo fue estandarizado y la abundancia relativa se estimó mediante un criterio conservador basado en el mayor número de individuos registrados entre réplicas, algunas localidades se muestraron en época seca y otras en época lluviosa, por lo que la detección estacional de las aves pudo influir parcialmente en los patrones observados. Aun con estas precauciones, los valores registrados se mantienen dentro del rango reportado para otros relictos de BST de Colombia y resaltan la importancia de estos fragmentos para la conservación de la avifauna regional.

En conjunto, la riqueza, composición y diversidad registradas indican que los relictos de bosque seco tropical (BST) de Bolívar albergan ensamblajes de aves de alta relevancia para la conservación regional. En un paisaje históricamente transformado, estos fragmentos constituyen elementos claves para el mantenimiento de la biodiversidad y la persistencia de procesos ecológicos a escala local. En este sentido, los resultados respaldan su incorporación en estrategias de conservación, restauración y ordenamiento territorial en el departamento.

Los resultados obtenidos también adquieren especial relevancia en el contexto de los vacíos de conocimiento sobre los bosques secos colombianos que aún persisten. **Kattan *et al.*** (2019) señalan que los BST presentan una alta diversidad beta y amplias brechas de muestreo, particularmente en la región Caribe colombiano, lo que limita la comprensión de los patrones de composición y recambio a escalas regionales. En este sentido, el inventario realizado en Bolívar aporta una base empírica relevante para reducir parte de estas brechas y fortalecer el conocimiento relativo a la composición de las comunidades de aves en uno de los ecosistemas más amenazados del país.

## Conclusión

El bosque seco tropical (BST) del departamento de Bolívar alberga avifauna de gran relevancia para la conservación, con un inventario total de 323 especies que constituye uno de los registros más completos disponibles para este ecosistema en la región Caribe colombiana. En conjunto, los resultados muestran que los relictos evaluados mantienen una riqueza, composición y diversidad de aves que resaltan su valor dentro de un paisaje fuertemente transformado. La alta completitud del muestreo respalda la solidez del inventario obtenido, mientras que el registro de especies endémicas, amenazadas, migratorias e incluidas en los apéndices de la CITES refuerza la importancia regional de estas localidades. En este contexto, los relictos de BST de Bolívar deben considerarse en las estrategias de conservación, restauración y ordenamiento territorial, dada su contribución al mantenimiento de la biodiversidad y de procesos ecológicos en uno de los ecosistemas más amenazados del país.

## Información suplementaria

Ver información suplementaria en https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3178/5333

## Agradecimientos

A la Corporación Desarrollo Solidario por financiar parte de la presente investigación por medio del proyecto “Conservación, manejo y agricultura sostenible en Montes de María” y especial reconocimiento a su coordinadora, Daniela Ahumada, por su apoyo y las recomendaciones durante la elaboración del documento. A las comunidades montemarianas por su colaboración y participación durante el desarrollo del estudio. A los propietarios de las reservas de la zona norte por su apoyo y esfuerzo en pro de la conservación del BST: Norman Echavarría, Celedonio Piñeres, Alfredo Díaz (q.e.p.d.) y Rafael Camacho, así como a quienes colaboraron en la toma de datos: Luis Andrés González, Natalia Mora, Arturo Torres, María Ordóñez, Angie Estévez, Angelyn Rocero, Marcelo Ortega y Brandon Valencia, y en especial a la señora Katrin Stella Espitia y a Mónica Barragán por su generosa hospitalidad al abrirnos las puertas de sus casas y recibirnos con el cariño y la calidez propios de un hogar. Su amabilidad y atención durante la realización de los muestreos fueron invaluablemente reconfortantes. Por último, a Johanna Prüssmann por su apoyo, colaboración y recomendaciones para la creación de algunos insumos de esta investigación, y al profesor Gabriel Navas por sus recomendaciones durante la elaboración de este manuscrito. Sin ustedes esto seguiría siendo el sueño de un niño que no se cansaba de mirar al cielo.

## Contribución de los autores

GRA: desarrollo de la idea principal, diseño y planificación de los métodos, recolección de datos, análisis de datos, redacción del manuscrito, financiamiento, revisión del contenido. HVA: desarrollo de la idea principal, diseño y planificación de los métodos, recolección de datos, financiamiento, curación de datos y revisión del contenido. HAHC: revisión y análisis de datos, revisión del manuscrito.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses que pueda influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación.

## Referencias

**Aldana-Domínguez J., Montes C., Martínez M., Medina N., Hahn J., Duque M.** (2017). Biodiversity and ecosystem services knowledge in the Colombian Caribbean: progress and challenges. *Tropical Conservation Science* (10), 1-41. https://doi.org/10.1177/1940082917714229

**Álvarez-Álvarez, E. A., Corcuera, P., Almazán-Núñez, R. C.** (2018). Spatiotemporal variation in the structure and diet types of bird assemblages in tropical dry forest in southwestern Mexico. *The Wilson Journal of Ornithology, 130*(2), 457-469. https://doi.org/10.1676/17-009.1

**Álvarez, M., Escobar, F., Mendoza, H., Repizzo, A., H. Villareal.** (1997). *Caracterización ecológica de cuatro remanentes de bosque seco de la región Caribe colombiana.* Grupo de Exploración y Monitoreo Ambiental (GEMA), Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

**Arteta, B. R. & Lázaro, M.L.** (2014). Avifauna de Bosque Seco Subtropical Presente en Ocho Localidades de la Media Guajira Colombiana. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural, 18*(2), 125-137. http://www.scielo.org.co/pdf/bccm/v18n2/v18n2a10.pdf

**Bernal-González, V. A., Paternina-Hernández, A., Carvajal-Cogollo, J. E., Rangel-Ch, J. O., Ardila-Reyes, M. E.** (2012). Riqueza de la avifauna del Caribe colombiano, pp: 723-766. En Rangel-Ch., J.O. (Ed.). *Colombia Diversidad Biótica XII. La región Caribe de Colombia.* Universidad Nacional de Colombia-Instituto de Ciencias Naturales.

**Bibby, C. J., Burgess, N. D., Hill, D. A.** (2000). *Bird census techniques* (2nd ed.). Academic Press.

**Billerman, S. M., Keeney, B. K., Rodewald, P. G., Schulenberg, T. S.** (2022). *Birds of the World.* Cornell Laboratory of Ornithology. https://birdsoftheworld.org/bow/home

**Birdlife international.** (2008). *El estado de conservación de las aves del mundo: indicadores en tiempos de cambio.* BirdLife International.

**Buelvas, C. & Buelvas, V.** (2015). Aves del sendero El Yayal bosque seco tropical del Santuario de Flora y Fauna Los Colorados, Bolívar. *In Situ, 3,* 88-99.

**Bullock, S. H., Mooney, H. A., Medina, E.** (2011). *Seasonally dry tropical forests.* Island Press/ Center for Resource Economics eBooks. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-021-7

**Castro-Vásquez, L.** (2016). Aproximación al estado actual del conocimiento de la avifauna del departamento del Atlántico, Colombia. *Biota Colombiana*, *17*(1), 90-117. https://doi.org/10.21068/c2016v17r01a07

**Chaparro-Herrera, S., Lozano, M., Echeverry-Galvis, M. A.** (2024). Listado de las Aves Endémicas y Casi-Endémicas de Colombia: Evaluación 2013-2023. *Ornitología Colombiana*, 25, 34-45. https://doi.org/10.59517/oc.e580

**CITES.** (2022). Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora. http://cites.org. Revisado: marzo de 2024.

**Correa, Á. D. S. & Mancera-Rodríguez, N. J.** (2020). Aves como indicadoras ecológicas de etapas sucesionales en un bosque secundario, Antioquia, Colombia. *Revista de Biología Tropical, 68*(1), https://doi.org/10.15517/rbt.v68i1.34913

**Cracraft, J. Barker, F.K. Hedges, S.B., Kumar, S.** (2009). Aves paseriformes (Passeriformes). En *El árbol del tiempo de la vida* (págs. 423-431). Oxford University Press.

**eBird.** (2023). eBird: An online database of bird distribution and abundance [web application]. Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, New York. http://www.ebird.org. Revisado: junio 1, 2024.

**Echeverry-Galvis, M. Á., Acevedo-Charry, O., Avendaño, J. E., Gómez, C., Stiles, F. G., Estela, F. A., Cuervo, A. M.** (2022). Lista oficial de las aves de Colombia 2022: Adiciones, cambios taxonómicos y actualizaciones de estado. *Ornitología Colombiana, 22*, 25-51. https://doi.org/10.59517/oc.e548

**Estela, F. A. & Victoria, M. L.** (2005). Aves de la Parte Baja del Río Sinú, Caribe Colombiano; Inventario y Ampliaciones de Distribución. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras,* 34. https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2005.34.0.232

**Galván-Guevara, S. & Sierra, I.** (2009). Biodiversidad en el área de influencia de la estación primates de Colosó, Sucre, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA, 1*(1), 98. https://doi.org/10.24188/recia.v1.n1.2009.417

**García-Q, H., Carbonó-DelaHoz, E., Barranco-Pérez, W.** (2021). Diversidad beta del bosque seco tropical en el norte del Caribe colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, 45, 174*(174), 95-108. https://doi.org/10.18257/raccefyn.1267

**Gillespie, T. W. & Walter, H.** (2001). Distribution of bird species richness at a regional scale in tropical dry forest of Central America. *Journal Of Biogeography, 28*(5), 651-662. https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2001.00575.x

**Gobernación de Bolívar.** (2020). Plan de Desarrollo 2020-2023: Bolívar primero. Colombia: Bolívar.

**Gómez, J. P. & Robinson, S. K.** (2014). Aves del bosque seco tropical de Colombia: las comunidades del valle alto del río Magdalena. *El bosque seco tropical en Colombia*, pp. 95-128. Instituto Alexander von Humboldt

**Haffer, J. H. & Borrero, J. I.** (1965). On birds from northern Colombia. *Revista de Biología Tropical, 13*(1), 29-53. https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.1965.28726

**Hilty, S. L. & Brown, W.** (2001). *Birds of Colombia.* Princeton University Press, American Bird Conservancy-ABC, Universidad del Valle, Sociedad Antioqueña de Ornitología-SAO.

**IUCN.** (2022). Red List of Threatened Species. *Choice Reviews Online, 49*(12), 49-6872. https://doi.org/10.5860/choice.49-6872

**Jost, L.** (2006). Entropy and diversity. *Oikos, 113*(2), 363-375. https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x

**Kattan, G. H., Sánchez, C., Vélez, C., Ramírez, L., Celis, M.** (2019). Beta diversity and knowledge gaps of Colombia's dry forests: implications for their conservation. *Caldasia, 41*(1), 5-11. https://doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.72006

**Kupfer J, A., Malanson G, P., Franklin S, B.** (2006). Not seeing the ocean for the islands: the mediating influence of matrix-based processes on forest fragmentation effects. *Global Ecology and Biogeography, 15*(1), 8-20. https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00204.x

**Losada-Prado, S. & Molina-Martínez, Y. G.** (2011b). Avifauna del Bosque Seco Tropical en el Departamento del Tolima (Colombia): Análisis de la Comunidad. *Caldasia, 33*(1), 271-294. https://doaj.org/article/a1be74a958b74ce18fda082154835164

**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS.** (2024). Lista de especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica continental y marino-costera de Colombia - Resolución 0126 de 2024 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. v1.0. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. https://doi.org/10.15472/frowz3

**Ocampo-Ariza, C., Maas, B., Castro-Namuche, J. P., Thomas, E., Vansynghel, J., Steffan-Dewenter, I., Tscharntke, T.** (2022), Trait-dependent responses of birds and bats to season and dry forest distance in tropical agroforestry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *325/326*, 107751. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107751

**Parra, J. L., Sandoval-H, J., García, F. E., Cortés, M., Llano, L., Forrester, T. R.** (2016). *Aves de fragmentos de bosque seco en la región del Caribe Colombiano.* Grupo de Ecología y Evolución de Vertebrados-Universidad de Antioquia, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. http://doi.org/10.15472/yrjb5d http://doi.org/10.15472/yrjb5d

**Paternina, J. A. V., Correa, J. B., Charrasquiel, C. G., Arias, J. C. L.** (2017). Diversidad de aves en fragmentos de bosque seco tropical en paisajes ganaderos del Departamento de Córdoba, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, *65*(4), 1625. https://doi.org/10.15517/rbt.v65i4.26313

**Peñuela-Díaz, G. & Garzón, L.** (2019). Avifauna. En: López-Camacho, R. & Rojas, J. 2019. (Editores). *El Bosque Seco en el Territorio CAR.* Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR–Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

**Pérez-Valbuena, G. J.** (2005). *Bolívar : industrial, agropecuario y turístico.* Banco de La República. https://doi.org/10.32468/dtseru.58

**Pizano, C., González-M, R., López, R., Jurado, R. D., Cuadros, H., Castaño-Naranjo, A., Rojas, A., Peréz, K., Vergara-Varela, H., Idárraga, Á., Isaacs, P., García, H.** (2016). *El bosque seco tropical en Colombia.* Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt eBooks (pp. 21-22). https://doi.org/10.21068/b001.2015.202

**Posada, S. E., Vides, H. A., Plazas, G. G.** (2019). *Caracterización de la fauna asociada al Club Lagos de Caujaral, Puerto Colombia, Atlántico.* Club Lagos de Caujaral.

**Ralph, C., Geupel, G., Pyle, P., Martin, T., DeSante, D.** (1993). *Handbook of field methods for monitoring landbirds.* Forest Service U.S. Department of Agriculture. https://doi.org/10.2737/psw-gtr-144

**Ralph, C. J., Sauer, J. R., Droege, S.** (Eds.). (1995). *Monitoring bird populations by point counts.* USDA Forest Service.

**Renjifo, L. M., Amaya-Villarreal, A. M., Butchart, S. H. M.** (2020). Tracking extinction risk trends and patterns in a mega-diverse country: A Red List Index for birds in Colombia. *PLoS ONE, 15*(1), e0227381. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227381

**Renjifo, L. M., Amaya-Villarreal, Á. M., Burbano-Girón, J., Velásquez-Tibatá, J.** (2017). *Libro Rojo de Aves de Colombia. Volumen II.* Editorial Pontificia Universidad Javeriana, Instituto Alexander Von Humboldt. http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/34285

**Rodríguez M., G. M., Banda-R., K., Reyes B., S. P., & Estupiñán González, A. C.** (2012). *Lista comentada de las plantas vasculares de bosques secos prioritarios para la conservación en los departamentos de Atlántico y Bolívar (Caribe colombiano. Biota Colombiana,* 13(2). Recuperado a partir de https://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/261

**Ruiz-Guerra, C. & Cifuentes-Sarmiento, Y.** (2021). *Aves acuáticas de Colombia.* Asociación Calidris.

**SiB Colombia.** (2022). *Biodiversidad de Colombia en el mundo.* Biodiversidad en Cifras, Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia. https://biodiversidad.co/cifras

**Strewe, R., De León, C. V., Alzate, J., Beltrán, J., Moya, J., Navarro, C., Utría, G.** (2009). Las aves del campus de la Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. *Intropica*, 79-91. https://doaj.org/article/bf104920ddef47589af43a1fc08b4392

**Şekercioğlu, C.H., Loarie, S.R., Oviedo-Brenes, F., Mendenhall, C.D., Daily, G.C., Ehrlich, P.R.** (2007). Persistence of forest birds in the Costa Rican agricultural countryside. *Conservation Biology, 21*(2), 482-494. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00655.x

**Turizo, D. T. & Hernández-Palma, T. L.** (2022). Aves de la Universidad del Magdalena: análisis de la diversidad y actualización de registros. *Intropica*, 19-36. https://doi.org/10.21676/23897864.4224

**Villareal, H. M., Álvarez, M., Córdoba-Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza-Cifuentes, H., Ospina, M., Umaña, A. M.** (2004). Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. En Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt eBooks. http://repository.humboldt.org.co/bitstream/20.500.11761/32554/1/MM%20Inventarios%20BD.pdf

**Winkler, D.W. Billerman, S. M., Lovette, I. J.** (2020). Tyrant Flycatchers (Tyrannidae) & Tanagers and Allies (Thraupidae), versión 1.0. En *Birds of the World* (SM Billerman, BK Keeney, PG Rodewald y TS Schulenberg, editores). Laboratorio de Ornitología de Cornell. https://doi.org/10.2173/bow.tyrann2.01

**Young, B. E., Stotz, D. F., Fitzpatrick, J. W., Parker, T. A., Moskovits, D. K.** (1997). Neotropical Birds: Ecology and Conservation. *Ecology, 78*(5), 1613. https://doi.org/10.2307/2266160

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):747-759, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3395



Original article

# Filling gaps in the ornithological knowledge of the south of Serranía de los Yariguíes, Santander, Colombia

## Nuevos aportes al conocimiento ornitológico del sur de la Serranía de los Yariguíes, Santander, Colombia

**Enrique Arbeláez-Cortés[1,*], Sergio A. Barreto-Vargas[1], Laura L. Lozano[1], Dumar R. Márquez-Correa[2], Carlos A. Pinto-Quinche[1], Angélica Rodríguez-Rey[1], Fernando Rondón González[1]**

[1] Escuela de Biología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
[2] Investigador independiente, "La Finca de Dumar", Contratación, Santander, Colombia

## Abstract

Montane forests in the northern section of Colombia's Eastern Cordillera harbor more than 360 bird species, but their knowledge is incomplete. During an expedition to the southern sector of Serran*ía* de los Yariguíes, in the municipality of El Guacamayo, Santander (1,985–2,596 MASL), we recorded 142 bird species using four complementary sampling methods. For 101 species, we obtained supporting audio recordings, and for 54, we secured voucher specimens deposited in the Ornithological Collection of the Natural History Museum at Universidad Industrial de Santander. Photographs and field observations, confirmed by at least two of the authors, added 25 species not recorded by the other two methods. We documented 17 species that represent noteworthy records for the region (e.g., *Ochthoeca cinnamomeiventris*, *Scytalopus rodriguezi*, and *Arremon assimilis*). We present data suggesting reproductive activity in April for at least eight species and describe a nest of *Psarocolius angustifrons* included in the collected series. The collection of museum voucher specimens and associated tissue samples allowed us to analyze the genetic diversity of *Eutoxeres aquila*, *Ocreatus underwoodii*, *Anabacerthia striaticollis*, and *Syndactyla subalaris*, which was low, and we found no differentiation among localities in Santander. Although most of the species recorded during this expedition are largely shared with other montane forests in the region, El Guacamayo in Santander offers an opportunity to observe montane avifauna along a broad altitudinal gradient and within relatively well-preserved ecosystems.

**Keywords:** Andes, biological collections, birds, montane forest, sound recordings.

## Resumen

En los bosques montanos al norte de la cordillera Oriental colombiana viven más de 360 especies de aves, cuyo conocimiento todavía es incompleto. En una expedición al sur de la Serranía de los Yariguíes, en el municipio de El Guacamayo, Santander (1.985 – 2.596 m s.n.m.), registramos 142 especies de aves combinando cuatro métodos de muestreo. Registramos grabaciones de audio de 101 especies y de otras 54 obtuvimos especímenes depositados en la colección ornitológica del Museo de Historia Natural de la Universidad Industrial de Santander. Las fotografías y observaciones, confirmadas al menos por dos de los autores, correspondieron a 25 especies no registradas por los otros dos métodos. Obtuvimos registros de 17 especies notables de la región, entre ellas, *Ochthoeca cinnamomeiventris, Scytalopus rodriguezi* y *Arremon assimilis*. Presentamos datos de por lo menos ocho especies que sugieren actividad reproductiva en abril y describimos un nido de *Psarocolius angustifrons* incluido en la serie recolectada. La recolección de especímenes y las muestras de sus tejidos nos permitieron analizar la diversidad genética de *Eutoxeres aquila*, *Ocreatus underwoodii*, *Anabacerthia striaticollis* y *Syndactyla subalaris*, la cual fue baja; además, registramos diferenciación entre las localidades de Santander. Aunque las especies reportadas en esta expedición se han encontrado en otros bosques montanos de la región, El Guacamayo ofrece la oportunidad de observar la avifauna montana en un amplio gradiente altitudinal y en ecosistemas relativamente bien conservados.

**Palabras clave:** Andes, aves, bosques montanos, colecciones biológicas, grabaciones de audio.

**Citation:** Arbeláez-Cortés E, et al. Filling gaps in the ornithological knowledge of the south of Serranía de los Yariguíes, Santander, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):747-759, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3395

**Editor:** Elizabeth Castañeda

***Corresponding autor:**
Enrique Arbeláez-Cortés;
enriquearbelaez@gmail.com

**Received:** November 7, 2025
**Accepted:** May 7, 2026
**Published on line:** June 30, 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):747-759, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3395

## Introduction

Montane forests of the Tropical Andes harbor the highest levels of species richness worldwide for several avian taxa (**Fjeldsa *et al.***, 2020; **Sonne & Rahbek**, 2024). Particularly notable are the montane forests of Colombia's Eastern Cordillera, which support numerous range-restricted species (**Sánchez-González & Navarro-Sigüenza**, 2009; **Sonne & Rahbek**, 2024). These diversity and endemism patterns have been elucidated mainly through the study of museum voucher specimens collected over more than a century. In the department of Santander, northeastern Colombia (**Figure 1**), ornithological expeditions to montane forests, conducted since 1913, have documented at least 360 species, supported by more than 4,000 museum voucher specimens (**Donegan *et al.***, 2010; **Córdoba-Córdoba & Sierra**, 2018; **Arbeláez-Cortés *et al.***, 2020; **Arbeláez-Cortés *et al.***, 2023; **Barreto-Vargas**, 2024). This rigorous documentation of Santander's montane avifauna encompasses 121 localities across 31 municipalities within the department; however, several montane areas remain ornithologically unexplored (**Barreto-Vargas**, 2024).

Serranía de los Yariguíes, a ridge running parallel to the Eastern Cordillera (**Figure 1**) reaching 3,200 MASL., has been surveyed since the early 2000s to document its avifauna (**Donegan *et al.***, 2007; **Donegan *et al.***, 2010; **Arbeláez-Cortés *et al.***, 2020). Some phenotypically differentiated populations had been described as endemic to this ridge (**Donegan**, 2008; **Donegan & Avendaño**, 2010), but DNA information showed that several species lack genetic differentiation between montane forests on the Eastern Cordillera and Serranía de los Yariguíes (**Arbeláez-Cortés & Trujillo-Arias**, 2021). The ornithological expeditions cited above have been limited to the northern section of this ridge. Additional ornithological expeditions have been conducted in other mountainous areas of southern Santander, but outside Serranía de los Yariguíes (**Córdoba-Córdoba & Sierra**, 2018; **Arbeláez-Cortés *et al.***, 2023; **Gbif.org**, 2023b; **Stiles *et al.***, 2023; **Arbeláez-Cortés *et al.***, 2024). Thus, the montane forests in the southern extreme of Serranía de los Yariguíes represent a substantial gap in ornithological knowledge.

Our aim here was to present the results of an expedition designed to conduct a rigorous avian documentation, *sensu* **Lees *et al.*** (2014), of montane forests in El Guacamayo, a municipality in the southern Serranía de los Yariguíes. We planned to obtain records supported by tangible evidence (museum voucher specimens and audio recordings),

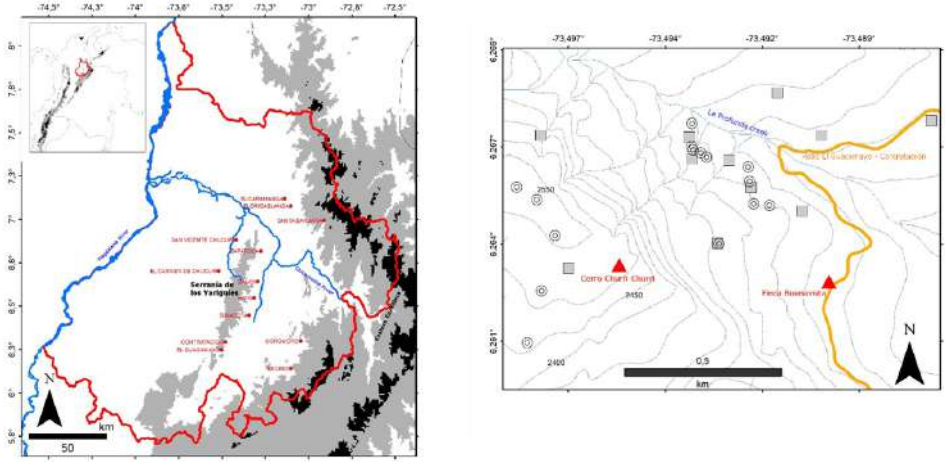



**Figure 1.** Left: Department of Santander, northeastern Colombia (inset). The Serranía de los Yariguíes, the Eastern Cordillera, and some municipalities are indicated. Grey areas are elevations between 2,000 and 3,500 MASL, and black ones are above 3,500 MASL. Right: Study zone of the expedition to El Guacamayo, Santander, Colombia. Red triangles: base camps. Grey squares: mist net stations. Concentric circles: standardized audio-recordings

complemented by field observations. Although a relatively well-preserved montane forest persists near inhabited areas of El Guacamayo, only a few observational records of its avifauna exist (**eBird**, 2025). The collection of biological material during the expedition also enabled the generation of DNA sequences for some species; accordingly, we present the genetic diversity of populations from Serranía de los Yariguíes and the Eastern Cordillera.

## Methods

During the ornithological expedition to El Guacamayo, Santander, Colombia, we established a base camp at Finca Buenavista (6.2628°N -73.4898°W) (**Figure 1**) located along the road connecting the towns of Contratación and El Guacamayo, approximately five hours by vehicle from Bucaramanga. Finca Buenavista comprises secondary forest, apparently regenerating for at least 20 years on former cattle pastures, as well as remnant mature forest on steeper slopes at the base of Cerro Churri Churri (6.2670°N -73.4938°W) and along the banks of La Profunda creek (6.2671°N -73.4899°W) (**Figure 1**). Fieldwork was conducted at these sites from April 8 to May 6. 2024. We established a peripheral campsite at the summit of Cerro Churri Churri (6.2633°N -73.4958°W) (**Figure 1**), 1.5 hours on foot north of the urban center of El Guacamayo. This site is an azonal paramo that is altered in its lower section, but still has dense vegetation at higher elevations, connecting with extensive forests to the North. We surveyed Cerro Churri Churri on April 13–14, 19–20, and 23-24, 2024.

At Finca Buenavista, we established six mist-netting stations between 1,985 and 2,239 MASL., and an additional station at 2,565 MASL. on Cerro Churri Churri (**Figure 1**), as part of our standardized mist-netting protocol. We opened the mist-nets between 05:20 and 06:25 h and closed them between 15:20 and 17:00 h, complementing the standardized mist-netting with two targeting collection sessions using a compressed-air pistol (Crosman 2240; 5.5 mm caliber) in the vicinity of Finca Buenavista. We also included incidental captures in mist nets set for bats at nearby sites and conducted a one-hand capture. Mist-netting and air-gun collecting were conducted between April 9 and 21, 2024. Some captured birds were collected following standardized protocols (**Winker**, 2000; **Engilis *et al.***, 2018) and prepared in the field as museum voucher specimens, recording standard biological data (body mass with a digital scale, gonad size with a caliper, percentage of skull ossification, moult, brood patch, cloacal protuberance, presence of an eye-ring, and colour of the iris, bill, and tarsus). Tissue samples (muscle, heart, and liver) were preserved in 96% ethanol for all voucher specimens. Additionally, several spread wings and at least 30 carcasses were preserved likewise. All tissue samples were cryopreserved in the tissue collection of *Universidad Industrial de Santander* Natural History Museum in Bucaramanga (UIS-CT), after ethanol removal. Specimens were catalogued in the Museum's ornithology collection (UIS-AV) and taxonomically identified *sensu* **Gill *et al.*** (2023). Specimens were collected under the permit authorized by Resolution 994 of the National Environmental Licensing Authority (**ANLA**, 2020), with the approval of the UIS Scientific Research Ethics Committee (**CEINCI**, 2020), and the consent of local landowners. The information on all museum voucher specimens was reported to SIB-Colombia (https://ipt.biodiversidad.co/permisos/resource?r=proyecto_82682_uisav).

We also conducted standardized audio recordings between 05:16 and 06:10 h using a ZOOM H1 recorder mounted on a tripod at a height of 1–1.7 m, pointing toward the densest vegetation. The recordings were obtained at ten sampling points in Finca Buenavista (2,075 - 2,200 MASL.) (**Figure 1**), and lasted 20 minutes each. We also recorded at four other points (2,493 - 2,596 MASL.) on Cerro Churri Churri (**Figure 1**). Besides these standardized recordings, we obtained opportunistic audio recordings using a ZOOM H1 recorder and smartphones. We processed raw recordings with the Audacity software (**Audacity Team**, 2021) by applying a high-pass filter to remove low-frequency noise, peak normalization (set at −3.0 dB), and reducing manual noise through the selection of unwanted sound profiles. We analyzed these processed files using BirdNET-Analyzer v1.2.0 (**Kahl *et al.***, 2021) with the default species model, constraining it to the geographic

coordinates and elevation range of the study area. Key parameter settings included: a confidence threshold = 0.1, sensitivity = 1.2, and evaluation frequency range = 0–15 kHz. We exported BirdNET output as a selection table compatible with Raven Pro 1.6.5 (**Yang**, 2025), providing species identifications, vocalization timestamps, and confidence scores. These selections were overlaid onto spectrograms in Raven for preliminary identifications. We verified the preliminary identifications by comparing them with reference recordings from the Macaulay Library (**Cornell University**, 2025) and Xeno-canto (**Xeno-canto Foundation**, 2021). Observations and photographs were obtained *ad libitum* using 10× 42 binoculars, a Nikon Coolpix P950 camera with integrated optical zoom lens (24–2,000 mm), and smartphones. The expedition species list included all taxa supported by physical or digital evidence (i.e., voucher specimens, audio recordings, or photographs), as well as taxa independently observed and confirmed by at least two of the authors.

Species richness was evaluated using the rarefaction and extrapolation framework of **Chao *et al*.** (2014) implemented in R (**R Core Team**, 2024) through the iNEXT package (**Hsieh *et al*.**, 2016). Analyses were restricted to data from standardized mist-netting and audio recordings; *ad libitum* audio recordings and incidental captures in bat mist nets were excluded. We calculated total abundances per species for each method by summing detections across the entire sampling period, and these abundance vectors were used as input for subsequent analyses. Richness was estimated using the abundance-based approach (Hill number q = 0). Rarefaction and extrapolation curves were generated for both methods, with extrapolation extended to 800 individuals. Asymptotic species richness was estimated using the Chao1 estimator, which incorporates the frequency of rare species to infer undetected diversity. Confidence intervals were calculated using bootstrap resampling as implemented in iNEXT.

To compare mitochondrial DNA (mtDNA) sequences of individuals from the four focal species (see Appendix) collected in El Guacamayo with those from other populations in the montane forests of Serranía de los Yariguíes and the Eastern Cordillera of Santander (additional samples housed at UIS-CT), we extracted genomic DNA from muscle tissue using the EZ-10 Spin Column Genomic DNA Miniprep Kit (BIOBASIC). We amplified the ND2 locus using primers H1056U and L5215U under the following PCR conditions: 0.3 mM dNTPs, 1.5 mM $MgCl_2$, 0.4 mM of each primer, and 0.6 U of Taq polymerase. The thermal cycling protocol consisted of an initial denaturation at 94°C for 1 min, 10 cycles at 94°C for 15 s, 55°C for 30 s, and 72°C for 30 s, followed by 35 cycles at 94°C for 15 s, at 50°C for 30 s, and at 72°C for 30 s, and a final extension at 72°C for 7 min. PCR products were sequenced using the Sanger method. Sequences were aligned in BioEdit (**Hall**, 1999), the genetic diversity ($\pi$) was calculated in DnaSP 6 (**Rozas *et al*.**, 2017), and the haplotype networks were constructed using the Network software (**Polzin & Daneshmand**, 2025).

## Results

After a total sampling effort of 1,260 mist-net hours (1,180 h at Finca Buenavista and 80 h at Cerro Churri Churri), 4.7 hours of standardized audio recordings, two targeting collecting sessions using an air gun, and additional *ad libitum* recordings, observations, and photographs, we documented 142 species representing 34 families and 14 orders during our ornithological expedition to the South of Serranía de Los Yariguies at El Guacamayo, Santander (**Table 1S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3395/5355). The various species were detected by different methods (**Table 1S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3395/5355). We ordered the records according to the level of evidentiary support, beginning with those supported by museum voucher specimens. Standardized mist-netting resulted in the capture of 115 individuals, with a capture rate of 0.07 individuals per mist-net hour at Finca Buenavista and 0.36 individuals per mist-net hour at Cerro Churri Churri. We complemented standardized mist-netting with incidental captures in bat mist nets, air-gun sessions, and manual capture. We collected a total of 121 museum voucher specimens (UIS-AV 3210–3330) representing 54 species (**Table 1S,** https://

raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3395/5355), along with their corresponding tissue samples (UIS-CT 2820–2940). The most frequently represented species in the series were *Henicorhina leucophrys* (n = 11), *Myadestes ralloides* (n = 11), *Mionectes galbinus* (n = 8), *Chlorospingus flavopectus* (n = 7), and *Colibri cyanotus* (n = 5). However, half of the species were represented by a single specimen (**Table 1S**, **Figure 2**).

Out of the 121 voucher specimens, 48 were females and 63 males, while sex could not be determined in 10 specimens. Some specimens exhibited gonad sizes exceeding those recorded in the UIS-AV comparative series for the same taxa collected in other months, suggesting reproductive activity during April. These cases include *Aulacorhynchus albivitta* (UIS-AV-3325, left testis [LT]: 8.4 × 3.4 mm; comparative series mean LT = 6.5 × 2.7 mm in 5 males), *M. ralloides* (UIS-AV-3255, LT: 9.9 × 6.9 mm; series mean LT = 3.1 × 2.7 mm in 12 males), *H. leucophrys* (UIS-AV-3222, ovary [Ova]: 11 × 19 mm; series mean Ova = 4.6 × 2.6 mm in 4 females), and *C. flavopectus* (UIS-AV-3266, LT: 8.35 × 5 mm; series mean LT = 5.7 × 4.4 mm in 3 males). Additionally, individuals of *H. leucophrys* (UIS-AV-3324), *M. galbinus* (UIS-AV-3282), *Premnoplex brunnescens* (UIS-AV-3248), and *Anabacerthia striaticollis* (UIS-AV-3224) exhibited less than 20% skull ossification, indicating the presence of juveniles and suggesting that these taxa were in their breeding season in April. Regarding hummingbirds, which do not ossify their skulls with maturity, no individuals with enlarged gonads were recorded. Nevertheless, the endemic *Coeligena prunellei* was observed carrying nesting material, specifically lichen collected from a rocky wall.

Notably, we collected a female *Psarocolius angustifrons* and a nest (UIS-AV-3289) that were part of a colony (**Figure 3**). The specimen was an adult female (100% skull ossification) with undeveloped gonads (ovary 10 × 6 mm; ovule 2.4 mm) in relation to its body size (total length 40 cm, mass 560 g). The nest, constructed from various plant materials, measured 140 cm in length. The entrance, located at the top of the nest, approximately 38 cm from the attachment point, had a 17 cm perimeter, while the breeding chamber had a 74 cm perimeter. The dry mass of the nest was 530 g. The colony comprised eight nests suspended at approximately 2 m above La Profunda creek, with a spacing of at least 1 m between nests. Although the specimen and the nest were collected at the same site, there was no evidence that the individual was actively attending the nest, which contained no eggs.

We identified 101 species from the audio recordings, 28 of which were also documented by museum voucher specimens (**Table 1S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3395/5355). Our photographic records comprised 34 species (**Table 1S**; **Figure 3**), eight of which were not recorded as specimens or audio. Additionally, at least two authors observed 63 species, 17 of which were recorded exclusively by this method. We documented 58% of species using a single method, 36% two or three methods, and only 6% using every type of recording. Notably, 21 species (15%) were recorded exclusively at Cerro Churri Churri despite the greater sampling effort conducted at Finca Buenavista.

We recorded 85 species using standardized audio records and 42 through standardized mist-netting. However, asymptotic richness estimated using the Chao1 estimator indicated substantially higher values for both methods (**Figure 4**). For audio-recording, the estimated richness was 186 species (95% CI: 122 –249), indicating low sampling completeness and a high proportion of rare species. In contrast, mist-netting showed a smaller difference between observed and estimated richness, with a Chao1 estimate of 52 species (95%CI: 35–69), suggesting comparatively higher inventory completeness.

For the four species analyzed for mtDNA (each represented by voucher specimens from El Guacamayo and other localities in Serranía de los Yariguíes and the Eastern Cordillera in Santander), we obtained ND2 alignments ranging from 458 to 707 bp (**Table 1**) (**Appendix,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3395/5355). Genetic diversity was low across all four species (PI < 0.003, H < 5) (**Table 1**) and approximately

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):747-759, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3395




**Figure 2.** Photographs of some individuals captured and collected in El Guacamayo, Santander, Colombia, during the April–May 2024 expedition to the South of Serranía de los Yariguíes. **A)** *Colibri cyanotus*, **B)** *Boissonneaua flavescens*, **C)** *Malacoptila mystacalis*, **D)** *Hemitriccus granadensis,* **E)** *Thamnophilus unicolor,* **F)** *Premnoplex brunnescens,* **G)** *Synallaxis unirufa*, **H)** *Scytalopus latrans*, **I)** *Henicorhina leucophrys*, **J)** *Myadestes ralloides*, **K)** *Arremon brunneinucha*, **L)** *Diglossa caerulescens*

an order of magnitude lower in the Serranía de los Yariguíes than in the Eastern Cordillera (**Table 1**). Given this limited variation, we were able to construct haplotype networks only for two species (**Figure 5**). In both cases, these networks revealed a common haplotype shared by individuals from multiple localities, along with two to four rare haplotypes restricted to individuals from a single locality.

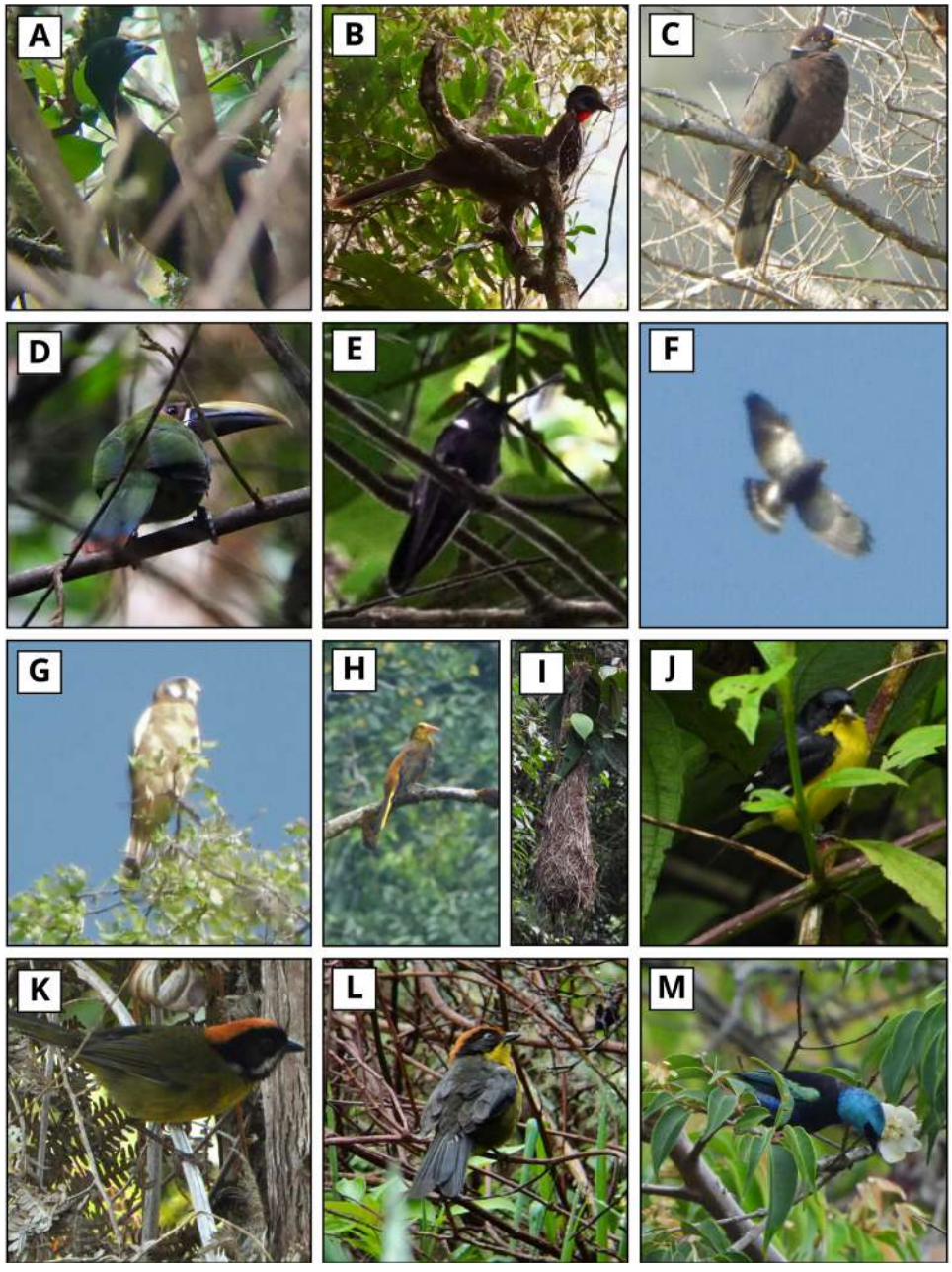



**Figure 3.** Photographs of some individuals not captured in El Guacamayo, Santander, Colombia, during our April–May 2024 expedition to the South of Serranía de los Yariguies corresponding to some species in the region. **A)** *Aburria aburri*, **B)** *Penelope argyrotis*, **C)** *Patagioenas fasciata*, **D)** *Aulacorhynchus albivitta*, **E)** *Coeligena prunellei*, **F)** *Parabuteo leucorrhous*, **G)** *Falco femoralis*, **H)** *Psarocolius angustifrons*, **I)** *Psarocolius angustifrons* (nest), **J)** *Spinus psaltria*, **K)** *Atlapetes albofrenatus*, **L)** *Atlapetes latinuchus*, **M)** *Stilpnia cyanicollis*

## Discussion

In the montane forests of Serranía de los Yariguíes, between the 1,900 and 2,600 m a.s.l. surveyed by our expedition, 222 species had previously been reported (**Donegan *et al.***, 2010; **Gbif.org**, 2023a), 56% of which we also recorded in this study. Based on the Chao1 estimate of 186 species derived from standardized audio records, our combination

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):747-759, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3395

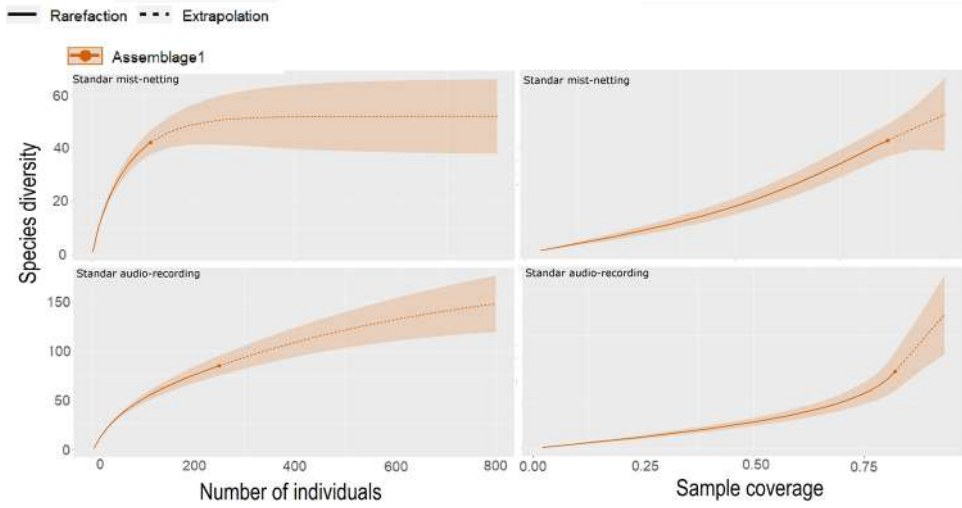



**Figure 4.** Species richness assessed by rarefaction and extrapolation of individuals (left) and for coverage (right) using the two standardized methods to document bird species at El Guacamayo, Santander, Colombia, during the April–May 2024 expedition to the South of Serranía de los Yariguíes

**Table 1.** Genetic diversity (π) of four bird species from montane forests in Santander, Colombia

| Species | N | ND2 aligment | Haplotypes total | π total | π Serranía de los Yariguíes | π Eastern Cordillera |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Eutoxeres aquila* | 6 | 638bp | 1 | 0 | 0 | 0 |
| *Ocreatus underwoodii* | 5 | 573bp | 2 | 0,0007 | 0 | 0,00175 |
| *Anabacerthia striaticollis* | 9 | 707 bp | 5 | 0,00126 | 0,00081 | 0,00284 |
| *Syndactyla subalaris* | 12 | 458 bp | 3 | 0,00126 | 0,00097 | 0,00146 |

of methodological approaches would account for 76% of the species expected to occur within the study area. We also obtained 17 new records for this elevation band (**Table 1S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3395/5355), of which only one, that of *Ochthoeca cinnamomeiventris*, is supported by a museum voucher specimen (AV-3214/ CT-2824), whereas *Spinus psaltria* (**Figure 3J**) is supported by photographic evidence. Most of the new records are supported by audio recordings (see the Xeno-canto catalogue in Appendix 1), including *Scytalopus rodriguezi* (XC1036744), which represents the southernmost record for this Colombian endemic species in Santander. *Phaethornis longirostris* (XC1036740) and *Arremon assimilis* (XC1036728) recordings constitute the first published audio records of these species in Santander. Four other new records are based exclusively on observations, but they correspond to species that are common in the region, such as *Myiozetetes similis*, *Pheugopedius spadix*, *Cinclus leucocephalus*, and *Spinus spinescens*. The scarcity of museum voucher specimens from Serranía de los Yariguíes is underscored by the fact that out of the 51 species collected during our expedition, 29 represent their first material evidence (**Gbif.org**, 2023b) on this ridge (**Table 1**). For the species collected, the nearest previously documented specimen museum vouchers (**Gbif.org,** 2023b) were located between 9 and 137 km from our study site (mean = 46 km), and 76% of the species were recorded within 50 km of their closest known

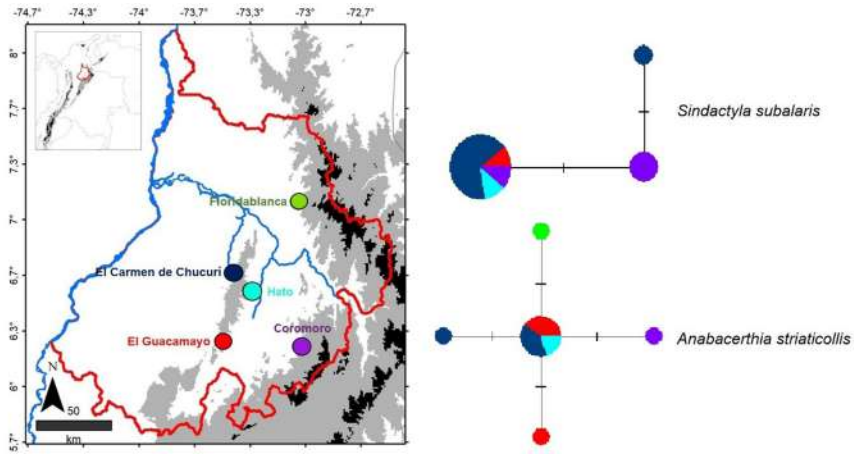



**Figure 5.** Left: Montane forest localities included in mtDNA analyses for four bird species from Santander, Colombia. Grey areas correspond to elevations between 2.00 and 3,500 MASL, and black ones to more than 3,500 MASL. Right: Haplotype networks of the ND2 mtDNA sequences for two bird species collected at El Guacamayo, Santander. Circles: haplotypes and their size correspond to the sampling number. Colors in the networks correspond to the colors for localities in the map.

specimens. Based on eBird (**eBird,** 2021), 13 of the species we recorded had few records in Santander (< 1%) compared to their observations in Colombia, including *Phaethornis syrmatophorus*, *Pharomachrus auriceps*, *Thripadectes virgaticeps*, *Scytalopus latrans*, *Cyclarhis nigrirostris,* and *A. assimilis*. In contrast, more than half of the eBird records of *S. rodriguezi* for Colombia have been obtained in Santander. This information suggests that El Guacamayo may be of particular interest to birdwatchers, both for species that are rarely recorded in Santander or for endemic taxa that occur within this department.

Our results confirmed that multiple survey methods are necessary to adequately document avian diversity in the Neotropics, as these approaches are complementary and no single method detects all species (**Stiles & Roselli**, 1998; **Polanco *et al.***, 2015; **Suárez-García *et al.***, 2017; **Deus *et al.***, 2023). In our study, audio-recordings accounted for the highest proportion of documented species (70%), which is consistent with the range reported in other Neotropical avian surveys (56–72%) (**Arbeláez-Cortés *et al.***, 2023; **Deus *et al.***, 2023). However, the nature of the evidence generated by each method differs, contributing in distinct ways to addressing gaps in ornithological knowledge (**Lees *et al.***, 2020). In this regard, museum voucher specimens constitute the most rigorous and informative form of documentation, as they provide permanent, verifiable records that can directly address multiple knowledge gaps, especially since tissues and carcasses have been preserved in addition to skins.

Although museum voucher specimens represented fewer species than observational and acoustic records, their contribution is unique because of the type of biological information they provide. Under the extended specimen framework in ornithological collections, each specimen is understood as a multidimensional unit of information that can support diverse ecological and evolutionary analyses, including morphological, genomic, and ectoparasite studies, as well as phenological inference (**Webster**, 2017; **Oniki-Willis *et al.***, 2020; **Kapun *et al.***, 2025). In our study, measurements associated with reproductive activity (i.e., gonad size and percentage of skull ossification) during April provided direct biological evidence that is rarely obtained through inventories using only observational or acoustic methods. A national synthesis of avian breeding phenology in Colombia relying on secondary data sources indicated that bird assemblages from mid-elevation regions exhibited a breeding peak in March, while the breeding activity in the Andes was reported to extend from March to June, with an apparent interruption

during April (**Moreno-Palacios *et al.***, 2025). Our results provide primary, specimen-based evidence from particular Andean species in Santander, enabling direct inference of reproductive timing at both population and regional scales, and complement previous breeding information from other montane forest species in this region that has likewise been derived from analyses of museum voucher specimens (**Arbeláez-Cortés *et al.***, 2023). These results highlight the continuing importance of collecting specimens for biological collections as sources of verifiable, high-resolution biological data across spatial and temporal scales.

The material we collected also contributes to addressing the so-called "Darwinian shortfall" (**Lees *et al.***, 2020). Previously published DNA information for eight species from Serranía de los Yariguíes indicated that only *Adelomyia melanogenys* and *Atlapetes albinucha* (**Rocha-Méndez *et al.***, 2018; **Arbeláez-Cortés & Trujillo-Arias**, 2021) show genetic differentiation relative to populations inhabiting other montane forests in the Eastern Cordillera. The data for four additional species presented here further support the general pattern of low genetic differentiation between the montane forests of Serranía de los Yariguíes and those of the Eastern Cordillera, at least south of the Chicamocha River Canyon (**Arbeláez-Cortés & Trujillo-Arias**, 2021). To expand sampling to include additional material of the four focal species from montane forests north of the Chicamocha River Canyon, especially in the municipality of San Andrés, encompassing some of the montane forests closest to the canyon, would be critical to rigorously test for phylogeographic structure across this landscape feature.

Four recent ornithological expeditions to montane forests in Santander (**Córdoba-Córdoba & Sierra**, 2018; **Arbeláez-Cortés *et al.***, 2020; **Arbeláez-Cortés *et al.***, 2023) provide a useful basis for comparison with the avifaunal composition documented at El Guacamayo. Each expedition included more than one week of fieldwork, with a mist-netting effort of over 374 mist-net hours per site, and incorporated at least one additional method also employed in our study (observations or audio recordings). Of the 142 species documented at El Guacamayo (1,985–2,596 m a.s.l.), 55 are also present in Coromoro (2,014–3,121 m a.s.l.), whereas 48 or fewer have been registered in higher elevations at Peñón montane forests (2,390–2,856 m a.s.l.) and Santa Bárbara (2,850 m a.s.l.), or in lower elevation forests within the Serranía de los Yariguies (El Carmen de Chucurí, 1,400–1,850 m a.s.l.). These results suggest that similarity in species composition is more strongly associated with elevational overlap than geographic proximity *per se*.

## Conclusions

In our expedition, the integration of multiple bird-survey methods enabled us to determine that the montane forests south of the Serranía de los Yariguíes, at El Guacamayo, continue to harbour substantial avian diversity. However, the low mist-netting capture rates suggest that the population densities of many species may be relatively low. Nonetheless, the avifauna of this area is comparable, both in species composition and in the genetic diversity of four of the species analyzed, to that of montane forests at similar elevations in the Eastern Cordillera. Our findings help to close a geographic gap in the ornithological knowledge of Santander and broaden our understanding of Serranía de los Yariguíes by providing new material evidence (museum voucher specimens, tissues, and audio-recordings) to support future research. They may also contribute to the promotion of nature-based tourism initiatives in the area. Indeed, our expedition generated audiovisual material to produce a documentary (**Regueros *et al.***, 2024) that will allow a broader audience to become familiar with the region, its biodiversity, and the methods employed to document it.

## Supplementary information

See the supplementary information in https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3395/5355

## Aknowledgments

This work is a product of the project "*Una expedición científica para enfrentar déficits en el conocimiento de la biodiversidad, promoviendo la generación de productos transmedia de divulgación y la evaluación del potencial turístico en una zona de Santander, Colombia*", and we thank the Colombian Ministry of Science, Technology and Innovation for the financial support under the contingent recovery financing contract No. 2022-0721 for project 8289. We also thank Carlos A. Corredor and C. Hernández at Unidades Tecnológicas de Santander and Claudia Regueros at the Universidad Nacional Abierta y a Distancia for their support. Our special thanks to local landowners and authorities for their logistic support.

## Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest of any kind regarding the publication of the results of our work.

## Author contributions

EAC conceived the research idea, designed the study, performed data collection, data analysis, and interpretation, and led manuscript writing. FRG conceived the research idea, designed the study, performed data collection, data analysis and interpretation, and supported manuscript writing. SABV, LLL, DRMC, and CAPQ performed data collection and analysis and supported manuscript writing.

## References

**Arbeláez-Cortés, E., Arenas-Vega, B., Rodríguez-Rey, A., Barreto-Vargas, S. A., Avendaño, J. E.** (2023). Primera expedición ornitológica a Coromoro, Santander, Colombia. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural*, *27*(1), 131-144. https://doi.org/10.17151/bccm.2023.27.1.9

**Arbeláez-Cortés, E., Palencia-Plata, M. A., Pinto-Quinche, C. A., Avendaño, J. E.** (2024). *Colección Ornitológica de la Universidad Industrial de Santander* [Dataset]. Universidad Industrial de Santander. https://doi.org/10.15472/w2sefh

**Arbeláez-Cortés, E. & Trujillo-Arias, N.** (2021). Role of the Chicamocha River Canyon on the phylogeography of humid montane forest birds in Colombia. *Journal of Avian Biology*, *52*(11). https://doi.org/10.1111/jav.02833

**Arbeláez-Cortés, E., Villamizar-Escalante, D., Rondón-González, F.** (2020). On birds of Santander-Bio Expeditions: Quantifying the cost of collecting voucher specimens in Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, *25*(1), 37-60. https://doi.org/10.15446/abc.v25n1.77442

**Audacity Team.** (2021). *Audacity* [Computer software]. https://www.audacityteam.org/

**Barreto-Vargas, S. A.** (2024). *Exploración ornitológica de los bosques montanos de la Cordillera Oriental Santandereana*. [Undergraduate thesis], Universidad Industrial de Santander. https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/5bc32e18-e5b7-4754-a7f3-e2139af1946b/content

**Chao, A. & Jost, L.** (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*, *93*(12), 2533-2547. https://doi.org/10.1890/11-1952.1

**Córdoba-Córdoba, S. & Sierra, S.** (2018). Nuevos registros y ampliación de distribución de aves en la vertiente occidental, Cordillera Oriental, Santander, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, *23*(3), 274-285. https://doi.org/10.15446/abc.v23n3.69008

**Cornell University.** (2025). *Cornell Lab of Ornithology: Macaulay Library* [Website]. https://www.macaulaylibrary.org/

**Deus, F. F. de, Schuchmann, K.-L., Tissiani, A. S. de O., Nogueira, W., Marques, M. I.** (2023). Avian biodiversity assessment studies in a Neotropical wetland: The combination of sampling methods makes the difference. *Papéis Avulsos de Zoologia*, *63*, e202363015. https://doi.org/10.11606/1807-0205/2023.63.015

**Donegan, T. M.** (2008). Geographical variation in Slate-crowned Antpitta *Grallaricula nana*, with two new subspecies from Colombia and Venezuela. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*, *128*(3), 150-170.

**Donegan, T. M., Avendaño, J. E., Briceño-L., E. R., Luna, J. C., Roa, C., Parra, R., Turner, C., Sharp, M., Huertas, B.** (2010). Aves de la Serranía de los Yariguíes y tierras bajas circundantes, Santander, Colombia. *Cotinga, 32*, 72-89.

**Donegan, T. M. & Avendaño, J. E.** (2010). A new subspecies of mountain tanager in the *Anisognathus lacrymosus* complex from the Yariguíes Mountains of Colombia. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*, *130*(1), 13-32.

**Donegan, T. M., Avendaño-C, J. E., Briceño-L, E. R., Huertas, B.** (2007). Range extensions, taxonomic and ecological notes from Serranía de los Yariguíes, Colombia's new national park. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*, *127*(3), 172-213.

**eBird.** (2021). *eBird: An online database of bird distribution and abundance*. Cornell Lab of Ornithology. Retrieved August 15, 2025, from https://www.ebird.org/

**eBird**. (2025). *RN de las aves Procontratación*. Retrieved July 31, 2025, from https://ebird.org/hotspot/L15525693/recent-checklists

**Engilis, A., Engilis, I. E., Paul-Murphy, J.** (2018). Rapid cardiac compression: An effective method of avian euthanasia. *The Condor*, *120*, 617-621. https://doi.org/10.1650/CONDOR-18-35.1

**Fjeldså, J., Christidis, L., Ericson, P. G.** (2020). *The largest avian radiation: The evolution of perching birds, or the order Passeriformes.* Lynx Editions.

**GBIF.org.** (2023a). *Occurrence download "Santander records"* [Dataset]. https://doi.org/10.15468/dl.wq5jfv

**GBIF.org.** (2023b). *Occurrence download "Santander specimens"* [Dataset]. https://doi.org/10.15468/dl.xxafqh

**Gill, F., Donsker, D., Rasmussen, P. E.** (2023). *IOC World Bird List* (Version 13.1) [Dataset]. Retrieved May 30, 2022, from https://www.worldbirdnames.org/

**Hall, T. A.** (1999). BioEdit: A user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series*, *41*, 95-98.

**Hsieh, T. C., Ma, K. H., Chao, A.** (2016). iNEXT: An R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). *Methods in Ecology and Evolution*, 7(12), 1451-1456. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12613

**Kahl, S., Wood, C. M., Eibl, M., Klinck, H.** (2021). BirdNET: A deep learning solution for avian diversity monitoring. *Ecological Informatics*, *61*, 101236. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101236

**Kapun, M., Schwentner, M., Haring, E., Akkari, N., Kroh, A., Kruckenhauser, L., Vohland, K.** (2025). Museomics, the extended specimen and collectomics–how to frame and name the diversity of information linked to specimens in natural history collections. *Natural History Collections and Museomics, 2*, 1-21.

**Lees, A. C., Naka, L. N., Aleixo, A., Cohn-Haft, M., Piacentini, V. de Q., Santos, M. P. D., Silveira, L. F.** (2014). Conducting rigorous avian inventories: Amazonian case studies and a roadmap for improvement. *Revista Brasileira de Ornitologia*, *22*(2), 107-120.

**Lees, A. C., Rosenberg, K. V., Ruiz-Gutierrez, V., Marsden, S., Schulenberg, T. S., Rodewald, A. D.** (2020). A roadmap to identifying and filling shortfalls in Neotropical ornithology. *The Auk*, *137*(4), ukaa048. https://doi.org/10.1093/auk/ukaa048

**Moreno-Palacios, M., Ocampo, D., Echeverry-Galvis, M. A., Gómez, C., Londoño, G. A., Cadena, C. D.** (2025) When do tropical birds breed? The case of Colombian species assemblages, *Ornithology*, *142*(4), ukaf021. https://doi.org/10.1093/ornithology/ukaf021

**Oniki-Willis, Y., Willis, E. O., Vuilleumier, F.** (2020). Ectoparasites on bird specimens: a second look at the untapped value of museum collections. *Atualidades Ornitologicas*, *217*, 4.

**Polanco, J. M., Duque, A. O., Giraldo, D. A., Granada, J. S., Marín, O. H.** (2015). Efectividad de las redes de niebla para determinar la riqueza de aves en un bosque montano de los Andes Centrales (Salento, Quindío, Colombia). *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, *27*(1), 75-88. https://doi.org/10.33975/riuq.vol27n1.28

**Polzin, T. & Daneshmand, S. V.** (2025). *NETWORK 10.2.0.0* (Version 10.2.0.0) [Computer software]. Fluxus Technology Ltd. https://www.fluxus-engineering.com/sharenet_rn.htm

**R Core Team** (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved (June 15, 2024) from https://www.R-project.org/

**Regueros, C. X., Guerrero, C. M., Suárez, L., Rozo, J. A., Villar, D. A.** (2024). *Del Río a la Sierra por la provincia Comunera* [Video]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – CEAD Bucaramanga. https://www.youtube.com/watch?v=30DSvDJsF7o

**Rocha-Méndez, A., Sánchez-González, L. A., Arbeláez-Cortés, E., Navarro-Sigüenza, A. G.** (2018). Phylogeography indicates incomplete genetic divergence among phenotypically differentiated montane forest populations of *Atlapetes albinucha* (Aves, Passerellidae). *ZooKeys*, *809*, 125-148. https://doi.org/10.3897/zookeys.809.28743

**Rozas, J., Ferrer-Mata, A., Sánchez-DelBarrio, J. C., Guirao-Rico, S., Librado, P., Ramos-Onsins, S. E., Sánchez-Gracia, A.** (2017). DnaSP 6: DNA Sequence Polymorphism Analysis of large datasets. *Molecular Biology and Evolution*, *34*, 3299-3302. https://doi.org/10.1093/molbev/msx248

**Sánchez-González, L. A. & Navarro-Sigüenza, A. G.** (2009). History meets ecology: A geographical analysis of ecological restriction in the Neotropical humid montane forests avifaunas. *Diversity and Distributions*, *15*, 1-11. https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00506.x

**Sonne, J. & Rahbek, C.** (2024). Idiosyncratic patterns of local species richness and turnover define global biodiversity hotspots. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *121*(3), e2313106121. https://doi.org/10.1073/pnas.2313106121

**Stiles, F. G. & Roselli, L.** (1998). Inventario de las aves de un bosque altoandino: Comparación de dos métodos. *Caldasia*, *20*(1), 29-43.

**Stiles, F. G., Raz, L., Agudelo, H.** (2023). *Colección Ornitológica del Instituto de Ciencias Naturales (ICN-MHN-Or)* [Dataset]. https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=aves-icn-mhn

**Suárez-García, O., González-García, F., Celis-Murillo, A.** (2017). Entendiendo la complementariedad de dos métodos de muestreo en el estudio de comunidades de aves de un bosque mesófilo de montaña en temporada reproductiva. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *88*(4), 880-887. https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.029

**Webster, M. S.** (Ed.). (2017). *The extended specimen: emerging frontiers in collections-based ornithological research.* CRC Press.

**Winker, K.** (2000). Obtaining, preserving, and preparing bird specimens. *Journal of Field Ornithology*, *71*(2), 197-250. https://doi.org/10.1648/0273-8570-71.2.250

**Xeno-canto Foundation.** (2021). *Xeno-canto: Sharing bird sounds from around the world* [Website]. https://www.xeno-canto.org/

**Yang, K. L.** (2025). *Raven Pro: Interactive Sound Analysis Software* (Version 1.6.5) [Computer software]. The Cornell Lab of Ornithology. https://ravensoundsoftware.com/

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):760-776, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4027



Artículo original

# Evaluación de impacto en áreas de conservación: retos y una herramienta para aplicar análisis contrafactuales

## Impact evaluation in area-based conservation: challenges and an app for conducting counterfactuals in Colombia

**German Forero-Medina[1,*], Felber J. Arroyave[1], Victor J. Rincón-Parra[2], Silvia J. Álvarez[1], Pablo J. Negret[3]**

[1] Wildlife Conservation Society, Cali, Colombia,
[2] Departement de biologie, Universite de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada
[3] Wyss Academy for Nature, Bern, Switzerland; Centre for Development and Environment, University of Bern, Switzerland; Institute of Geography, University of Bern, Switzerland

## Resumen

La evaluación rigurosa del impacto de las estrategias de conservación es clave para identificar qué acciones son más efectivas, promover el aprendizaje adaptativo y orientar una asignación más eficiente de los recursos. No obstante, en la práctica, este tipo de evaluaciones han sido escazas. En este artículo discutimos estos vacíos de conocimiento y presentamos *CONTRAFACTUAL*, una herramienta desarrollada para facilitar la evaluación del impacto de estrategias de conservación basadas en área, como áreas protegidas y OMECs, sobre la reducción de la deforestación. Esta herramienta está basada en análisis contrafactuales usando la metodología de emparejamiento estadístico mediante puntajes de propensión. Permite así comparar unidades espaciales tratadas (e.g., áreas protegidas) con unidades de control con características similares. Usando *CONTRAFACTUAL* analizamos la pérdida de bosque en 23 parques nacionales naturales de Colombia en el año 2024. Encontramos una variabilidad en la efectividad de las áreas protegidas estudiadas para contener la pérdida de bosque (efecto entre –54% y 100%), no obstante, la mayoría de los PNN estudiados presentaron efectos positivos ($\bar{X}$=73,6%; SD=28,9; n=16). Los resultados evidencian la importancia de contextualizar las métricas de pérdida de bosque, y demuestran que los análisis contrafactuales ofrecen un enfoque robusto para comprender y monitorear el impacto de las intervenciones de conservación basadas en área. Con esta propuesta se busca contribuir a cerrar la brecha entre la teoría y la práctica en la evaluación de impacto, proporcionando una herramienta útil para gestores, autoridades ambientales, formuladores de políticas y la sociedad civil, interesados en evaluar y mejorar el desempeño de las áreas de conservación en el país.

**Palabras clave:** Áreas protegidas, Colombia, contrafactual, deforestación, efectividad, Parques Nacionales.

## Abstract

Rigorous impact evaluation of conservation strategies is essential for making informed conservation decisions, improving intervention effectiveness, and allocating resources efficiently. However, in practice, this type of evaluation remains limited, particularly regarding the use of counterfactual methods that enable causal inference. In this article, we discuss current implementation gaps and present *CONTRAFACTUAL*, a practical and accessible tool developed to support the evaluation of area-based conservation strategies, such as protected areas and OECMs, in reducing deforestation in Colombia. This tool is based on a counterfactual analysis approach that uses statistical matching through propensity scores to compare treated spatial units with equivalent control units, correcting for biases resulting from the non-random assignment of interventions. We applied the tool to analyze 23 national parks in Colombia in the year 2024, revealing wide variability in the effectiveness of protected areas in preventing forest loss (effect range: –54% to 100%), with mainly positive effects

**Citación:** Forero-Medina G, et al. Evaluación de impacto en áreas de conservación: retos y una herramienta para aplicar análisis contrafactuales. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):760-776, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4027

**Editor:** Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**
German Forero-Medina;
gforero@wcs.org

**Recibido:** 19 de enero de 2026
**Aceptado:** 2 de junio de 2026
**Publicado en línea:** 8 de julio de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

observed ($\bar{X}$=73,6%; SD=28,9; n=16). The results highlight the importance of contextualizing metrics of forest loss and gain and demonstrate that counterfactual analyses offer a robust approach to understanding and monitoring the true impact of area-based conservation interventions. This initiative seeks to bridge the gap between conservation science and practice, providing a useful resource for land managers, environmental authorities, and policymakers aiming to evaluate and enhance the performance of conservation areas in Colombia.

**Key words:** Protected areas, Colombia, counterfactuals, deforestation, impact evaluation.

## Introducción

Un paso esencial en la práctica de la conservación es la evaluación del impacto de las iniciativas o programas implementados (**Baylis *et al.*,** 2016; **Langhammer *et al.*,** 2024). Los tomadores de decisiones requieren saber cómo determinadas políticas, estrategias o intervenciones inciden sobre el estado de los ecosistemas y su biodiversidad (**Andam *et al.*,** 2008). Además, comprender por qué ciertas acciones tienen menor o mayor éxito es fundamental para diseñar iniciativas cada vez más efectivas e incrementar el retorno de las inversiones en proyectos de conservación (**Baylis *et al.*,** 2016). Sin embargo, la evaluación de los programas de conservación suele limitarse al monitoreo de indicadores de gestión (ej., ejecución de actividades, narrativas de casos de estudio) o de cambio de estado, en lugar de indicadores de impacto mediante análisis empíricos que evalúen los efectos de las intervenciones en comparación con escenarios sin intervención alguna (**Ferraro, 2009**; **Ferraro y Pattanayak,** 2006). Por ello, hay un llamado creciente a incorporar métodos rigurosos que permitan la evaluación sistemática del impacto de las acciones para la conservación (**Ferraro y Pattanayak,** 2006).

El objetivo de la evaluación de impacto es determinar si los cambios observados (resultados) pueden atribuirse a un programa, política o intervención, en lugar de a factores externos (**Ferraro,** 2009). Dicha evaluación se logra estimando el efecto causal de una intervención específica (tratamiento), idealmente mediante un análisis contrafactual; es decir, estimando el resultado que habría ocurrido en ausencia de dicha intervención (**Ferraro y Pattanayak,** 2006; **Ferraro y Pressey,** 2015). Esta evaluación de relaciones de causalidad se puede lograr por medio de diseños experimentales aleatorizados o, cuando las intervenciones no pueden ser asignadas aleatoriamente, por medio de métodos estadísticos adecuados (**Ferraro & Pattanayak,** 2006).

En conservación, realizar las intervenciones bajo un diseño experimental con el uso de grupos control, asignación aleatoria de las unidades experimentales y replicación, puede ser un reto. Existen limitaciones logísticas, financieras y éticas. Las áreas protegidas, por ejemplo, son diseñadas y ubicadas espacialmente de acuerdo con múltiples criterios biológicos y de oportunidad, mas no de forma aleatoria (**Joppa y Pfaff,** 2009). Sin embargo, existen métodos estadísticos que permiten corregir y controlar los efectos de la no aleatorización y moderar los factores de confusión. Estos últimos son variables externas que afectan tanto a la variable independiente como a la dependiente, distorsionando la relación real entre ellas y pudiendo llevar a conclusiones erróneas sobre causalidad (**VanderWeele,** 2019).

Los análisis contrafactuales, como herramienta para evaluar el impacto o la relación causal entre una intervención (tratamiento) y el resultado observado, se utilizan comúnmente en disciplinas como la salud pública y la economía (ej. evaluación de la reducción de la pobreza), pero su adopción en la práctica de la conservación ha sido más lenta (**Baylis *et al.*,** 2016; **Ferraro,** 2009). No obstante, se han aplicado con éxito diseños cuasiexperimentales en la evaluación de la efectividad de las áreas protegidas (APs) para prevenir la deforestación (**Andam *et al.*,** 2008; **Joppa *et al.*,** 2008; **Joppa y Pfaff,** 2011; **Negret *et al.*,** 2020).

Las APs son una de las principales estrategias para conservar la biodiversidad, y en particular para contener la deforestación (**Wolf *et al.*,** 2021). Por lo tanto, es indispensable realizar evaluaciones para entender qué tan efectivas son evitando la pérdida de bosque. Para esto, no es suficiente evaluar la deforestación dentro de un área determinada a lo

largo del tiempo. Es necesario evaluar el escenario contrafactual y responder las siguientes preguntas: ¿cuánto bosque se habría perdido si no existiera el AP?, es decir, ¿cuál fue el efecto del AP en la reducción de la pérdida de bosque? (**Figura 1**). Sin embargo, estimar este efecto es difícil ya que la deforestación evitada no se puede medir de manera directa (**Andam *et al.*,** 2008).

Algunos métodos para estimar la deforestación evitada se basan en la comparación de APs con áreas no protegidas, con escenarios tendenciales, o con una línea base de la región donde se encuentran (**Burivalova *et al.*,** 2019; **Ribas *et al.*,** 2020). No obstante, dado que las APs no están distribuidas aleatoriamente en el espacio y suelen ubicarse en zonas con características particulares, no pueden compararse con cualquier área no protegida. En cambio, deben ser comparadas con un área con características similares. En Colombia, las APs han sido ubicadas lejos de carreteras y en pendientes altas (**Forero-Medina y Joppa,** 2010). Estas condiciones están a su vez asociadas con una baja probabilidad de deforestación, ya que áreas planas y cerca de carreteras tienden a tener mayor riesgo de ser transformadas (**González-González *et al.*,** 2021). De esta forma, los enfoques convencionales para evaluar el impacto de la conservación que no controlan adecuadamente las variables correlacionadas, tanto con la protección como con la deforestación, pueden llevar a sobre o subestimar la deforestación evitada (**Andam *et al.*,** 2008).

Un método cada vez más usado en conservación para evaluar impacto y mejorar la inferencia causal a partir de datos no experimentales es el emparejamiento estadístico ("*statistical matching*") (**Joppa y Pfaff,** 2010; **Schleicher *et al.*,** 2020). Esta técnica identifica unidades de control que se asemejan a las unidades de tratamiento (APs u otras estrategias de conservación basadas en área) según una medida de similitud basada en características medibles predefinidas (covariables) (**Stuart,** 2010). Así, este método emula un diseño experimental al identificar grupos de tratamiento y control con características similares, permitiendo comparar "manzanas con manzanas" (**Rosenbaum y Rubin,** 1983; **Schleicher *et al.***, 2020). Por lo tanto, el emparejamiento estadístico puede ayudar a controlar sesgos de localización y factores de confusión. Aunque este método y otros similares ya han sido utilizados por diversos autores para evaluar el efecto de las APs en la reducción de la deforestación, siempre han sido usados desde una perspectiva académica (**Armenteras *et al.*,** 2009; **Joppa y Pfaff,** 2011; **Joppa y Pfaff,** 2010; **Negret *et al.***, 2020).

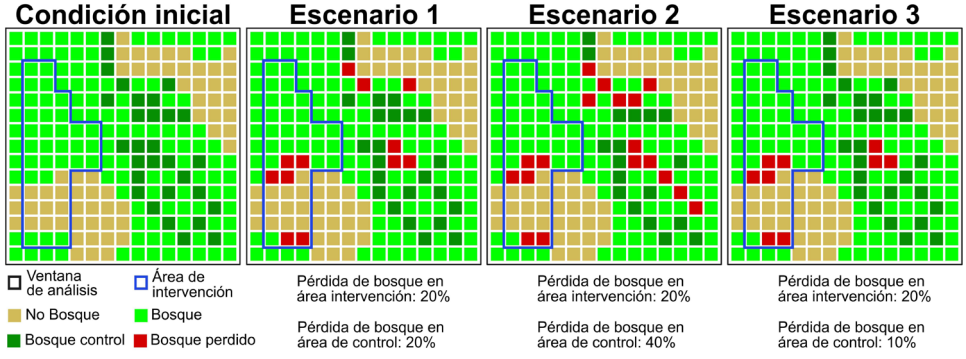



**Figura 1.** Esquema ilustrativo de un área de intervención o tratamiento (azul) en la ventana de análisis (negro), mostrando posibles escenarios de pérdida de bosque. En verde oscuro se señalan los pixeles de bosque seleccionados como control. Cada escenario muestra la pérdida de bosque (rojo) en el área de intervención y el área control, las cuales son comparadas para estimar el efecto del tratamiento (protección). Así, el tratamiento puede tener un efecto positivo (Escenario 2), negativo (Escenario 3) o ningún efecto (Escenario 1) en la reducción de la pérdida de bosque, independientemente del valor de pérdida observada en el área de intervención.

Sin embargo, los gestores de las APs y los tomadores de decisiones también requieren evaluar el efecto de sus áreas sobre la reducción de la deforestación. Esta evaluación es importante para entender cómo se está desempeñando un área particular, en un periodo determinado, considerando las acciones implementadas por el equipo y el contexto particular (**Figura 1**). También permite rediseñar programas existentes, redireccionar esfuerzos de control y vigilancia y, en general, mejorar la efectividad de las estrategias de manejo. No obstante, los tomadores de decisión pueden enfrentar desafíos para implementar este tipo de evaluaciones de impacto.

Los diseños cuasiexperimentales y los métodos como el emparejamiento estadístico, aunque intuitivos, no suelen utilizarse en los programas de evaluación ambiental convencionales ni están disponibles como funciones en paquetes de software comúnmente usados por gestores o tomadores de decisión. Para promover un mayor uso de enfoques contrafactuales y evaluaciones cuantitativas de impacto, es necesario proporcionar herramientas accesibles que permitan implementar estos métodos y contribuir así a cerrar la brecha entre la ciencia y la práctica de la conservación.

Con el fin de promover y facilitar evaluaciones de impacto rigurosas, con un enfoque contrafactual en Colombia, desarrollamos una herramienta llamada *CONTRAFACTUAL*. Esta herramienta permite al usuario, de manera sencilla e intuitiva, comparar unidades espaciales (pixeles) dentro del área de intervención (tratamiento) con unidades espaciales fuera de dicha área (control), seleccionadas con base en características similares (covariables), reduciendo así el sesgo causado por la localización no aleatoria de la intervención y permitiendo comparaciones válidas. La herramienta permite así evaluar el efecto de las estrategias de conservación basadas en área sobre la pérdida o ganancia de bosque.

*CONTRAFACTUAL* está dirigida principalmente a tomadores de decisión que deseen evaluar el impacto de un área protegida o un proyecto de conservación sobre la reducción de la deforestación o cambio neto en la extensión del bosque. También puede ser útil evaluar la reducción de la deforestación en programas de pagos por servicios ecosistémicos. En muchos casos, los gestores suelen enfocarse en medir la deforestación dentro del área del proyecto a lo largo del tiempo. Sin embargo, dicho enfoque no evalúa correctamente el escenario contrafactual, limitando la capacidad de inferir causalidad y entender el efecto real de la intervención (**Figura 1**). Esta herramienta permite superar esta limitación mediante la comparación explícita entre unidades espaciales tratadas y controles equivalentes. Con el fin de ilustrar el uso, tipo de resultados e interpretación de hallazgos derivados de la herramienta, analizamos el efecto de algunas áreas protegidas de Colombia sobre el cambio en la cobertura de bosque durante el año 2024.

## Métodos

La herramienta *CONTRAFACTUAL* se basa en los métodos presentados por **Negret *et al.*** (2020) para evaluar la efectividad de las áreas protegidas en la reducción de la pérdida de bosque. La base teórica es el emparejamiento estadístico de unidades espaciales equivalentes utilizando puntajes de propensión (**Olmos y Govindasamy,** 2015; **Schleicher *et al.***, 2020) (ver paso de emparejamiento a continuación). *CONTRAFACTUAL* es un software libre desarrollado en el lenguaje R, que se ejecuta a través de una aplicación Shiny usando una interfaz intuitiva que no requiere conocimientos previos en programación. Una vez abierta la interfaz, el análisis inicia ingresando el polígono del área de intervención (área de implementación del proyecto o área protegida), siendo esta la única información exógena necesaria para la ejecución de la herramienta. Posteriormente, la herramienta solicitará al usuario seleccionar las covariables a usar para construir el modelo de emparejamiento, y con ello, realizar la cuantificación del efecto del área de estudio en el cambio de la cobertura de bosque. *CONTRAFACTUAL* utiliza el paquete MatchIt (**Ho *et al.*,** 2011) en R (versión 4.2.0) para realizar el emparejamiento estadístico. La herramienta y el documento tutorial de uso, al igual que sus futuras actualizaciones, están disponibles para su descarga en el siguiente vínculo (https://tinyurl.com/contrafactual).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):760-776, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4027

*CONTRAFACTUAL* es compatible con la versión 10 o superior de Windows, pero no requiere instalación, ni tener aplicaciones adicionales preinstaladas en el computador. Una vez descargado, el primer paso es descomprimir y abrir la aplicación Shiny usando el icono del ejecutable. A continuación, se describen algunas consideraciones necesarias previas al uso de la herramienta, seguidas de la serie de pasos necesarios para su ejecución (**Figura 2**).

***Fundamentos de uso de la herramienta CONTRAFACTUAL***

La evaluación de impacto requiere una teoría de cambio clara y un modelo de las vías causales que vinculan una intervención específica con el resultado de interés (**Ferraro y Hanauer,** 2014; **Neugarten *et al.*,** 2025). Por lo tanto, un paso esencial previo a ejecutar la herramienta es comprender el contexto de la intervención y desarrollar dicha teoría de cambio. Los usuarios deben tener una respuesta clara a las siguientes preguntas: ¿cuál es la intervención (tratamiento)? (ej. las acciones de control y vigilancia realizadas en un AP), ¿cuál es la variable respuesta de interés? (ej., cambio en la proporción de bosque, tasa de ganancia de bosque), ¿cuál es el resultado esperado de cada intervención con respecto a las variables respuesta? (cadena de resultados), ¿qué otras intervenciones o tipos de uso del suelo ocurren en el mismo paisaje? ¿además de la intervención, qué variables podrían influir en la pérdida o ganancia de bosque en el área de intervención? Esta información permitirá identificar una pregunta de evaluación clara, y determinar si se puede responder utilizando *CONTRAFACTUAL*.

*Paso 1: Definir área de intervención, ventana de análisis y periodo de evaluación*

La única información que debe ingresar el usuario a la herramienta son los datos vectoriales espacialmente explícitos del área del proyecto, es decir, el área de intervención (tratamiento) (**Figura 2,** panel A). Esta corresponde al polígono que delimita la(s) zona(s) donde se llevaron a cabo las acciones con el propósito de afectar la variable respuesta. Por ejemplo, un área protegida que tiene como objetivo reducir la pérdida de bosque.

En segundo lugar, se define la ventana de análisis, que corresponde a un área sin tratamiento (por ejemplo, no protegida), que circunscribe el área de intervención y de donde se seleccionarán las unidades espaciales que conforman el control. Esta ventana es definida automáticamente por la herramienta, seleccionando los municipios que interceptan el polígono del área de intervención (**Figura 2**). Aunque la herramienta sugiere los municipios que interceptan el polígono, el usuario puede ampliar la ventana de análisis agregando municipios adyacentes. Es importante conocer qué otras figuras o unidades de protección o manejo existen en esta ventana, con el fin de tener claridad sobre aquellas que deben o no ser consideradas como área control (**Schleicher *et al.*,** 2020). Una vez definida la ventana de análisis, la herramienta cargará automáticamente los datos correspondientes de los municipios seleccionados para las variables respuesta y las covariables necesarias para realizar los análisis posteriores.

La herramienta opera utilizando un formato ráster, en el cual los píxeles son las unidades espaciales para el análisis. Todas las variables corresponden a rasters y la variable respuesta, pérdida de bosque, se estima para cada una de las unidades (píxel) del área de intervención (tratamiento) y de control. El tamaño del píxel predeterminado es de 30x30 m, que corresponde a la resolución del ráster de las capas de cambio en la superficie cubierta por bosque natural desarrolladas por IDEAM, la entidad a cargo de estimar las tasas de deforestación oficiales en Colombia (**IDEAM,** 2025). Es importante asegurarse de que el polígono del área de intervención sea lo suficientemente grande para permitir réplicas espaciales, es decir, que contenga un número de pixeles que permita una estimación estadística robusta. Por ejemplo, un área de intervención de tres hectáreas contendrá aproximadamente 30 pixeles, mientras que una de 100 hectáreas tendría 1.100 pixeles. Esta última tendrá un menor margen de error y mayor significancia del resultado estadístico. Tres hectáreas podrían considerarse el tamaño mínimo para la evaluación del efecto de la intervención usando la herramienta.

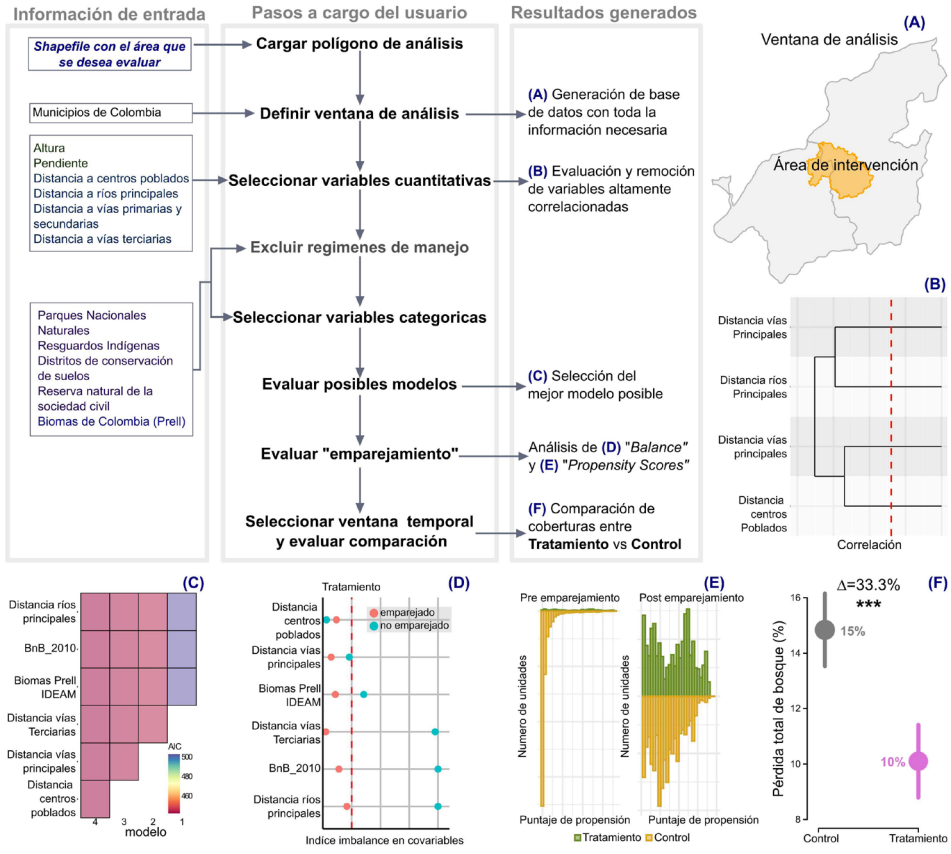



**Figura 2.** Flujo de trabajo de la herramienta *CONTRAFACTUAL*. El *shapefile* del área a evaluar es el único elemento que se debe proporcionar para el análisis. En "Resultados generados" se muestran versiones simplificadas de las gráficas generadas por la herramienta, incluyendo la selección del área de estudio (A), la correlación de las variables cuantitativas (B), la selección del mejor modelo (C), la evaluación del emparejamiento (D-E) y la comparación entre el control y el tratamiento (F).

Seguidamente, el usuario deberá definir el periodo de evaluación para el cual se realizará el análisis contrafactual. Dicho periodo corresponde al intervalo de tiempo en el que se quiere evaluar el efecto del tratamiento. De acuerdo con la disponibilidad de las capas de cambio en la superficie cubierta por bosque natural proporcionadas por el IDEAM, el usuario podrá seleccionar cualquier periodo de tiempo comprendido entre 2013 y 2024 (la herramienta será actualizada a medida que se haga disponible nueva información).

Considerando que el polígono de estudio o la ventana de análisis pueden ser muy grandes (ej. varios cientos de kilómetros cuadrados) y por tanto requerir alta capacidad de almacenamiento (memoria RAM) y tiempos de cómputo muy largos (días e incluso semanas), la herramienta permite al usuario agilizar el proceso mediante el uso de una muestra espacialmente explicita de pixeles. Dicha muestra corresponde a una selección de pixeles distanciados homogéneamente a 120 metros, que corresponde a cerca de un 6.25% del total de pixeles del polígono de estudio. La utilización de la muestra permite reducir el tiempo de cómputo en hasta un 99% sin afectar significativamente los resultados del análisis. A manera de ejemplo, en pruebas realizadas para el Parque Nacional Natural Los Katíos, se evidencia que el resultado obtenido con todo el conjunto de pixeles se encuentra dentro del rango de variación estimado usando solo las muestras (**Figura 1S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362). De esta manera, es posible afirmar que los resultados obtenidos mediante el uso de muestreo homogéneamente

espaciado son representativos de lo que se puede obtener al analizar todo el conjunto de pixeles. Sin embargo, es recomendable limitar el uso de las muestras para casos en los que las capacidades de cómputo sean insuficientes o en caso de que se quieran realizar evaluaciones parciales de forma rápida.

*Paso 2: Selección de covariables*

Las covariables serán utilizadas para identificar las características de los pixeles en el área de intervención (tratamiento) y basado en estas características identificar pixeles similares en la ventana de análisis (pixeles de control) (**Figura 2**). El modelo para el análisis de emparejamiento debe incluir aquellas covariables que pueden influir tanto en la asignación de una unidad espacial al tratamiento como en el resultado de dicho tratamiento sobre la variable respuesta (**Schleicher *et al.***, 2020). Por ejemplo, la elevación puede influir en la ubicación de las áreas protegidas (algunas tienden a ubicarse en áreas altas y empinadas) y también puede afectar la probabilidad de deforestación (**Joppa y Pfaff,** 2009). Es útil elaborar una lista de esas variables, basada en el conocimiento de la región y la teoría de cambio descrita anteriormente, para decidir cuáles incluir en el modelo. Las covariables incluidas en *CONTRAFACTUAL* son tanto cuantitativas como categóricas (**Tabla 1S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362) y se deben seleccionar en pasos independientes en la herramienta. La herramienta de forma automática incluye como una de las covariables la categoría en la capa de cambio del IDEAM correspondiente al año de evaluación, con el fin de emparejar pixeles que correspondían originalmente a bosque o a no bosque entre sí. Es decir, que no se emparejen pixeles de bosque con pixeles sin bosque debido a las otras variables del modelo. Esto busca garantizar también que haya cantidades similares de bosque en el conjunto de pixeles tratamiento y control. Esto debido a que la magnitud de la pérdida de bosque está relacionada con la cantidad de bosque disponible.

Como un paso automático incluido en la herramienta, de las variables seleccionadas se excluyen aquellas altamente correlacionadas, que se identifican mediante pruebas de multicolinealidad (**Figura 2,** panel B). Para ello, *CONTRAFACTUAL* usa coeficientes de inflación y correlación entre las variables y valores de corte, que pueden ser parcialmente ajustados por el usuario.

Las áreas dentro de la ventana de análisis que reflejan otros tipos de estrategias de manejo o gobernanza (APs, territorios indígenas, etc.) pueden ser excluidas, dependiendo del tratamiento que se quiera evaluar. Por ejemplo, al querer evaluar la efectividad de una Reserva Natural de la Sociedad Civil en la reducción de la deforestación, es ideal que en el área control no se encuentren otras Reservas o Parques Nacionales Naturales, pues se podría subestimar el efecto de la reserva objeto del análisis.

*Paso 3: Selección del mejor modelo*

El modelo de regresión logística se utiliza para establecer la relación entre las covariables y la asignación al tratamiento estudiado (en este caso, la protección), es decir, para distinguir los píxeles tratados de los no tratados. Posteriormente, este modelo se usará para calcular los puntajes de propensión, que se usarán para balancear los grupos y reducir sesgos. La herramienta evalúa diferentes posibles modelos de regresión logística mediante el método '*stepwise*' (**Johnsson,** 1992), usando diferentes combinaciones de las variables cuantitativas como variables predictivas y la asignación al tratamiento (binaria) como la variable respuesta. La herramienta selecciona el mejor modelo, dentro de todos los evaluados, usando el Criterio de Información de Akaike (AIC) (**Figura 2,** panel C). Es importante señalar que este paso y los subsecuentes se realizan para cada año incluido en el periodo de evaluación.

*Paso 4: Cálculo y evaluación del emparejamiento estadístico*

*CONTRAFACTUAL* ejecuta el proceso de emparejamiento estadístico utilizando el paquete MatchIt (**Ho *et al.*,** 2011), que estima los puntajes de propensión usando el mejor modelo de regresión logística desarrollado en el paso anterior, para cada año de evaluación. La

estimación de puntajes de propensión es una técnica estadística útil para evaluar los efectos de una intervención cuando se utilizan datos observacionales, o en cualquier caso en el que no sea posible asignar aleatoriamente las unidades a las condiciones de tratamiento por razones operativas (**Olmos y Govindasamy,** 2015; **Rosenbaum y Rubin,** 1983). Estos puntajes se definen como la probabilidad de que una unidad reciba el tratamiento dadas sus características observadas (covariables) (**Olmos y Govindasamy**, 2015). En los datos observacionales, dicha probabilidad es desconocida, pero se estima mediante el modelo de regresión logística que predice la asignación al tratamiento a partir de covariables (**Olmos y Govindasamy,** 2015). De esta forma, el proceso de emparejamiento identifica los pixeles dentro de la ventana de análisis (pixeles control) que, de acuerdo con su combinación de covariables (puntaje de propensión), presentan las características más similares a los pixeles del tratamiento. Así, para cada píxel del tratamiento, el emparejamiento busca el píxel control cuyo valor de propensión sea el más cercano posible (**Olmos y Govindasamy,** 2015). Aunque existen diferentes tipos de emparejamiento utilizando puntajes de propensión, *CONTRAFACTUAL* usa el método de selección uno a uno sin reposición, es decir, para cada píxel del tratamiento se selecciona un píxel control que no podrá ser usado nuevamente en el análisis.

Una vez realizado el emparejamiento, la herramienta permite evaluar su desempeño de dos formas, que comparan qué tan parecidos son los pixeles del tratamiento con los pixeles control antes y después del emparejamiento. Este paso no debe ser confundido con la cuantificación del efecto del tratamiento, que será explicado en el paso 5. La primera forma de evaluación del proceso de emparejamiento es la comparación y revisión del desequilibrio de las covariables entre los conjuntos de pixeles de tratamiento y control (**Olmos y Govindasamy,** 2015). Para esto, la herramienta utiliza la diferencia normalizada (**Imbens y Wooldridge,** 2009), calculando la diferencia entre el conjunto de pixeles control y de tratamiento para cada covariable incluida en el modelo de selección. Los valores absolutos para la diferencia estandarizada que sean superiores al 25% indican un desequilibrio para esa covariable específica (**Stuart y Rubin,** 2008). Aunque es esperable que las covariables se encuentren altamente desequilibradas en la etapa pre-emparejamiento, el desequilibrio de cada una de las covariables en la etapa post-emparejamiento debe ser idealmente reducido y menor del 25% (**Figura 2,** panel D).

La segunda manera en la cual se evalúa qué tan eficiente fue el proceso de emparejamiento es mediante la comparación de las distribuciones de los puntajes de propensión. Es de esperar que en la etapa pre-emparejamiento, la forma como se distribuyen los puntajes de propensión en el conjunto control difiera de la distribución del tratamiento, mientras que dicha diferencia en las distribuciones se debe reducir notablemente en la etapa post-emparejamiento (**Figura 2,** panel E).

El emparejamiento depende de una superposición considerable de los valores de las covariables entre los grupos de tratamiento y control. Si no existe superposición, esto quiere decir que en la ventana de análisis no hay pixeles similares a los del tratamiento, por lo que el emparejamiento no es viable (**Schleicher *et al.***, 2020). Esto se puede evidenciar cuando existe un alto desbalance (>25%) en las diferencias normalizadas post-emparejamiento de cada covariable y en asimetrías significativas en las distribuciones de los puntajes de propensión post-emparejamiento. Aunque es posible corregir parcialmente algunos de estos problemas mediante el uso de ventanas de análisis más amplias, es importante reconocer que el emparejamiento no siempre es una solución universal, sino que debe ser parte de una estrategia integral de evaluación de impacto (**Schleicher *et al.*,** 2020).

*Paso 5: Evaluación de impacto de la intervención (tratamiento)*

Una vez realizado el emparejamiento estadístico que corrija buena parte de los sesgos originados por la distribución no aleatoria de las áreas de análisis, es posible evaluar el efecto de la intervención mediante la comparación de la variable respuesta entre los pixeles tratamiento y control. En *CONTRAFACTUAL*, la variable respuesta (pérdida o ganancia de bosque) se estima a partir de los cambios anuales reportados por el IDEAM y se estima para

cada uno de los años seleccionados dentro del periodo de evaluación. En la versión V.1 de la herramienta *CONTRAFACTUAL* es posible definir periodos de evaluación comprendidos entre 2013 y 2024. A medida que los datos oficiales de cambio en la superficie cubierta por bosque natural en Colombia sean publicados, serán incorporados en siguientes versiones de la herramienta.

El impacto de las intervenciones de conservación estimado por medio de *CONTRAFACTUAL* es resultado de cambios en la cantidad de bosque, y puede ser expresado de tres maneras, la pérdida de bosque, la ganancia de bosque, y el cambio neto de bosque (ganancias menos pérdidas). La pérdida de bosque es medida como la proporción de pixeles que, en un año definido, de acuerdo con el reporte del IDEAM, fueron considerados como deforestación. Para el caso de estimaciones basadas en muestras, el error de dicha estimación es calculado mediante el uso de intervalos de confianza derivados de una distribución binomial. De forma complementaria, la ganancia total de bosque corresponde a la proporción de pixeles que fueron reportados por IDEAM como pasando de ser no bosque a ser bosque regenerado durante el año evaluado. Las estimaciones de las proporciones de pérdida (o ganancia) de bosque y sus errores son realizadas tanto para el conjunto de pixeles tratamiento como para el conjunto control (**Figura 2,** panel F).

Finalmente, se comparan los resultados de pérdida, ganancia o cambio neto entre tratamiento y control mediante el uso de una prueba *z* de comparación de proporciones. El efecto del área de intervención en cada uno de los años evaluados es medido como el cambio (Δ), correspondiente al valor absoluto de la diferencia normalizada de las proporciones entre el tratamiento ($x_1$) y el control ($x_2$), la que es calculada como $100 \times |(x_2 - x_1)/x_2|$ y expresada como porcentaje. Es decir, el porcentaje de reducción o aumento de la variable respuesta en el tratamiento, relativo al control. Con el fin de identificar la dirección del efecto, para el cambio neto de bosque y la ganancia total de bosque, Δ se considera positivo sí $x_1 > x_2$. Para el caso de la pérdida total de bosque, Δ se considera positiva sí $x_1 < x_2$. De esta forma, un efecto Δ positivo implica que el tratamiento aumenta la cantidad de bosque dentro del área de estudio (para el cambio neto de bosque), reduce la deforestación o aumenta la ganancia de bosque, según corresponda. Por tanto, valores positivos de Δ son indicativos de que el área de estudio es efectiva en la protección del bosque.

En el caso de análisis multianuales, para establecer una medida de pérdida o ganancia de bosque, tanto para el tratamiento como para el control, *CONTRAFACTUAL* establece la proporción multianual acumulada como: $1 - (\prod_{i=1}^{n} (1 - p_i)) \times 100$, donde $p_i$ corresponde a la proporción anual estimada para cada uno de los *n* años considerados en el tiempo de evaluación. Con base en dichas proporciones de pérdida o ganancia multianual acumulada, se establece el efecto acumulado en el periodo de evaluación usando la diferencia normalizada entre las proporciones, descrita anteriormente.

***Estudios de caso***

El propósito de los estudios de caso es ilustrar diferentes resultados, basados en ejemplos reales, que se pueden obtener con la herramienta *CONTRAFACTUAL*, y brindar claridad sobre su interpretación. Para esto realizamos un análisis del impacto sobre la reducción de la pérdida de bosque en áreas protegidas del sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN) con cobertura boscosa, en varias regiones del país. En estos casos las variables de respuesta estudiadas son la pérdida de bosque, la ganancia de bosque y el cambio total neto en cobertura de bosque. El área de intervención en cada caso es el polígono del PNN, y se asume que las actividades realizadas dentro de este polígono (control, vigilancia, etc.) buscan evitar y reducir la pérdida de bosque, entre otros objetivos. Así, el análisis busca responder la pregunta ¿Qué habría sucedido si el PNN (la intervención) no existiera?, evaluando la efectividad de cada área en evitar la deforestación.

Los casos se escogieron a partir del análisis de 23 áreas protegidas presentes en diversas regiones del país, que protegen diferentes tipos de ecosistemas boscosos (ej., bosques de tierras bajas, bosques andinos, bosques de galería) (**Tabla 2S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362) y buscan mostrar varios

resultados posibles y su interpretación. La construcción y evaluación de modelos se realizó de forma estandarizada para todas las APs, usando como covariables cuantitativas Pendiente, Distancia a vías principales, Distancia a vías terciarias, Distancia a centros poblados y Distancia a ríos principales (Paso 2 arriba). No obstante, es de notar que no todas ellas fueron usadas en el modelo final de cada parque evaluado, pues para algunos de ellos estas variables estaban correlacionadas y por tanto pudieron ser descartadas. Además, se usó la capa de biomas de Colombia (Biomas IDEAM-Prell) como variable categórica. Con este conjunto de covariables, se realizaron los análisis descritos usando la herramienta *CONTRAFACTUAL* para evaluar el impacto de las APs en los cambios de la cobertura boscosa para el año 2024. Todos los análisis fueron realizados usando la opción de muestreo homogéneo de pixeles a 120 m.

## Resultados

Evaluamos el impacto de 23 parques nacionales naturales en la protección de la cobertura boscosa por medio de la herramienta *CONTRAFACTUAL.* El impacto es presentado únicamente en términos de la pérdida de bosque, puesto que la ganancia anual de bosque en estas áreas, en el periodo analizado de solo un año, fue muy baja o nula. Los tiempos de cómputo oscilaron entre unos minutos (ej. Cueva de los Guácharos) y unas pocas horas (ej. Tinigua), dado el rango de variación en los tamaños de los PNN y las ventanas de análisis.

Para buena parte de los parques estudiados (87%), el emparejamiento logró corregir adecuadamente los desbalances en las covariables entre el tratamiento y el control (**Figura 3, Tabla 2S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362). Sin embargo, para algunas APs, el emparejamiento no resultó en un buen balance de algunas covariables entre el tratamiento y el control (**Tabla 2S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362). Para mejorar este balance y por tanto el emparejamiento, corrimos de nuevo estas APs usando dos ajustes. El primero consistió en ampliar la ventana de análisis para permitir al algoritmo tener más pixeles de búsqueda. El segundo, para el caso de APs con ecosistemas no boscosos, fue recortar estos ecosistemas del polígono de intervención, para evitar que el emparejamiento buscara pixeles similares a pixeles tratamiento que no son bosque. Estos ajustes permitieron mejorar el emparejamiento de las APs Yaigojé Apaporis, Tatamá y Sanquianga (**Figuras 2S-4S, Tabla 2S,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362).

Los resultados muestran una variedad en la magnitud y dirección del efecto de los PNN estudiados sobre la variable respuesta pérdida de bosque (**Figura 3, Tabla S2,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362). El efecto en la pérdida de bosque, estimado para aquellas APs en las que el emparejamiento resultó efectivo y el efecto fue significativo, varió entre –54% (efecto negativo, el AP presenta una mayor pérdida de bosque que el control) y 100% (efecto positivo, reducción total de la pérdida de bosque en comparación al control), siendo en promedio de 73,6% (SD=28,89; n = 16). De acuerdo con esto, de manera general, estas áreas protegidas presentaron efectos positivos de protección, reduciendo la pérdida de bosque (**Figura 3**). Sin embargo, para algunos casos (denotados en gris en la **Figura 3**) el efecto del parque (sea este negativo o positivo) no fue significativo. Ello quiere decir que el cambio en cobertura de bosque en el tratamiento es estadísticamente indistinguible de aquel en el control y se considera entonces que no hay evidencia de un efecto (el PNN ni reduce ni aumenta la deforestación). En los casos de estudio que se presentan a continuación, se describe la forma en que se pueden interpretar los resultados para cada área.

*Estudio de caso 1*

El primer estudio de caso muestra un PNN que reduce la pérdida de bosque y otro que no tiene efecto en esta variable respuesta. Corresponde a los resultados de deforestación en los PNN Farallones de Cali (**Figura 4A**) y Sumapaz (**Figura 4B**) en el año 2024. En cada caso se compara la estimación de la proporción de bosque perdido en el parque (morado) con la

estimación para el área definida como control (gris) por el análisis de emparejamiento. Para el caso del parque Farallones de Cali, se establece que la proporción de bosque perdido fue menor dentro del parque (0.005%) que en el área control (0.028%), indicando que el parque tuvo un efecto positivo, en tanto que redujo la pérdida de bosque. Así, el efecto del parque (Δ) muestra que el parque redujo la pérdida de bosque en un 83% (**Figura 4A**).

En contraste, el parque Sumapaz en el mismo año presenta una mayor pérdida de bosque (0.044%) que su área control correspondiente (0.029%), por lo que el efecto estimado del parque sería negativo (Δ = -53.9%). Sin embargo, dicha diferencia no es estadísticamente significativa, por lo cual se asume que las pérdidas en el control y en el tratamiento son indistinguibles y por tanto no hay evidencia de un efecto del parque sobre la deforestación.

Así, este primer estudio de caso ilustra dos parques que presentan efectos distintos, uno reduciendo la pérdida de bosque (Farallones de Cali con un efecto positivo) y otro sin un efecto en la protección del bosque (diferencia no significativa en la pérdida entre el tratamiento y el control).

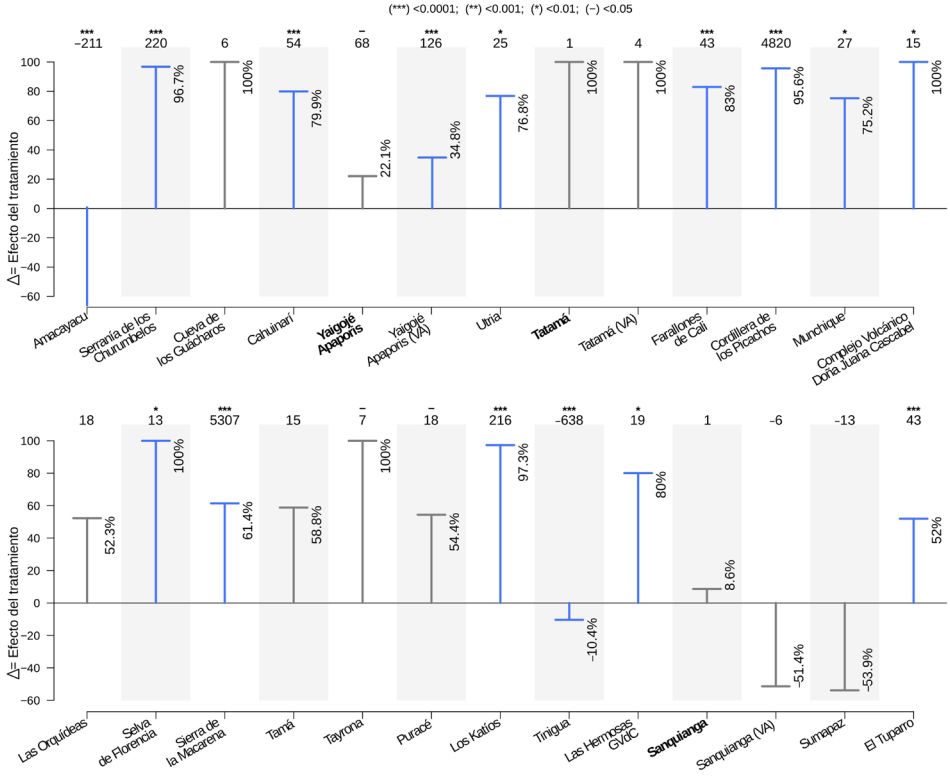



**Figura 3.** Resumen de los análisis contrafactuales de cambio en la cobertura de bosque en 23 PNN en el año 2024. Los PNN se encuentran ordenados de izquierda a derecha de acuerdo con el porcentaje de su extensión de bosque. Para cada uno de los parques se muestra el efecto estimado del parque (Δ) en términos de la pérdida total de bosque. El efecto de cada parque (Δ) se muestra como el porcentaje de cambio respecto al control (ver Métodos). Para los parques indicados en negrilla el emparejamiento estadístico no logró reducir completamente las diferencias entre las covariables del tratamiento y el control. La significancia estadística del efecto del parque (i.e., diferencia entre el control y el tratamiento) se establece mediante una prueba *z* de comparación de proporciones y es mostrada en la parte superior de cada parque usando la notación: (***) <0.0001, (**) <0.001, (*) <0.01, (-) <0.05. Debajo de cada indicativo de significancia se muestra la pérdida de bosque evitada por el parque medida en hectáreas. Valores de efecto (Δ) menores a –60% no se muestran en la figura, pero pueden ser consultados en la Tabla 1S. Los parques a los que les acompaña la sigla VA corresponden a modelos en los que la ventana de observación usada incluye algunos municipios adicionales a los sugeridos por defecto por la herramienta (ver **Figuras 2S-4S**).

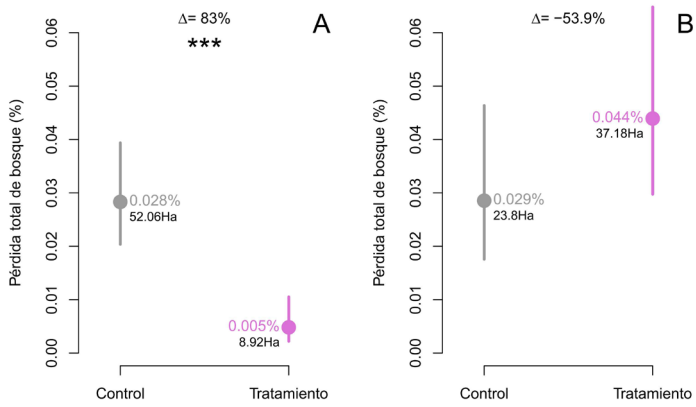



**Figura 4**. Resultados de la pérdida de bosque en 2024 para dos parques nacionales naturales de Colombia, Farallones de Cali (A) y Sumapaz (B). Se muestran los valores de pérdida total de bosque calculados (círculo) y su intervalo de confianza (barra), para el control (gris) y el tratamiento, es decir el área protegida (purpura), así como el equivalente en hectáreas del área de bosque perdida. La diferencia entre el control y el tratamiento, correspondiente al efecto de la intervención en el tratamiento, es expresada como la razón de cambio (Δ). La diferencia estadística entre el control y tratamiento identificada mediante una prueba *z* de comparación de proporciones es indicada usando la notación: (***) <0.0001, (**) <0.001, (*) <0.01, (-) <0.05.

*Estudio de caso 2*

Este caso muestra los resultados de los parques Los Katíos y Ensenada de Utría (**Figura 5**). En este ejemplo dos parques tuvieron porcentajes similares de pérdida de bosque en su interior durante el año 2024 (cercano al 0,014%), pero presentan resultados notablemente diferentes en su efecto de protección. Mientras el efecto de Los Katíos es una reducción en la pérdida total de bosque del 97%, para el parque Utría el efecto es del 77% (**Figura 5**). Ello quiere decir, el efecto del área protegida en controlar la pérdida de bosque es diferente entre las dos áreas, aunque la pérdida proporcional de bosque dentro del área protegida es similar. El parque Los Katíos controla la pérdida de bosque casi en su totalidad evitando que se pierdan 216 hectáreas, mientras Utría logra reducirla en tres cuartas partes (que no es una reducción despreciable y equivalente a 25 hectáreas evitadas). Debido a las condiciones socioambientales de contexto y a la pérdida de bosque esperada para un área equivalente (control), el desempeño de cada parque en la prevención de la deforestación es distinto, a pesar de que pierden una proporción similar de bosque, resultando en que Los Katíos tuvo el mayor efecto protector en comparación con Utría, en el año 2024.

*Estudio de caso 3*

Este caso evalúa la pérdida de bosque en el PNN Tinigua, año a año, durante el periodo 2019 a 2024 (**Figura 6A**). Este es un ejemplo de lo que sería un uso común de la herramienta en un área protegida a lo largo del tiempo. Los resultados indican que, para la mayoría de los años evaluados, exceptuando los años 2021 y 2023, el parque presentó una pérdida total de bosque mayor que el control y por tanto un efecto negativo. En general, la proporción de pérdida de bosque varió entre 4,1% y 0,5%, mientras que el efecto del parque varió entre -72.6% (2019) y 21% (2023). De esta forma, mientras en el 2019 el parque tuvo un exceso de pérdida de bosque, respecto a lo esperado en el control, en el 2023 el parque contuvo cerca de un cuarto de la pérdida esperada de bosque. En el año 2021 la diferencia entre el tratamiento y el control no fue significativa, es decir ese año el parque no tuvo efecto, ni aumentando ni reduciendo la deforestación.

Para el periodo completo de análisis, la pérdida acumulada del parque fue de poco más del 17%, mientras que para el control fue aproximadamente del 14%, lo que corresponde a un efecto acumulado del parque de un -26% (**Figura 6B**). Esto es, el parque presentó una

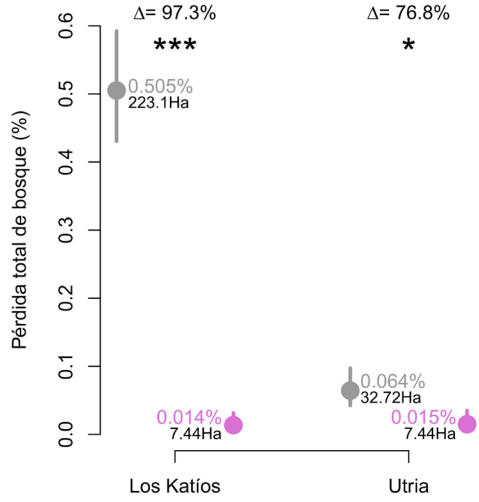



**Figura 5**. Resultados de la pérdida de bosque en 2024 para dos parques nacionales naturales de Colombia, Los Katíos y Utria. Se muestran los valores de pérdida total de bosque calculados (círculo) y su intervalo de confianza (barra), para el control (gris) y el tratamiento (purpura), así como el equivalente en hectáreas del área de bosque pérdida en el tratamiento y el control. La diferencia entre el control y el tratamiento, correspondiente al efecto de la intervención en el tratamiento, es expresado como el porcentaje de cambio (Δ). La diferencia estadística entre el control y tratamiento identificada mediante una prueba *z* de comparación de proporciones es indicada sobre el tratamiento usando la notación: (***) <0.0001, (**) <0.001, (*) <0.01, (-) <0.05.

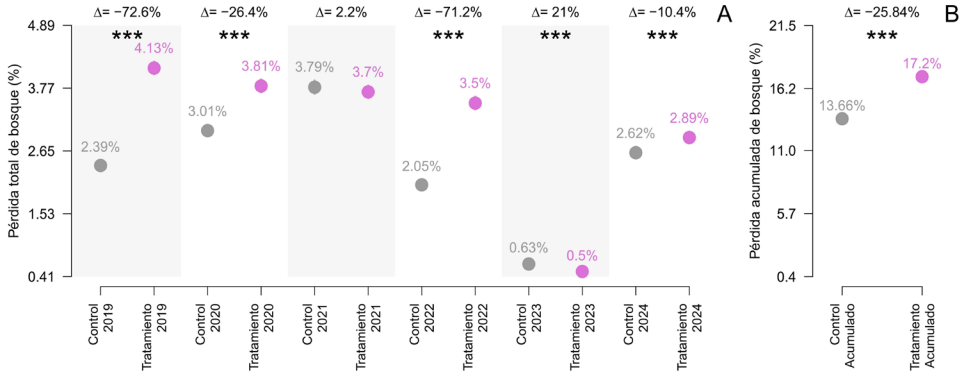



**Figura 6**. Resultados del análisis contrafactual para el parque nacional natural Tinigua para el periodo 2019 – 2024, indicando el efecto año a año (A) y el efecto acumulado para todo el periodo (B). Se muestran los valores de pérdida total de bosque estimados (círculo) y su intervalo de confianza (barra), para el control (gris) y el tratamiento (purpura). La diferencia entre el control y el tratamiento, correspondiente al efecto de la intervención en el tratamiento, expresado como la razón de cambio (Δ). La diferencia estadística entre el control y tratamiento identificada mediante una prueba *z* de comparación de proporciones es indicada sobre el tratamiento usando la notación: (***) <0.0001, (**) <0.001, (*) <0.01, (-) <0.05.

pérdida de bosque mayor a la pérdida presentada por el control. Así, para el periodo de análisis, el parque Tinigua en vez de contener la deforestación, parece ser un atractor de ésta en la región, aunque dicha condición ha variado en el tiempo. Es importante notar que para el caso del parque Tinigua, los municipios que intersecan al parque y que configuran la ventana de análisis también contienen parte del parque Serranía de la Macarena. Por ello, para el análisis del parque Tinigua, el parque Serranía de la Macarena fue excluido de la ventana de observación con el fin de evitar sobreestimaciones del efecto del parque Tinigua.

## Discusión

La herramienta *CONTRAFACTUAL* permitió el análisis de los patrones de pérdida de bosque en diferentes APs de Colombia y la evaluación del impacto de cada área en la conservación de dichos bosques. El ejercicio muestra la importancia de analizar cada AP de manera individual y de escoger muy bien las covariables a ser usadas en el emparejamiento, es decir, las covariables que pueden estar relacionadas con la probabilidad de deforestación en la región. Era de esperarse que no todos los emparejamientos quedaran bien balanceados al inicio, pues se hicieron de forma estandarizada, usando las mismas covariables para todas las áreas. En la práctica, al usar CONTRAFACTUAL, el usuario deberá seleccionar muy bien las variables que son relevantes en su caso, ya que incluir variables que no sean relevantes puede forzar el modelo a encontrar pixeles parecidos en esas variables, sacrificando las variables más importantes. Es decir, lo esencial es lograr balancear aquellas variables que han sido priorizadas previamente.

Los ajustes realizados, ampliar la ventana de análisis y recortar los ecosistemas no boscosos, permitieron mejorar el emparejamiento de algunas APs. En versiones futuras de la herramienta, también se podría usar un umbral de corte en las diferencias entre los valores de propensión de cada pixel de control y tratamiento (*caliper*). Esto para forzar a que el emparejamiento solo sea posible cuando haya una similitud suficiente entre los valores de propensión del pixel de control y el del tratamiento, y en el caso donde esto no sea posible, ese pixel se descarte del análisis de emparejamiento. Otra alternativa es que después del análisis de emparejamiento también se pueden remover sistemáticamente los pixeles emparejados que tengan la diferencia más alta entre los puntajes de propensión hasta que el desbalance entre las variables sea menor a 25%. Sin embargo, esto implica reducir el número de pixeles analizados. Considerando que, en muchos casos, por tiempos computacionales, se usa la opción de muestreo, que disminuye considerablemente el número de pixeles, estas alternativas deben ser estudiadas y probadas primero, para entender los posibles efectos en los resultados.

Por otro lado, hay casos en los que un modelo imperfecto o levemente desbalanceado es el mejor resultado posible, lo que no quiere decir que no sea informativo. También debe considerarse que puede haber casos en que un área de intervención sea tan particular en sus características, que no sea posible encontrar un control exacto.

Los resultados mostraron que la mayoría de las áreas protegidas tuvieron un efecto positivo en la reducción de la deforestación, conteniendo la pérdida de bosque en comparación con escenarios contrafactuales, mientras que algunas pocas, como el PNN Tinigua, tuvieron un efecto negativo, perdiendo más bosque de lo esperado en comparación con áreas no protegidas similares. De esta forma, la magnitud y dirección del efecto protector de los Parques Nacionales Naturales estudiados fue diverso y contexto-dependiente. Otros estudios cuantitativos previos han demostrado que en Colombia las áreas protegidas y otros sistemas de gobernanza como los resguardos indígenas y los territorios colectivos tienen un efecto en la reducción de la deforestación, pero este efecto varía entre regiones y entre áreas, de acuerdo con múltiples factores (**Armenteras *et al.*,** 2009; **Negret *et al.***, 2020; **Vélez *et al.***, 2020). Por esto, la evaluación y comprensión del efecto de cada área, de manera individual, es necesaria para entender los factores que la hacen más efectiva en un periodo determinado y tomar decisiones sobre su manejo. La herramienta *CONTRAFACTUAL* busca proporcionar la posibilidad de hacer un análisis de efectividad en áreas protegidas o programas de conservación basados en área, usando información oficial de alta resolución, de una manera práctica y útil para tomadores de decisiones.

Es importante resaltar que los resultados de cada análisis son exclusivos al período de tiempo estudiado. Como se mostró para el parque Tinigua, un área protegida puede tener un efecto en un período determinado y, por distintos factores, tener un efecto diferente en un período distinto (ej. cambios en capacidad operativa, aumento o reducción de capacidad de control, variaciones en la tasa de deforestación de la región donde se encuentra). Los análisis con escenarios contrafactuales permiten entender estas dinámicas temporales

particulares. El seguimiento de cada AP a lo largo del tiempo permite al tomador de decisiones o al encargado del área evaluar el impacto de las acciones implementadas en un periodo determinado, entender los factores asociados a los resultados en dicho periodo, y así planificar las respuestas necesarias con relación al manejo del área.

Los análisis contrafactuales realizados con esta herramienta permiten también superar una limitación común de muchos indicadores de efectividad en APs, que usualmente evalúan el cumplimiento de objetivos de gestión, más no el impacto real sobre la conservación de la biodiversidad (**Boitani *et al.*,** 2008). Inclusive estos estimativos de efectividad basados en contrafactuales podrían complementar indicadores globales como PAME (Efectividad del Manejo de Áreas Protegidas) y MEPCA (Efectividad del Manejo de Áreas Protegidas y OECM), vinculados a la Meta 3 del Marco Mundial de Biodiversidad de Kunming-Montreal (**CBD,** 2022) que, si bien se orientan a evaluar la efectividad del manejo, no cuentan con una herramienta o metodología estandarizada de reporte y monitoreo del impacto. Esto ha llevado a que muchos países informen principalmente sobre procesos e insumos de gestión (por ejemplo, inversión o ampliación de áreas) o extensión del área protegida en el país, en lugar de resultados basados en impactos causales sobre la biodiversidad.

En este sentido, el enfoque contrafactual que incorpora esta herramienta proporciona a los tomadores de decisión una alternativa práctica y rigurosa para demostrar la efectividad (entendida como el impacto) en la conservación de bosques. Adicionalmente, ayuda a orientar mejor la administración de sus áreas y justificar su contribución al cumplimiento de metas de conservación en distintas escalas. La evidencia generada también facilita el monitoreo estandarizado en áreas de diversos tamaños y contextos, así como la movilización de recursos financieros para fortalecer y escalar las estrategias de conservación. Finalmente, la herramienta también es útil para el rol de la sociedad civil como veedor de la inversión pública en la conservación de la biodiversidad, permitiendo una evaluación objetiva del impacto de las áreas protegidas.

## Conclusiones y perspectivas

El análisis de efectividad de un área de conservación debe ser realizado acorde a los objetivos y metas trazadas para el área. La evaluación de impacto derivada de la aplicación *CONTRAFACTUAL* es útil para evaluar el efecto de un área de conservación u otras estrategias basada en área en la protección del bosque. Reconocemos que existen otros objetivos y metas particulares en las APs, distintas a la conservación del bosque, que están más allá del alcance de esta herramienta y deberán ser evaluadas con otros métodos, idealmente con aproximaciones contrafactuales pertinentes.

La herramienta ha sido diseñada específicamente para Colombia, para facilitar su uso minimizando el pre-procesamiento de los datos en sistemas de información geográfica (SIG), utilizando información oficial para el país, y será actualizada a medida que dicha información sea disponible. En su primera versión la herramienta se basa en emparejamiento estadístico usando puntajes de propensión. En futuras versiones de la herramienta se podrán incluir opciones adicionales para reducir el efecto de la autocorrelación espacial, reducir la carga computacional y otras opciones analíticas.

Esperamos que el uso de *CONTRAFACTUAL* estimule la aplicación de evaluaciones rigurosas de impacto en ejercicios de conservación en el país, y que incentive la comprensión y el aprendizaje sobre los métodos contrafactuales. De esta forma, avanzar en la identificación de las estrategias que funcionan mejor en determinados contextos y con ello, contribuir a fortalecer las capacidades analíticas de organizaciones públicas y privadas involucradas en el desarrollo de proyectos de conservación basados en área.

## Información Suplementaria

El Manual de uso de la herramienta se encuentra disponible **aquí** y los demás materiales en Información Suplementaria, https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4027/5362.

## Datos y código

La herramienta completa está disponible **aquí**. El código fuente para los diferentes subanálisis que componen el análisis contrafactual, así como el código de la Shiny app está disponible **aquí**.

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado y apoyado por Wildlife Conservation Society, Bezos Earth Fund, Wyss Academy for Nature y Ecopetrol S.A a través del Proyecto Vida Silvestre.

## Contribución de los autores

**GFM, PJN, FJA, VJR**: participaron en la concepción del estudio, el diseño metodológico y la redacción inicial del manuscrito; **GFM, PJN, FJA, VJR, SJA**: contribuyeron al desarrollo del marco analítico, el análisis de resultados y la revisión crítica del texto y aportaron a la interpretación de los resultados, la discusión y la edición final del manuscrito. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final enviada a la revista.

## Conflicto de Interés

Los autores no poseen ningún conflicto de interés que pueda influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación.

## Referencias

**Andam, K. S., Ferraro, P. J., Pfaff, A., Sanchez-Azofeifa, G. A., Robalino, J. A.** (2008). Measuring the effectiveness of protected area networks in reducing deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*(42), 16089-16094. https://doi.org/10.1073/pnas.0800437105

**Armenteras, D., Rodríguez, N., Retana, J.** (2009). Are conservation strategies effective in avoiding the deforestation of the Colombian Guyana Shield? *Biological Conservation*, *142*(7), 1411-1419. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.002

**Baylis, K., Honey-Rosés, J., Börner, J., Corbera, E., Ezzine-de-Blas, D., Ferraro, P. J., Lapeyre, R., Persson, U. M., Pfaff, A., Wunder, S.** (2016). Mainstreaming Impact Evaluation in Nature Conservation. *Conservation Letters*, *9*(1), 58-64. https://doi.org/10.1111/conl.12180

**Boitani, L., Cowling, R. M., Dublin, H. T., Mace, G. M., Parrish, J., Possingham, H. P., Pressey, R. L., Rondinini, C., Wilson, K. A.** (2008). Change the IUCN protected area categories to reflect biodiversity outcomes. In *PLoS Biology* (Vol. 6, Issue 3, pp. 0436-0438). https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060066

**Burivalova, Z., Miteva, D., Salafsky, N., Butler, R. A., Wilcove, D. S.** (2019). Evidence Types and Trends in Tropical Forest Conservation Literature. *Trends in Ecology & Evolution*, *34*(7), 669-679. https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.03.002

**Convention on Biological Diversity (CBD).** (2022). *Kunming–Montreal Global Biodiversity Framework*. CBD/COP/15/L.25. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Canada. Recuperado el 10 de octubre de 2025 de https://www.cbd.int/gbf

**Ferraro, P. J.** (2009). Counterfactual thinking and impact evaluation in environmental policy. In M. Birnbaum & P. Mickwitz (Eds.), *Environmental program and policy evaluation: Addressing methodological challenges. New Directions for Evaluation* (Vol. 122, pp. 75-84). https://doi.org/10.1002/ev

**Ferraro, P. J., Hanauer, M. M.** (2014). Advances in measuring the environmental and social impacts of environmental programs. In *Annual Review of Environment and Resources* (Vol. 39, pp. 495-517). Annual Reviews Inc. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101813-013230

**Ferraro, P. J., Pattanayak, S. K.** (2006). Money for nothing? A call for empirical evaluation of biodiversity conservation investments. *PLoS Biology*, *4*(4), 482-488. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040105

**Ferraro, P. J., Pressey, R. L.** (2015). Measuring the difference made by conservation initiatives: Protected areas and their environmental and social impacts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *370*(1681). https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0270

**Forero-Medina, G., Joppa, L.** (2010). Representation of global and national conservation priorities by Colombia's protected area network. *PLoS ONE*, *5*(10), 1-11. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013210

**González-González, A., Villegas, J. C., Clerici, N., Salazar, J. F.** (2021). Spatial-temporal dynamics of deforestation and its drivers indicate need for locally-adapted environmental governance in Colombia. *Ecological Indicators*, *126*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107695

**Ho, D. E., Imai, K., King, G., Stuart, E. A.** (2011). MatchIt: Nonparametric Preprocessing for Parametric Causal Inference. In *JSS Journal of Statistical Software* (Vol. 42). http://www.jstatsoft.org/

**IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).** (2025). Resultados Monitoreo de Bosques. Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono, Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental, IDEAM, Colombia. Recuperado el 15 de noviembre de 2025 de https://www.ideam.gov.co/transparencia/datos-abiertos/seccion-de-datos-abiertos/resultados-monitoreo-de-bosques

**Imbens, G. W., Wooldridge, J. M.** (2009). Recent developments in the econometrics of program evaluation. *Journal of Economic Literature*, *47*(1), 5-86. https://doi.org/10.1257/jel.47.1.5

**Johnsson, T.** (1992). A procedure for stepwise regression analysis. *Statistical Papers*, *33*, 21-29.

**Joppa, L. N., Loarie, S. R., Pimm, S. L.** (2008). On the protection of "protected areas." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*(18), 6673-6678. https://doi.org/10.1073/pnas.0802471105

**Joppa, L. N., Pfaff, A.** (2009). High and far: Biases in the location of protected areas. *PLoS ONE*, *4*(12). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008273

**Joppa, L. N., Pfaff, A.** (2011). Global protected area impacts. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *278*(1712), 1633-1638. https://doi.org/10.1098/rspb.2010.1713

**Joppa, L., Pfaff, A.** (2010). Reassessing the forest impacts of protection: The challenge of nonrandom location and a corrective method. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1185*(January 2010), 135-149. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05162.x

**Langhammer, P. F., Bull, J. W., Bicknell, J. E., Oakley, J. L., Brown, M. H., Bruford, M. W., Butchart, S. H. M., Carr, J. A., Church, D., Cooney, R., Cutajar, S., Foden, W., Foster, M. N., Gascon, C., Geldmann, J., Genovesi, P., Hoffmann, M., Howard-McCombe, J., Lewis, T., … Brooks, T. M.** (2024). The positive impact of conservation action. *Science*, *384*(6694), 453-458. https://doi.org/10.1126/science.adj6598

**Negret, P. J., Di-Marco, M., Sonter, L. J., Rhodes, J., Possingham, H. P., Maron, M.** (2020). Efffects of spatial autocorrelation and sampling design on estimates of protected area effectiveness. *Conservation Biology*. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/cobi.13522

**Neugarten, R., Rodewald, A., Eklund, J., O'Garra, T.** (2025). An introduction to impact evaluation for conservation. In *Conservation Science and Practice* (Vol. 7, Issue 11). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1111/csp2.70169

**Olmos, A., Govindasamy, P.** (2015). Propensity Scores: A Practical Introduction Using R. In *Journal of MultiDisciplinary Evaluation* (Vol. 11). http://www.jmde.com

**Ribas, L. G. dos S., Pressey, R. L., Loyola, R., Bini, L. M.** (2020). A global comparative analysis of impact evaluation methods in estimating the effectiveness of protected areas. In *Biological Conservation* (Vol. 246). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108595

**Rosenbaum, P. R., Rubin, D. B.** (1983). The Central Role of the Propensity Score in Observational Studies for Causal Effects. In *Biometrika* (Vol. 70, Issue 1).

**Schleicher, J., Eklund, J., D. Barnes, M., Geldmann, J., Oldekop, J. A., Jones, J. P. G.** (2020). Statistical matching for conservation science. *Conservation Biology*, *34*(3), 538-549. https://doi.org/10.1111/cobi.13448

**Stuart, E. A.** (2010). Matching methods for causal inference: A review and a look forward. In *Statistical Science* (Vol. 25, Issue 1, pp. 1-21). https://doi.org/10.1214/09-STS313

**Stuart, E. A., Rubin, D. B.** (2008). Matching with multiple control groups with adjustment for group differences. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, *33*(3), 279-306. https://doi.org/10.3102/1076998607306078

**VanderWeele, T. J.** (2019). Principles of confounder selection. *European Journal of Epidemiology*, *34*(3), 211-219. https://doi.org/10.1007/s10654-019-00494-6

**Vélez, M. A., Robalino, J., Cardenas, J. C., Paz, A., Pacay, E.** (2020). Is collective titling enough to protect forests? Evidence from Afro-descendant communities in the Colombian Pacific region. *World Development*, *128*. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104837

**Wolf, C., Levi, T., Ripple, W. J., Zárrate-Charry, D. A., Betts, M. G.** (2021). A forest loss report card for the world's protected areas. *Nature Ecology & Evolution*, *5*(4), 520-529. https://doi.org/10.1038/s41559-021-01389-0

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):777-789, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3596



Artículo original

# Composición y distribución vertical de epífitas vasculares, no vasculares y líquenes en el bosque El Mangón, Cauca, Colombia

## Composition and vertical distribution of vascular and non-vascular epiphytes, and lichens in "El Mangón" forest, Cauca, Colombia

**Luis Eduardo López-V[1,2,*], Diego Jesús Macias-Pinto[1,3], Yenni Paola Samboni-Ceballos[4], Daniela Velasco[5], Jhoy Fleming Córdoba-Calvo[3]**

[1] Grupo de estudios sobre diversidad vegetal SACHAWAIRA, Grupo Etnobotánico Latinoamericano GELA, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia
[2] Doctorado en Etnobiología y Estudios Bioculturales, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia
[3] Doctorado en Ciencias Ambientales, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia
[4] Maestría en Educación Sostenible y Gestión Ambiental Territorial, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia
[5] Departamento de Biología, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia

## Resumen

Se evaluó la composición florística y la distribución vertical de epífitas, así como la relación entre la altura y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de los forófitos y la riqueza de estas especies. El análisis de diversidad se hizo mediante los índices de Shannon-Wiener y Simpson. Se muestreó un área total de 24 hectáreas, con 71 forófitos (36 en el borde o exterior del bosque y 35 en el interior del remanente). La abundancia de epífitas vasculares se estimó por conteo de individuos y la de las no vasculares mediante el área de cobertura proyectada (cm²). Se registraron 123 especies de epífitas distribuidas en 92 géneros, 50 familias y 28 órdenes. Los musgos (Bryophyta) fueron el grupo más diverso, con 47 especies, seguidos por los hongos liquenizados (Ascomycota) con 28 y las angiospermas con 23. Las epífitas no vasculares representaron el 65,9 % de la abundancia total, siendo la familia Bryaceae la de mayor riqueza, con siete especies, seguida por Hypnaceae, Dicranaceae y Orthotrichaceae, con cinco especies cada una. Entre las epífitas vasculares (10.074 individuos), la familia Orchidaceae fue dominante, con especies como *Lepanthes tracheia* (623 individuos) y *Epidendrum melinanthum* (619 individuos). Los índices de diversidad indicaron una diversidad media (D>0,79). La estratificación vertical mostró diferencias significativas, con mayor abundancia en el tronco. La especie del forófito explicó el 58 % de la variación en la composición de epífitas, destacándose *Lacistema aggregatum, Myrsine guianensis* y *Aiouea montana* como los hospederos más diversos. Las recolecciones se hicieron en el marco de un trabajo de grado (Res. 1053/2022, Universidad del Cauca) amparado por el permiso marco de la ANLA No. 001040/2025. Este trabajo es el primer registro cuantitativo de epífitas vasculares y no vasculares en un bosque subandino del Cauca.

**Palabras clave:** briofitas; diversidad; epífitas vasculares; forófitos; líquenes; bosque subandino.

## Abstract

We evaluated the floristic composition and vertical distribution of epiphytes, as well as the relationship between phorophyte height and diameter at breast height (DBH) and the richness of these species. Diversity was analyzed using the Shannon–Wiener and Simpson indices. A total area of 24 ha was sampled, including 71 phorophytes, of which 36 were located at the forest edge or exterior and 35 in the interior of the remnant. The abundance of vascular epiphytes was estimated by counting individuals, whereas non-vascular epiphytes were quantified through projected cover area (cm²). We recorded 123 epiphyte species across 92 genera, 50 families, and 28 orders. Mosses (Bryophyta)

**Citación:** López-V LE, et al. Composición y distribución vertical de epífitas vasculares, no vasculares y líquenes en el bosque El Mangón, Cauca, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):777-789, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3596

**Editor:** Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**
Luis Eduardo López-V;
lelopez@unicauca.edu.co

**Recibido:** 24 de noviembre de 2025
**Aceptado:** 23 de junio de 2026
**Publicado en línea:** 21 de julio de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):777-789, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3596

were the most diverse group, with 47 species, followed by lichenized fungi (Ascomycota) with 28 species and angiosperms with 23 species. Non-vascular epiphytes represented 65.9% of the total abundance, and Bryaceae was the richest family, with seven species, followed by Hypnaceae, Dicranaceae, and Orthotrichaceae, with five species each. Among vascular epiphytes (10,074 individuals), Orchidaceae was the dominant family, with *Lepanthes tracheia* (623 individuals) and *Epidendrum melinanthum* (619 individuals) as the most abundant species. Diversity indices indicated intermediate diversity (D > 0.79). Vertical stratification showed significant differences, with the trunk presenting the highest abundance. Phorophyte species explained 58% of the variation in epiphyte composition, with *Lacistema aggregatum*, *Myrsine guianensis*, and *Aiouea montana* identified as the most diverse host species. Specimens were collected as part of an undergraduate thesis project (Res. 1053/2022, Universidad del Cauca) under the ANLA framework permit No. 001040/2025. This study constitutes the first quantitative record of vascular and non-vascular epiphytes in a sub-Andean forest in Cauca.

**Keywords:** Bryophytes; diversity; vascular epiphytes; phorophytes; lichens; sub-Andean forest.

## Introducción

Las epífitas son plantas que, sin comportarse como parásitas, completan su ciclo de vida creciendo sobre forófitos y utilizándolos únicamente como soporte (**Zotz**, 2016; **Pérez-Noyola *et al.***, 2021). En condiciones particulares, como las descritas para *Tillandsia recurvata* en hábitats semiáridos, una gran densidad de epífitas puede generar cambios estructurales y ecofisiológicos en las ramas del hospedero, llegando incluso a comprometer su fenología (**Pérez-Noyola *et al.***, 2021).

Además de las epífitas vasculares, los hongos liquenizados y los briófitos colonizan la superficie de los árboles. Aunque tradicionalmente consideradas comensales, estas comunidades pueden incidir en la función del hospedero al interceptar recursos como la luz, el agua y los nutrientes, afectando su crecimiento (**Stanton *et al.***, 2014). En condiciones de alta cobertura la acumulación de biomasa de líquenes y musgos promueve la retención de humedad en la corteza, lo que puede facilitar el crecimiento de patógenos o alterar el intercambio gaseoso (**Lakatos *et al.***, 2006; **Lakatos**, 2011).

Las especies de forófitos que albergan epífitas contribuyen a estructurar la complejidad de los bosques subandinos. Ofrecen una gran diversidad de nichos ecológicos y la presencia de microhábitats únicos debido a la acumulación de materia orgánica y agua conocidos como "suelos de dosel" (**Cardelús & Mack**, 2010; **Cardelús *et al.***, 2020). Estos microsistemas sostienen microorganismos e invertebrados (**Gotsch *et al.***, 2016; **Humphreys & Spicer**, 2025).

En conjunto, las epífitas vasculares y no vasculares, así como los hongos liquenizados contribuyen de manera significativa a la biodiversidad y a las funciones ecológicas de los bosques. En estudios recientes se ha analizado su distribución vertical y colonización en diferentes ecosistemas, aportando información sobre su composición florística y su papel en la diversidad arbórea (**Joya *et al.***, 2025; **Feuillet-Hurtado & Torres**, 2016). Sin embargo, el muestreo a grandes alturas continúa siendo un reto metodológico (**Díaz *et al.***, 2021).

Los rasgos fitofisionómicos del forófito, tales como la textura de la corteza o la arquitectura del árbol, determinan la composición y la distribución espacial de las epífitas en los bosques subandinos (**Murillo & Triana**, 2024, **Romero & Devoto**, 2024). Las cortezas rugosas y fisuradas, capaces de acumular detritos y agua, constituyen micrositios favorables para la colonización y persistencia de estas plantas (**Schievenin *et al.***, 2024). La información obtenida en este tipo de estudios es esencial para la conservación de sitios de gran valor biótico, ya que complementa el conocimiento sobre la diversidad y la riqueza de especies que puede respaldar la formulación de estrategias de manejo ambiental.

Un ejemplo relevante es el remanente boscoso El Mangón, localizado en Tunia, Piendamó (Cauca). Este espacio es reconocido por su importancia biológica y paisajística, aunque se encuentra amenazado por la extracción de madera, el aprovechamiento de

productos forestales no maderables, los incendios intencionales, la cacería y la propuesta de construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales (PETAR). Ante esta situación, el propietario pretende declararlo reserva natural de la sociedad civil.

En este contexto, los objetivos específicos del estudio fueron: (1) caracterizar la composición florística de epífitas vasculares, no vasculares y hongos liquenizados; (2) analizar la distribución vertical de estas comunidades, y (3) determinar la relación entre las características de los forófitos (especie, DAP, altura) y la diversidad de epífitas asociadas.

## Materiales y métodos

### *Área de estudio*

El remanente de bosque se encuentra en Tunia, Piendamó, Cauca (2º40´52,2" N, 76º32´25,5" W) (**Figura 1**), y cubre 24 ha en elevaciones de 1.600 a 1.650 m. Tiene una temperatura media anual de 18 °C y una precipitación media anual de 2.300 mm. Corresponde a un bosque húmedo premontano tropical (bh-PT) según **Holdridge** (1978), o a una selva subandina según **Cuatrecasas** (1958).

El remanente limita al este con monocultivos de flores, al oeste y el norte con pastizales asociados al proyecto vial "segunda calzada Popayán–Santander de Quilichao" y al sur con la carretera hacia el área urbana de Tunia. Está atravesado por tres afluentes (ríos Colcha y El Espino y quebrada Grande) y un nacimiento, lo que resalta su importancia en la provisión de servicios ecosistémicos, especialmente el recurso hídrico (**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**, 2012).

### *Muestreo de epífitas y tratamiento de datos*

Siguiendo el protocolo de **Gradstein *et al.*** (2003), se seleccionaron 71 individuos: 36 en el borde y 35 en el interior del bosque, separados entre sí por al menos 5 m, con un DAP de 1,6 a 50 cm y alturas entre 2,5 y 27 m, con el fin de muestrear varios estratos del remanente boscoso.

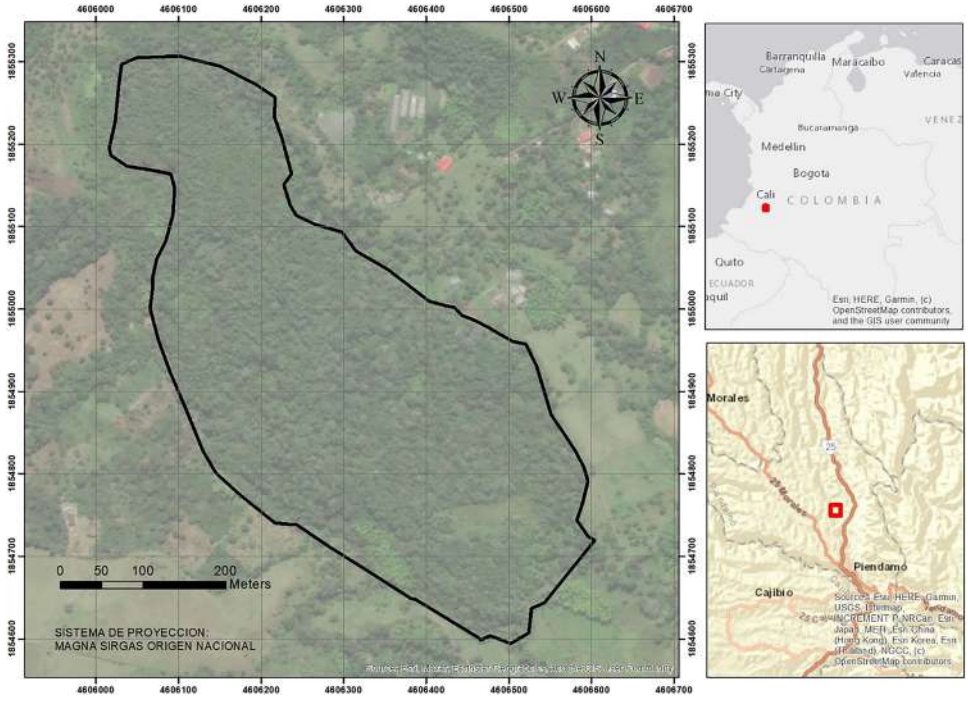



**Figura 1.** Área de estudio, remanente boscoso El Mangón, ubicado en Tunia, Piendamó, Cauca, Colombia

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):777-789, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3596

La presencia de epífitas se registró de acuerdo con las zonas propuestas por **Johansson** (1974) y modificadas por **Gradstein *et al.*** (2003) (**Figura 2**): 1= tronco (T), 2= copa media (Cm) y 3= copa externa (Ce).

La abundancia de epífitas vasculares se estimó contando los individuos por forófito (**Reina-Rodríguez y Rojas-Flórez**, 2023). El área de cobertura de las epífitas no vasculares se midió proyectada mediante una plantilla de acetato siguiendo el método de Braun-Blanquet adaptado (**Westhoff & van der Maarel**, 1978).

La recolección del material vegetal fue parte del trabajo de grado titulado "Composición y estructura florística de un remanente boscoso en el corregimiento de Tunía, municipio de Piendamó – Tunía, Cauca", aprobado mediante Resolución No. 1053 del 1 de diciembre

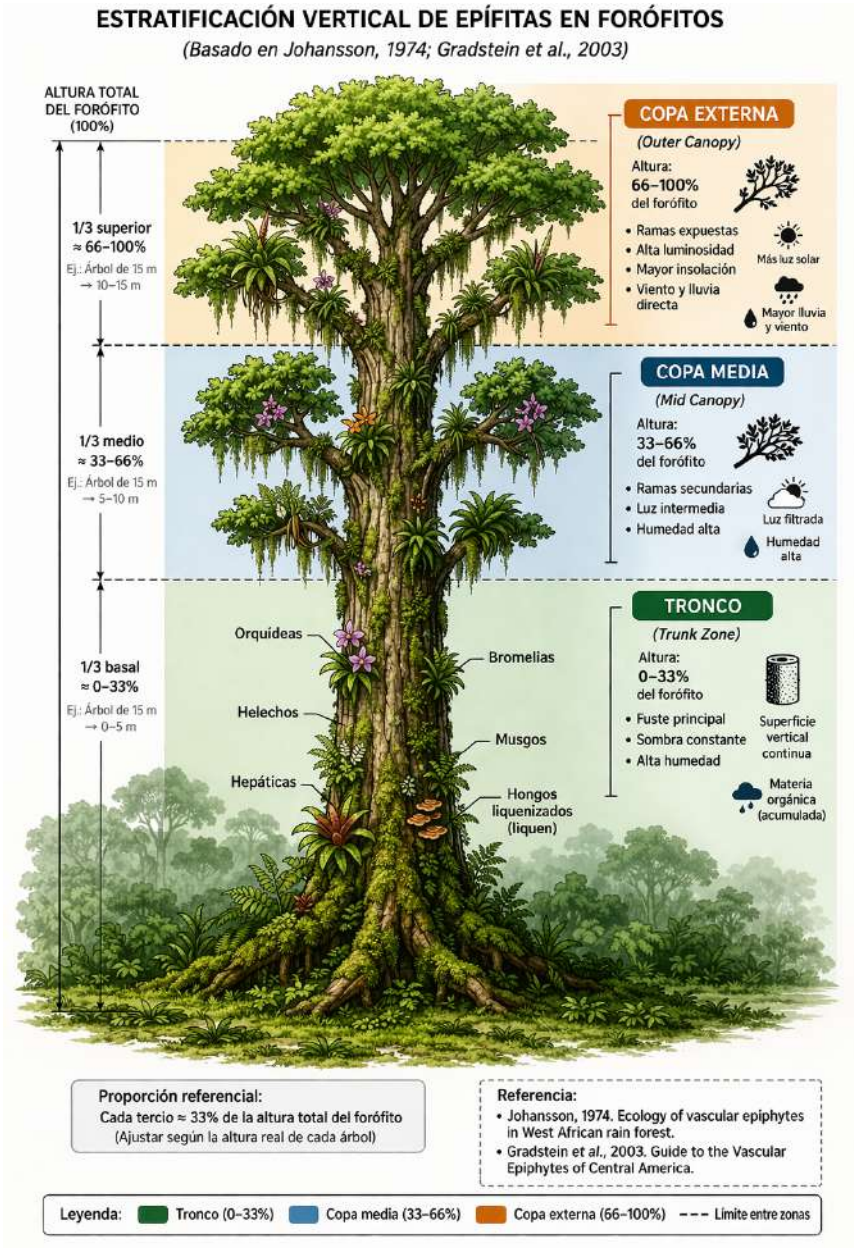



**Figura 2.** Zonificación del forófito (modificado de **Johansson**, 1974). Zona 1: tronco: incluye desde las raíces hasta la primera ramificación de la copa. Zona 2: copa media (Cm): todo el conjunto del dosel de las ramas medias. Zona 3: copa externa (Ce): todo el conjunto de ramas altas o externas

de 2022 por el Consejo de la Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación de la Universidad del Cauca. Las recolecciones se hicieron al amparo del permiso marco de recolección de especímenes de la diversidad biológica con fines de investigación científica no comercial, otorgado a la Universidad del Cauca mediante Resolución de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) No. 001040 del 30 de mayo de 2025.

### *Análisis de los datos de la estructura vertical de epífitas*

Se estimaron diferentes índices ecológicos utilizando el *software* estadístico RStudio (**R Core Team**, 2023). Los índices de diversidad de Shannon-Wiener (H') y Simpson (λ), y el índice de similitud de Bray-Curtis (**Bray & Curtis**, 1957) se calcularon inicialmente para describir la riqueza, la equitatividad y la composición de las especies de epífitas estudiadas.

La diversidad se calculó en RStudio (**R Core Team**, 2023) usando los índices de Shannon-Wiener (H′ ecuación 1) y Simpson (λ ecuación 2)

$$H' = -\sum_i^S p_i \ ln(p_i) \quad (1)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (2),$$

donde $p_i$ es la proporción de individuos de la especie $i$ y $S$ el número total de especies.

Se evaluó la homogeneidad de varianzas univariadas con la prueba de Levene y la dispersión multivariada con Permdisp (**Anderson**, 2006). La estructura de la variación entre grupos se verificó con Permanova (**Anderson *et al.***, 2008) y ANOSIM (**Clarke**, 1993), y las contribuciones de especies se estimaron con SIMPER. Las relaciones entre comunidades se visualizaron mediante NMDS con distancia de Bray–Curtis usando vegan (**Oksanen *et al.***, 2023) en R [versión 4.5.0].

La normalidad se verificó con las pruebas de Shapiro–Wilk y Kolmogorov–Smirnov; cuando esta no se cumplía, se aplicaron pruebas no paramétricas (Kruskal–Wallis) con comparaciones *post hoc* de Dunn y ajuste de Bonferroni. La relación de la riqueza con clases diamétricas y altimétricas se analizó con ANOVA cuando se cumplían la normalidad y la homocedasticidad (Levene) o, en caso contrario, con Kruskal–Wallis; las comparaciones múltiples se ajustaron con Holm–Bonferroni.

Para describir la red forófito–epífita, la tabla de coocurrencias se transformó en una matriz de adyacencia y se construyó una red bipartita en R con igraph (**Csardi & Nepusz**, 2006), bipartite (**Dormann *et al.***, 2008), tidygraph y ggraph.

## Resultados

### *Composición florística*

Se registraron 123 especies de epífitas distribuidas en 92 géneros, 50 familias y 28 órdenes (**Tabla 1S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3596/5367). Entre las no vasculares, Bryophyta fue el grupo más diverso (47 especies), seguido de Ascomycota (28 especies) y Marchantiophyta (6 especies). Las epífitas no vasculares representaron 65,9 % de la abundancia (cobertura proyectada), siendo Pterobryaceae la familia más abundante (1.075 cm²).

Entre las vasculares, Angiospermae aportó la mayor abundancia relativa; Monilophyta y Lycopodiophyta fueron minoritarias. Las epífitas vasculares sumaron 10.075 individuos. En Angiospermae, Orchidaceae fue dominante; las especies frecuentes incluyeron *L. tracheia Lepanthes tracheia* y *Epidendrum melinanthum*. Bromeliaceae fue la segunda familia en abundancia, en tanto que Monilophyta y Lycopodiophyta contribuyeron con proporciones menores (**Figura 3**).

### *Composición de epífitas en relación con la posición del forófito en el remanente boscoso (interior Vs. exterior)*

La dispersión fue comparable entre grupos (ANOVA de homogeneidad de dispersión no significativo, F = 1.1308, Pr(>F) = 0,2943). Las pruebas Permanova y Anosim no detectaron diferencias en la composición entre el interior y el exterior o el borde del bosque

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):777-789, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3596

(F = 0,5849, $R^2$ = 0,01516, Pr(>F) = 0,992 y R = −0,07133, Pr = 0,998). La ordenación multidimensional no métrica (NMDS) (**Figura 1S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3596/5367) confirmó visualmente la falta de grupos definidos en las ubicaciones de muestra, con gran superposición entre los grupos del interior y el exterior.

### *Estructura vertical*

*Distribución de epífitas por estrato.* La distribución de las epífitas entre el tronco (T), la copa media (Cm) y la copa externa (Ce) presentó diferencias significativas según las pruebas de Permdisp (p < 0,05; p = 0,01921) y Kruskal-Wallis (p < 0,05, p = 0,0002744).

La distribución vertical de las especies de epífitas (**Figura 4**) evidenció cómo en el estrato Ce *Tillandsia sp.*, *Pleopeltis astrolepis* y *Philodendron sp.* exhibieron una mayor abundancia relativa, en tanto que en el estrato Cm, *Polytaenium lineatum*, *L. tracheia* y

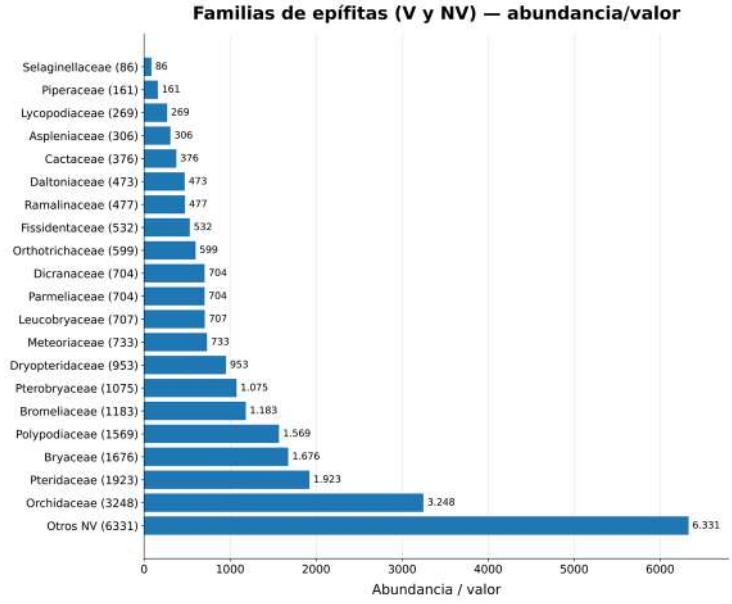



**Figura 3.** Número de individuos de las familias más representativas. V: epífitas vasculares; NV: epífitas no vasculares.

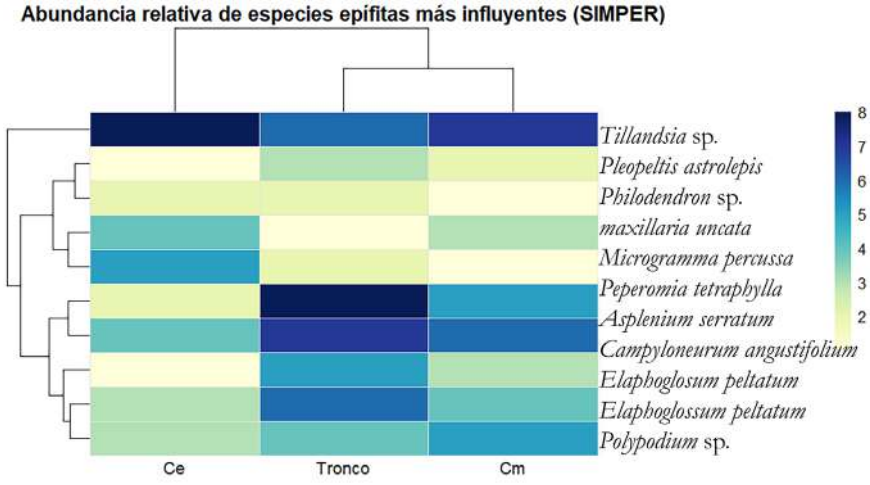



**Figura 4.** Mapa de calor (*heatmap*) de la abundancia relativa de especies epífitas más influyentes según análisis Simper. Ce: copa externa; Cm: copa media; T: tronco

*E. melinanthum* fueron más abundantes. En el estrato del tronco se presentó una mezcla de especies, siendo *P. lineatum* la más común. Este patrón se reforzó con el análisis de la importancia ecológica de las especies por estratos (**Tabla 1**), el cual mostró la importancia relativa de especies como *P. lineatum* y *L. tracheia* en varios estratos, aunque con diferentes contribuciones relativas.

### *Composición por especie de forófito*

Las comunidades de epífitas con mayor riqueza y equitatividad en forófitos fueron *Lacistema aggregatum* (H′ ≈ 4,35, D ≈ 0,98), *Myrsine guianensis* (H′ ≈ 4,15, D ≈ 0,98) y *Aiouea montana* (H′ ≈ 4,02, D ≈ 0,98), en tanto que forófitos como *Inga densiflora, Miconia octona* y *Miconia theaezans* presentaron valores bajos (H′ ≈ 1,7–1,8; D ≈ 0,79–0,82), lo que evidenció la dominancia de pocas especies. En promedio, los valores de Simpson fueron altos (>0,79) (**Figura 5**).

**Tabla 1.** Especies con mayor índice de valor de importancia de epífitas en los diferentes estratos

| Especie | IVI general | Ce | Cm | Tronco |
|---|---|---|---|---|
| *Polytaenium lineatum* | 17,71 | 14,34 | 17,46 | 18,75 |
| *Lepanthes tracheia* | 7,09 | 6,90 | 7,38 | 6,89 |
| *Epidendrum melinanthum* | 6,94 | 3,99 | 6,96 | 7,34 |
| *Calyptothecium duplicatum* | 6,05 | – | 6,43 | 6,37 |
| *Hildebrandtiella guyanensis* | 5,46 | 8,49 | 5,63 | 4,78 |
| *Atractylocarpus longisetus* | 5,30 | 2,51 | 5,36 | 5,69 |
| *Adelothecium bogotense* | 5,28 | 5,56 | 5,65 | 4,99 |
| *Serpocaulon levigatum* | 4,26 | 9,75 | 3,68 | 4,28 |
| *Lopezaria versicolor* | 4,22 | 6,00 | 3,83 | 4,48 |
| *Elaphoglossum ellipsoideum* | 3,84 | 7,35 | 3,51 | 3,76 |

Ce, copa externa. Cm, copa media

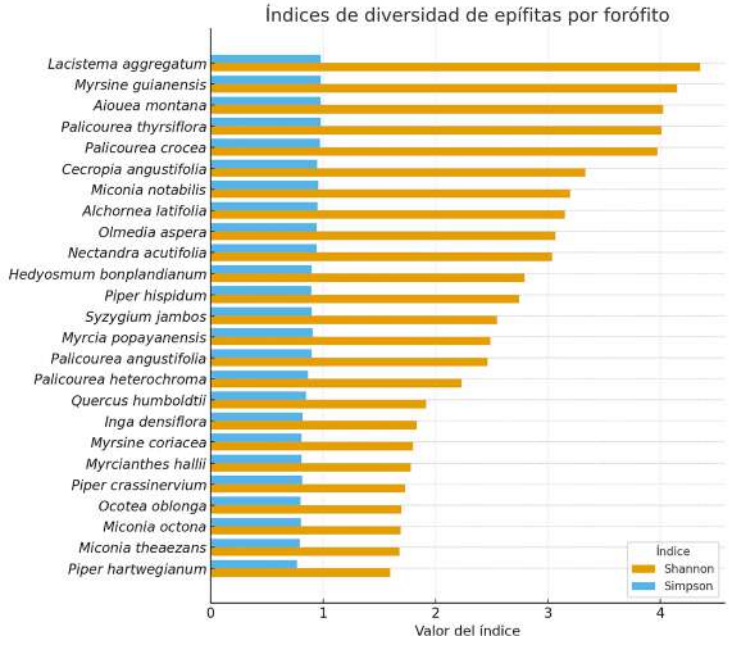



**Figura 5.** Índice de diversidad de epífitas por especie de forófito (Shannon (H') y Simpson (D))

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):777-789, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3596

En relación con lo anterior, la función Betadisper fue significativa ($F_{(21,\ 18)}$ = 11,86, p<0,001), lo que indica heterogeneidad dentro de los forófitos. El *post-hoc* de Tukey identificó a *A. montana* como uno de los forófitos con alta heterogeneidad y variabilidad frente a un grupo de hospederos con muy baja heterogeneidad (p ≈ 0,0017), al igual que *Miconia notabilis, Palicourea crocea, Piper hispidum* y *Palicourea thyrsiflora* (p entre 0,014 y 0,03). El dendrograma basado en distancias de Bray–Curtis diferenció cuatro grupos de forófitos con distinta similitud: *L. aggregatum, Palicourea crocea* y *Palicourea thyrsiflora,* que se agrupan en un conjunto de gran similitud y diversidad interna, en tanto que en el otro extremo se agrupan los forófitos con poca diversidad y similitud de epífitas como *Piper hartwegianum, Ocotea oblonga* y *Miconia theaezans* (**Figura 2S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3596/5367).

La prueba Permanova indicó que la especie y las características del forófito explicaron el 58 % de la variación en la composición ($R^2$ = 0,5786; F = 1,18; p = 0,013).

La riqueza de epífitas varió entre clases diamétricas y altimétricas. Las pruebas de Kruskal-Wallis y el *post-hoc* de Dunn indicaron disparidades significativas entre clases diamétricas (clase I y clase II, Z = –3,65, p.adj = 0,0027, **), clases altimétricas (II *Vs.* VI: Z = –3,49, p.adj = 0,0270 *; II *Vs.* VII: Z = –3,74, p.adj = 0,0102 *; II *Vs.* X: Z = –3,32, p.adj = 0,0493 *; II *Vs.* XIII: Z = –4,36, p.adj = 0,0007 ***). La riqueza tendió a máximos en árboles de menor tamaño y altitudes bajas y medias. (**Figura 6**; **Figura 3S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3596/5367).

Estos patrones de distribución por clases diamétricas y altimétricas parecerían reflejarse en la estructura de la red forófito-epífita, en la que se evidenció una estructura sesgada y pocos nodos con alto grado, en tanto que la mayoría mostró un bajo grado (**Figura 7**). En este contexto, varias epífitas (E1), como *Elaphoglossum burchellii, Elaphoglossum muscosum* y *E. melinanthum*, actuaron como nodos centrales por su recurrencia en múltiples forófitos. Por otro lado, forófitos como *L. aggregatum* (F6) y *P. thyrsiflora* (F20) grado = 7, seguido por *M. guianensis* (F13) y *P. crocea* (F18) grado = 6, concentraron mayor diversidad y conectividad.

## Discusión

La riqueza de epífitas registrada en el remanente boscoso fue menor que la reportada en otros ecosistemas andinos y amazónicos. **Arévalo y Betancur** (2004) registraron 183 especies en Chiribiquete, **Rojas-Flórez y Sánchez-Montaño** (2015) reportaron 133 en Pamplona y **Soto-Medina *et al.*** (2023) identificaron 50 morfoespecies de epífitas vasculares, 77 de briófitas y 290 de líquenes en el Valle del Cauca. Esta diferencia puede explicarse por la baja heterogeneidad estructural del bosque estudiado, caracterizado por una estructura forestal joven que limita la diversidad de nichos (**Gentry & Dodson**, 1987).

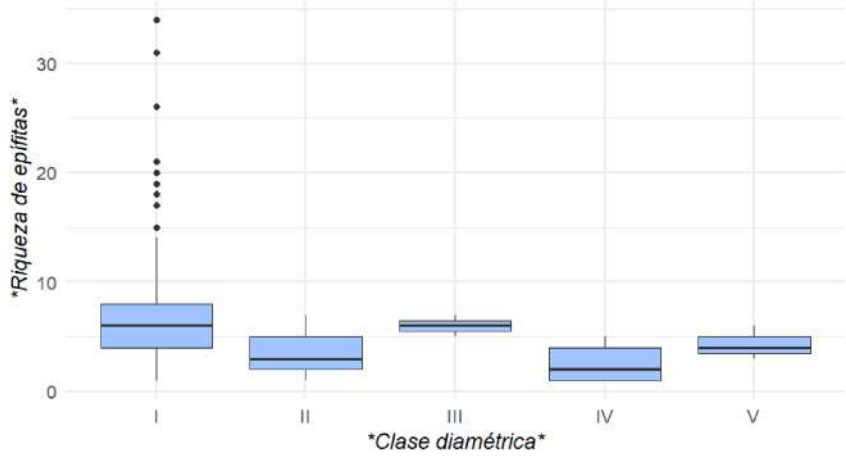



**Figura 6.** Riqueza de epífitas en relación con las clases diamétricas de los forófitos

En cuanto a estudios previos en el Cauca, **Feuillet-Hurtado y Torres** (2016) registraron 38 especies de hepáticas epífitas en un gradiente altitudinal entre los 1.400 y los 3.280 m, con mayor riqueza en altitudes intermedias (1.889-2.610 m), en tanto que **Bolaños y Ramírez** (2009) reportaron 274 especies de musgos para Popayán, con un pico de diversidad entre los 1.800 y los 2.100 m. En este estudio en un remanente boscoso puntual sin rangos altitudinales, registramos una menor riqueza específica de briófitos que en esos trabajos previos debido a la diferencia en la escala espacial. Sin embargo, la gran abundancia de epífitas no vasculares y la presencia de familias como Lejeuneaceae, Plagiochilaceae y Pterobryaceae confirman que la zona subandina del Cauca tiene una elevada densidad de briófitos epífitos.

En contraste, la abundancia total (10.074 epífitas vasculares más 63,8 % de no vasculares) fue alta y comparable al estudio de **Soto-Medina *et al.*** (2015) en bosques de transición del Pacífico colombiano. Este patrón refleja que, aunque la riqueza es menor, la densidad de individuos epífitos en el dosel es significativa.

Entre los organismos epifitos no vasculares, los musgos (Bryophyta) fueron el grupo más diverso, con especies de la familia Pterobryaceae como *Calyptothecium duplicatum* y *Hildebrandtiella guyanensis*. Estos resultados concuerdan con estudios que destacan el papel de los musgos como formadores de microhábitats, pues retienen agua, nutrientes y materia orgánica que facilitan el establecimiento de otras epífitas (**Gradstein *et al.***, 2003; **Lüttge**, 2008). Los líquenes (Ascomycota) y hepáticas (Marchantiophyta) también fueron abundantes, lo que refuerza la importancia de las epífitas no vasculares en la dinámica del bosque. Nuestros hallazgos representan el primer registro cuantitativo de epífitas no vasculares en un bosque subandino del Cauca, lo que constituye un aporte relevante al conocimiento regional.

Entre las epífitas vasculares, las angiospermas fueron dominantes, especialmente la familia Orchidaceae, con especies como *L. tracheia* y *E. melinanthum*. Este patrón coincide con estudios en los Andes y en bosques secos tropicales que también reportan a Orchidaceae como grupo dominante (**Mercado-Gómez *et al.***, 2023). Asimismo, Bromeliaceae aportó una fracción importante de individuos, con especies adaptadas a condiciones de alta radiación y limitación de agua (**Benzing**, 1990).

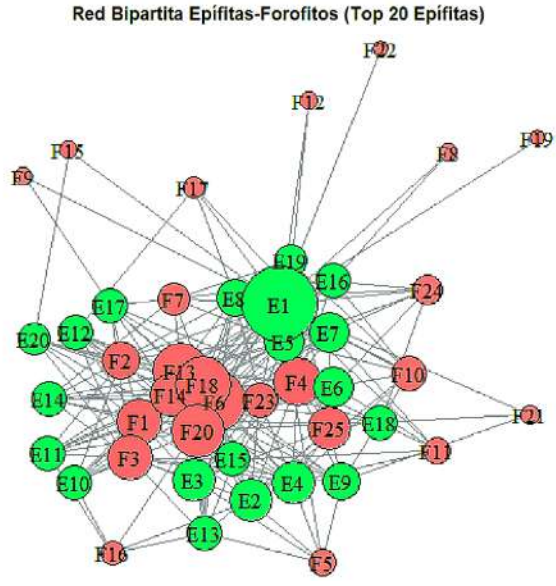



**Figura 7.** Red bipartita de asociaciones entre especies de epífitas y forófitos en el remanente boscoso El Mangón. Los nodos representan especies de epífitas (E) y forófitos (F), y las conexiones indican presencia de la epífita en el forófito.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):777-789, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3596

La composición de epífitas no mostró diferencias significativas entre forófitos ubicados en el interior y los del borde del remanente, lo que sugiere que la posición espacial dentro del bosque tiene menor influencia que las características intrínsecas del hospedero. La especie de forófito sí explicó gran parte de la variación en la composición, lo que confirma el rol de atributos como la textura de la corteza, la arquitectura y la edad en la estructuración de comunidades epífitas (**Callaway *et al.***, 2002; **Zotz & Schulz**, 2008).

La estratificación vertical reveló diferencias claras. El tronco presentó la mayor abundancia, mientras que la copa externa y la media albergaron especies adaptadas a condiciones más extremas de luz y humedad. Estos resultados coinciden con estudios previos en bosques tropicales que documentan una zonificación vertical marcada (**Nadkarni**, 1984).

Por último, el análisis de la red bipartita forófito-epífita del remanente El Mangón reveló una estructura sesgada, con pocos nodos de alto grado de conectividad y la mayoría con bajo grado (**Figura 7**). Este patrón coincide con lo reportado para otras redes comensalistas epífita-forófito, las cuales exhiben generalmente baja modularidad, baja especialización y estructura anidada (**Naranjo *et al.***, 2019; **Hu *et al.***, 2021; **Francisco *et al.***, 2025). El predominio de especies periféricas en la red, es decir, aquellas con pocas interacciones tanto dentro como fuera de los módulos, sugiere que la mayoría de las epífitas registradas presentan baja especificidad hacia forófitos particulares, lo cual es coherente con la capacidad generalista que caracteriza a las comunidades epifíticas (**Naranjo *et al.***, 2019).

*Elaphoglossum burchellii, E. muscosum* y *E. melinanthum* actuaron como nodos centrales en la red, al registrarse en múltiples forófitos con alta frecuencia. Siguiendo la clasificación de **Guimera *et al.*** (2005), estas especies corresponderían a conectores (*connectors*), es decir, especies con baja conectividad intramodular pero alta conectividad entre módulos, cuya función es articular la cohesión de la red. Resultados similares fueron reportados por **Hu *et al.*** (2021) en bosques tropicales y subtropicales de Yunnan (China), donde *Pseuduvaria indochinensis* y *Drypetes hoaensis* actuaron como especies conectoras en la red de briófitos epífitos, y por **Francisco *et al.*** (2025) en un inselberg del bosque atlántico, donde *Tillandsia loliacea* fue la única epífita con alto valor de z, lo cual la determinó como *hub* de módulo. La ausencia de *hubs* de red (*network hubs*) en la red del presente estudio, es decir, especies con alta conectividad dentro y entre módulos, sugiere que ninguna especie domina simultáneamente múltiples módulos, patrón también encontrado en los estudios de **Hu *et al.*** (2021) y **Francisco *et al.*** (2025), y que parece ser una característica recurrente en redes comensalistas epífita-forófito.

La condición de nodo central de *E. muscosum* y *E. melinanthum* las convierte en especies "puente" que facilitan la conexión entre módulos de la red y aportan resiliencia a la comunidad (**Bascompte *et al.***, 2003). En redes con estructura anidada, la pérdida de especies altamente conectadas puede alterar la arquitectura de la red de manera desproporcionada (**Hu *et al.***, 2021), lo que cobra especial relevancia en remanentes boscosos fragmentados como El Mangón, donde la reducción de especies generalistas con alta conectividad podría desestabilizar la comunidad de epífitas antes de que se produzca una extinción local formal (**Francisco *et al.***, 2025). Por el contrario, los forófitos con mayor grado de conectividad (*L. aggregatum* (F6) y *P. thyrsiflora* (F20) con grado = 7, y *M. guianensis* (F13) y *P. crocea* (F18) con grado = 6) concentran la mayor diversidad y conectividad de la red (**Figura 7**). Estos resultados refuerzan el planteamiento de **Hu *et al.*** (2021) y **Francisco *et al.*** (2025) de que la identidad de la especie forófita, junto con sus atributos estructurales (arquitectura, textura de corteza, tamaño), es determinante en la organización de las comunidades epifíticas y en la estabilidad de la red.

La baja modularidad observada en la red del presente estudio es consistente con los valores reportados en otras redes comensalistas (**Naranjo *et al.***, 2019; **Hu *et al.***, 2021; **Francisco *et al.,*** 2025) y puede atribuirse a la escasa especialización de las epífitas hacia forófitos específicos y a la ausencia de procesos coevolutivos entre ambos grupos (**Naranjo *et al.***, 2019). La dispersión anemócora, predominante en familias como Orchidaceae y

Polypodiaceae registradas en este estudio, facilita la colonización aleatoria de distintos forófitos, reduciendo la fidelidad hacia hospederos específicos y limitando la formación de módulos bien definidos (**Francisco *et al.***, 2025). No obstante, que la estructura de la red no sea aleatoria, como lo confirma el valor de $R^2 = 0,5786$ obtenido con Permanova, indica que existen procesos de nicho y filtros ecológicos (textura de corteza, microclima, arquitectura del árbol) que determinan qué epífitas se asocian con qué forófitos (**Naranjo *et al.***, 2019; **Schievenin *et al.***, 2024).

## Conclusiones

Se registraron 123 especies de epífitas; las no vasculares representaron el 65,9 % de la abundancia. La identidad y la arquitectura del forófito explicaron los patrones de riqueza y composición a lo largo del perfil vertical. La red forófito–epífita mostró nodos con alta intermediación que podrían sostener la conectividad; esta función se plantea como hipótesis pendiente de pruebas de robustez. Nuestros hallazgos aportan una línea de base para orientar la conservación y la restauración de remanentes subandinos del Cauca teniendo que tengan en cuenta los organismos epifitos.

## Información suplementaria

Ver información suplementaria en https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3596/5367

## Agradecimientos

A Promotora de desarrollo sustentable S.A.S por la financiación de las salidas de campo. Al herbario CAUP y departamento de biología de la Universidad del Cauca en la determinación del material y la logística para la investigación. Al doctor Hernando Vergara Varela, por la revisión previa del manuscrito. A la familia Gómez por permitir los permisos para el ingreso a los predios y por sus esfuerzos de conservación del remanente boscoso. A los revisores anónimos y el editor de la revista por sus sugerencias que permitieron elevar la calidad del manuscrito.

## Contribución de los autores

**LELV**: conceptualización, metodología, trabajo de campo, análisis de datos, escritura del borrador original, revisión y edición; **DJMP**: trabajo de campo, curaduría taxonómica de epífitas vasculares, revisión del manuscrito; **YPSC**: trabajo de campo, curaduría taxonómica de epífitas no vasculares y líquenes, revisión del manuscrito; **DV:** trabajo de campo, revisión del manuscrito; **JFCC**: curaduría taxonómica de epífitas no vasculares y líquenes, análisis de datos, revisión del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

## Referencias

**Anderson, M. J.** (2006). Distance-based tests for homogeneity of multivariate dispersions. *Biometrics, 62*(1), 245-253. https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2005.00440.x

**Anderson, M. J., Gorley, R. N., Clarke, K. R.** (2008). PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to software and statistical methods. PRIMER-E. https://learninghub.primer-e.com/books/permanova-for-primer-guide-to-software-and-statistical-methods

**Arévalo, R. & Betancur, J.** (2004). Diversidad de epífitas vasculares en cuatro bosques del sector suroriente de la Serranía de Chiribiquete, Guayana colombiana. *Caldasia, 26*(2), 359-380.

**Bascompte, J., Jordano, P., Melián, C. J., Olesen, J. M.** (2003). The nested assembly of plant-animal mutualistic networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 100*(16), 9383-9387. https://doi.org/10.1073/pnas.1633576100

**Benzing, D.** (1990). *Vascular epiphytes: General biology and related biota*. Cambridge University Press.

**Bolaños, G. Y. & Ramírez, B. R.** (2009). Distribución altitudinal de musgos en el municipio de Popayán, Cauca. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas, 21*, 31-44. https://www.revistaaccb.org/r/index.php/accb/article/view/45.

**Bray, J. R. & Curtis, J. T.** (1957). An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs, 27*(4), 325-349.

**Callaway, R. M., Reinhart, K. O., Moore, G. W., Moore, D. J., Pennings, S. C.** (2002). Epiphyte host preferences and host traits: Mechanisms for species-specific interactions. *Oecologia, 132*(2), 221-230. https://doi.org/10.1007/s00442-002-0943-3

**Cardelús, C. L. & Mack, M. C.** (2010). The nutrient status of epiphytes and their host trees along an elevational gradient in Costa Rica. *Plant Ecology, 207*(1), 25-37. https://doi.org/10.1007/s11258-009-9651-y

**Cardelús, C. L., Mack, M. C., Woods, C., DeMarco, J., Thorn, K.** (2020). Vascular epiphyte distribution patterns: explaining the mid-elevation richness peak. *Journal of Ecology, 108*(1), 188-201. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13268

**Clarke, K. R.** (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology, 18*(1), 117-143. https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1993.tb00438.x

**Csardi, G. & Nepusz, T.** (2006). *The igraph software package for complex network research*. InterJournal, Complex Systems, 1695.

**Cuatrecasas, J.** (1958). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *10*(40), 221-264.

**Díaz, I. A., Sieving, K. E., Peña-Foxon, M. E., Larraín, J., Armesto, J. J.** (2021). Epiphyte diversity and biomass load on trees along a topology-based gradient of forest degradation in southern temperate rainforest of Chile. *Forest Ecology and Management, 488*, 119031. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.025

**Dormann, C. F., Fründ, J., Blüthgen, N., Gruber, B.** (2008). Indices, graphs and null models: Analyzing bipartite ecological networks. *The Open Ecology Journal, 2*(1), 7-24. https://doi.org/10.2174/1874213000902010007

**Feuillet-Hurtado, C. & Torres, A. M.** (2016). Hepáticas epífitas: riqueza en un gradiente altitudinal andino, departamento del Cauca, Colombia. *Boletín Científico Centro de Museos, Museo de Historia Natural, 20*(2), 33–42. https://doi.org/10.17151/bccm.2016.20.2.3.

**Gentry, A. H. & Dodson, C.** (1987). Contribution of nontrees to species richness of a tropical rain forest. *Biotropica, 19*(2), 149-156.

**Gotsch, S. G., Nadkarni, N., Amici, A.** (2016). The functional roles of epiphytes and arboreal soils in tropical montane cloud forests. *Journal of Tropical Ecology, 32*(5), 455-468. https://doi.org/10.1017/s026646741600033x

**Gradstein, S. R., Nadkarni, N. M., Krömer, T., Holz, I., Nöske, N.** (2003). A protocol for rapid and representative sampling of vascular and non-vascular epiphyte diversity of tropical rain forests. *Selbyana, 24*(1), 105-111. https://journals.flvc.org/selbyana/article/view/121584

**Holdridge, L. R.** (1978). *Ecología basada en zonas de vida.* Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

**Humphreys, L. R., Lucas, J. M., Spicer, M. E.** (2025). Canopy height and epiphytic bryophytes shape fungal communities in a temperate rainforest. *Ecology and Evolution, 15*(10), e72241. https://doi.org/10.1002/ece3.72241

**Johansson, D.** (1974). Ecology of vascular epiphytes in West African rain forest. *Acta Phytogeographica Suecica, 59*, 1-136. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:565496/FULLTEXT01.pdf

**Joya, D. P., Suescún, D., Espinosa , S. Y., Morales-Morales , P. A.** (2025). Diversity and vertical distribution of epiphytic orchids and bromeliads in two contrasting forests from Northeast Andes of Colombia. *Revista De Biología Tropical, 73*(1), e57994. https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v73i1.57994

**Lakatos, M.** (2011). Lichens and bryophytes: Habitats and species (pp. 65-87). En: *Plant Desiccation Tolerance*. Ecological Studies (Vol. 215). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19106-0_5

**Lakatos, M., Rascher, U., Büdel, B.** (2006). Functional characteristics of corticolous lichens in the understory of a tropical lowland rain forest. *New Phytologist, 172*(4), 679-695. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01871.x

**Lüttge, U.** (2008). *Physiological ecology of tropical plants*. Springer Science & Business Media.

**Mercado-Gómez, J. D., Giraldo-Cañas, D., Sánchez, M.** (2023). Epiphytic diversity in tropical dry forests of the Montes de María, Colombia. *Caldasia, 45*(1), 45-62.

**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.** (2012). *Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE)*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Poli%CC%81tica-Nacional-de-Gestio%CC%81n-Integral-de-la-Biodiver.pdf

**Murillo A., J. & Triana-Moreno, L.A.** (2024). Diversidad y distribución de los heléchos y licófitos de un bosque subandino del norte de los Andes. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, 59*(3), 6. https://doi.org/10.31055/1851.2372.v59.n3.44728

**Nadkarni, N. M.** (1984). Epiphyte biomass and nutrient capital of a Neotropical elfin forest. *Biotropica, 16*(4), 249-256.

**Oksanen, J., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Wagner, H.** (2023). vegan: Community Ecology Package R.

**Pérez-Noyola, F. J., Flores, J., Yáñez-Espinosa, L., Jurado, E., González-Salvatierra, C., Badano, E.** (2021). Is ball moss (Tillandsia recurvata) a structural parasite of mesquite (Prosopis laevigata)? Anatomical and ecophysiological evidence. Trees, 35(1), 135-144. https://doi.org/10.1007/s00468-020-02023-5

**R Core Team.** (2023). *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

**Reina-Rodríguez, G. A. & Rojas-Flórez, C. B.** (2023). Métodos para caracterizar epífitas vasculares en el contexto de la investigación y conservación. *Revista de Ciencias Ambientales, 57*(2), 1-18. https://doi.org/10.15359/rca.57-2.10

**Rojas-Flórez, C. B. & Sánchez-Montaño, L. R.** (2015). Estructura espacial de epífitas vasculares en dos localidades de bosque altoandino, Pamplona, Colombia. *Caldasia, 37*(1), 15-30. https://doi.org/10.15446/caldasia.v37n1.50819

**Romero Zapiola, A. & Devoto, M.** (2024). Factores que afectan la riqueza de especies epífitas vasculares del arbolado de alineación en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. *Ecología Austral, 34*(3), 579-592. https://doi.org/10.25260/EA.24.34.3.0.2406

**Schievenin, D. F., Alonso Santos, C., de Lima, K., Galvão de Melo, A.C., Lex Engel, V., Durigan, G.** (2024). Traits of the host trees, not community diversity, drive epiphyte assemblages. *Biota Neotropica, 24*(1). https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2023-1558

**Soto-Medina, E., Londoño-Lemos, V., Díaz-Escandón, D.** (2015). Epiphytes from a forest type transition zone in the Chocó biogeographic region, Valle del Cauca, Colombia. *Revista de Biología Tropical, 63*(4), 915-926. https://doi.org/10.15517/rbt.v63i4.16733

**Soto-Medina, E., Montoya, C., Castaño, A., Granobles, J.** (2023). Diversity patterns of vascular and non-vascular epiphytes along tropical dry forest. *Revista de Biología Tropical, 71*(1), e53522. https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v71i1.53522

**Stanton, D. E., Chávez, J. H., Villegas, L., Villasante, F., Armesto, J., Hedin, L. O., Horn, H.** (2014). Epiphytes improve host plant water use by microenvironment modification. *Functional Ecology, 28*(5), 1274-1283. https://doi.org/10.1111/1365-2435.12249

**Westhoff, V. & van der Maarel, E.** (1978). The Braun-Blanquet approach. In R. H. Whittaker (Ed.), *Classification of plant communities* (pp. 287–399). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9183-5_9

**Zotz, G.** (2016). *Plants on Plants – The Biology of Vascular Epiphytes.* Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39237-0

**Zotz, G. & Schulz, S.** (2008). The vascular epiphytes of a lowland forest in Panama—species composition and spatial structure. *Plant Ecology, 195*, 131-141. https://doi.org/10.1007/s11258-007-9310-0

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):790-803, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4038



Artículo original

# Evaluación multiparamétrica de la calidad del suelo y la sanidad del cultivo de pitahaya (*Hylocereus megalanthus* y *H. undatus*), sector Huambi, Morona Santiago, Ecuador

## Multiparametric evaluation of soil quality and crop health of pitahaya (*Hylocereus megalanthus* and *H. undatus*), Huambi, Morona Santiago, Ecuador

**Juan Pablo Haro-Altamirano[1,*], William Carrillo-Barahona[1], Carla Haro-Velastegui[1], Miguel Ángel Osorio-Rivera[1], José Ángel Antuash-Tsenkush[2]**

[1] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo-ESPOCH, Riobamba, Ecuador
[2] Grupo de Investigación Innovación Tecnología Morona Santiago, Macas, Ecuador

## Resumen

La agricultura se ha convertido en la principal causa de degradación ambiental, lo que afecta la biodiversidad y la capacidad de los ecosistemas. Por ello es necesario formular nuevos esquemas de evaluación que integren la mayoría de las características y factores relacionados con el manejo de alternativas sustentables para mejorar los sistemas productivos. En este estudio nos propusimos evaluar la calidad del suelo y la sanidad del cultivo de dos especies de pitahaya *(Hylocereus megalanthus* y *H. undatus)* mediante un análisis multiparamétrico en Huambi, provincia de Morona Santiago, Ecuador. La metodología de Altieri y Nicholls propone un enfoque cualitativo y cuantitativo basado en indicadores adaptados a la región para determinar la calidad del suelo, la sanidad del cultivo y la sustentabilidad. En cuanto a la calidad del suelo, se encontraron rangos altos de ponderación (10) del pH, el color y la textura del suelo, la densidad aparente, la materia orgánica, la retención de humedad, la erosión y el contenido de calcio, zinc, cobre y hierro para las dos variedades. Se registraron rangos medios (5) en la compactación, la cobertura del suelo, el estado de los residuos, la infiltración, la profundidad de las raíces y el contenido ion amonio, magnesio y manganeso, y rangos bajos (1) en la profundidad de la capa arable, la actividad biológica y el contenido de boro y azufre. En la variedad amarilla se encontró un contenido de fósforo medio y uno alto de potasio. En la variedad roja, el contenido de fósforo fue alto y el de potasio medio. La sanidad del cultivo en las dos variedades registró rangos altos (10) en la apariencia, la incidencia de enfermedades, la competencia de malezas, la tolerancia al estrés, el rendimiento actual, el sistema agrosilvopastoril y el crecimiento del cultivo. En lo referente a la diversidad vegetal, solo la variedad amarilla tuvo una ponderación baja (1), pero en la roja fue alta (10). Con base en los resultados se concluyó que el cultivo de pitahaya amarilla tiene una sustentabilidad moderada (6,7) en cuanto a la calidad del suelo, y una sanidad de cultivo sustentable (7,7); el de pitahaya roja registró una sustentabilidad moderada (6,7) en el análisis de la calidad del suelo y una sanidad de cultivo sustentable (8,2).

**Palabras clave:** sustentabilidad, calidad del suelo, sanidad del cultivo, pitahaya, indicadores.

## Abstract

Agriculture has become the main cause of environmental degradation, affecting biodiversity and ecosystems. It is necessary, therefore, to formulate new evaluation schemes that integrate the majority of management-related characteristics and factors in sustainable alternatives to improve productive systems. Our aim here was to evaluate soil quality and crop health in the crops of two pitahaya species (*Hylocereus megalanthus* and *H. undatus*) through a multiparametric analysis to support sustainable production in Huambi, Morona Santiago province, Ecuador. The methodology, proposed by Altieri and Nicholls using both qualitative and quantitative approaches, was based on regional

**Citación:** Haro-Altamirano JP, et al. Evaluación multiparamétrica de la calidad del suelo y la sanidad del cultivo de pitahaya (*Hylocereus megalanthus* y *H. undatus*), sector Huambi, Morona Santiago, Ecuador. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):790-803, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4038

**Editor:** Gerhard Fischer

***Correspondencia:**
Juan Pablo Haro-Altamirano;
juanpablo.haro@espoch.edu.ec

**Recibido:** 23 de febrero de 2026
**Aceptado:** 25 de junio de 2026
**Publicado en línea:** 8 de julio de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

indicators to assess soil quality, crop health, and sustainability. We found that soil quality in the two crops had good weighting ranges (10) for pH, soil color, apparent density, soil texture, organic matter, moisture retention, erosion, calcium, zinc, copper, and iron content. Moderate ranges (5) were detected for compaction, soil cover, residue status, infiltration, root depth, ammonium ion content, magnesium, and manganese, and low ranges (1) for arable layer depth, biological activity, and boron and sulfur content. The yellow variety had moderate phosphorus and good potassium contents, while the red variety had good phosphorus and moderate potassium contents. Crop health in the crops of both varieties showed good ranges (10) for appearance, incidence of diseases, weed competition, stress tolerance, current yield, agrosilvopastoral system, and crop growth; the yellow variety had a low weighting (1) only in plant diversity, while in the red variety it was good (10). According to our results, the cultivation of yellow dragon fruit had moderate sustainability (6,7) regarding soil quality and was sustainable regarding crop health (7,7); the red variety registered moderate (6,7) sustainability in the analysis of soil quality, while it was sustainable (8,2) regarding crop health.

**Keywords:** Sustainability, soil quality, crop health, pitahaya, indicators.

## Introducción

**Jiménez** (2017) señala que los suelos del mundo se están degradando y agotando rápidamente debido a factores como la compactación del suelo, la erosión, la pérdida de carbono orgánico, las malas prácticas agropecuarias, y la gran dependencia en insumos sintéticos, lo que impacta en los parámetros, físicos, químicos y biológicos (**Bonilla *et al.***, 2012). **Gomiero** (2019) anota que el bajo rendimiento de la productividad se explica por el efecto de estos factores y una selección perjudicial de prácticas agropecuarias no sustentables, las cuales contribuyen a la degradación del suelo y la sanidad de los cultivos. Esta tendencia puede revertirse mediante iniciativas que promuevan programas, estrategias y prácticas de gestión sustentables con métodos adecuados para mejorar la calidad de la productividad y la sanidad del suelo y los cultivos (**Abawi & Widmer**, 2000).

Aunque el desarrollo del sector agropecuario es esencial para el crecimiento económico de los países (**Cristache *et al.***, 2018), debe reconocerse que la agricultura convencional ha generado serios problemas medioambientales porque involucra prácticas que simplifican los ecosistemas y los degradan mediante procesos de monocultivo permanente y uso excesivo de fertilizantes sintéticos y pesticidas (**Abi-Saab Arrieche & Ponce Clavijo**, 2012). Asimismo, la calidad del suelo se está deteriorado debido al sistema extractivista y dependiente de insumos externos que se ha venido implementado por décadas (**Gomiero *et al.,*** 2008). Dichos productos sintéticos son perjudiciales no solo para los humanos sino también para los animales vertebrados e invertebrados que habitan cerca de los cultivos (**Haro *et al.,*** 2022), pues estos fertilizantes y pesticidas penetran en las aguas subterráneas y en estanques, lagos y ríos, causando la eutrofización, el agotamiento de oxígeno y la desaparición gradual de la vida en estas fuentes hídricas (**Średnicka-Tober *et al.***, 2016).

**Jeronimo *et al.*** (2017) explican cómo los procesos agrícolas orgánicos tienen una ventaja en la mejora y conservación del suelo en comparación con las prácticas agrícolas convencionales, lo que subraya la necesidad de una evaluación multiparamétrica continua de la calidad del suelo y la sanidad de los cultivos, la cual cobra importancia para la gestión de los agricultores y productores de la parroquia Huambi, provincia de Morona Santiago, en lo referente a la pitahaya, considerada como una fruta exótica con buenas perspectivas de mercado internacional. **Balendres & Bengoa** (2019) señalan que la producción de este cultivo puede proporcionar altos rendimientos a los productores, especialmente en los mercados de exportación donde actualmente se comercializa en países europeos, Estados Unidos y la región asiática. En ese contexto, nuestro estudio tuvo como objetivo evaluar la calidad del suelo y la sanidad del cultivo de dos especies de pitahaya, *Hylocereus megalanthus* y *H. undatus*, mediante un análisis multiparamétrico del diagnóstico de parámetros físicos, químicos y biológicos, con la finalidad de determinar la sustentabilidad de los sistemas productivos.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):790-803, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4038

En los ecosistemas terrestres la calidad del suelo se expresa en el crecimiento de las plantas, la filtración y retención del agua, y su capacidad para servir de hábitat a organismos vivos (**Vivar-Arrieta *et al.***, 2023), por lo que es vital preservarla, con el fin de asegurar la sustentabilidad en la producción de alimentos, la protección de la biodiversidad, la gestión del agua, el ciclo de los nutrientes y la generación de materia orgánica por parte de las plantas y los animales (**Vallejo-Quintero**, 2013). Los indicadores de calidad del suelo constituyen herramientas de medición que brindan información sobre sus propiedades, procesos y características y sirven para monitorear el impacto del manejo en la función del suelo durante un periodo determinado (**García *et al.***, 2012).

La pitahaya amarilla (*Hylocereus megalanthus* syn. *Selenicereus megalanthus)* y la pitahaya roja (*Hylocereus undatus* syn. *Selenicereus undatus*) derivan su nombre del taíno, lengua indígena de varias islas del Caribe. Pertenecen a los géneros *Hylocereus* y *Selenicereus*, y las plantas son cactus que producen frutos exóticos de apariencia escamosa. Su producción es atractiva por la creciente demanda en los mercados internacionales y el potencial de la planta para diversificar los cultivos (**Díaz**, 2005).

La sanidad de los cultivos es objeto importante de las disciplinas y tecnologías científicas que sustentan la seguridad alimentaria mundial. Su objetivo principal es prevenir, controlar y mitigar las enfermedades, plagas y malezas que pueden perjudicar la salud y rendimiento de los cultivos, lo que resulta fundamental para garantizar la producción agrícola y forestal, así como la seguridad alimentaria y la conservación de los ecosistemas naturales (**Haro *et al.***, 2022; **Altieri & Nicholls**, 2013). Los indicadores de sanidad de un cultivo incluyen su apariencia, la incidencia de enfermedades malezas, su tolerancia al estrés (sequía u otros factores), el crecimiento del cultivo, el sistema de raíces, y su rendimiento potencial (**Altieri & Nicholls**, 2013).

## Materiales y métodos

### *Área de estudio*

El estudio se llevó a cabo en la finca Don Bolo, ubicada a 6 km de la Parroquia de Huambi, provincia de Morona Santiago, Ecuador, en la vía principal que conduce al Cantón Logroño. Sus coordenadas son 2°35’22.7” de latitud sur y 78°10’43.2” de longitud oeste y su altitud es de 1.020 m s.n.m. (**Figura 1**).

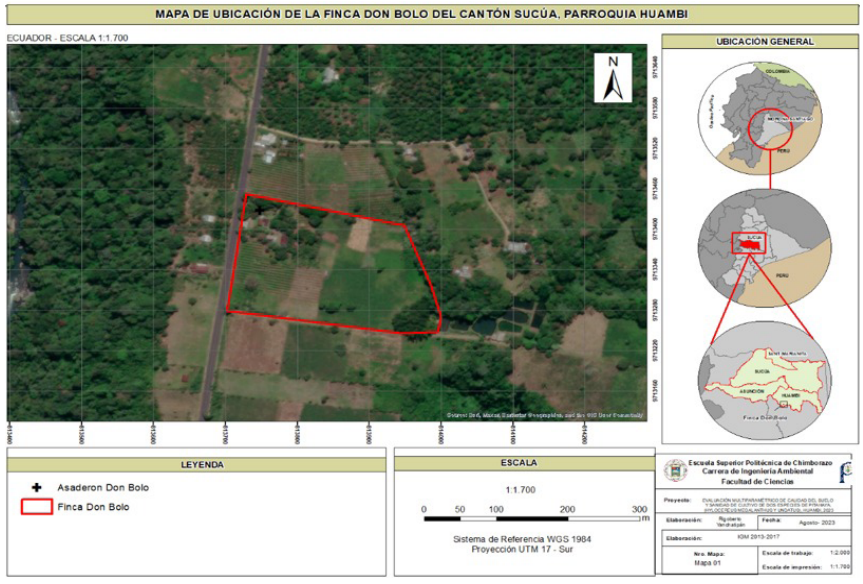



**Figura 1.** Mapa de ubicación y puntos de muestreo de la finca Don Bolo, Huambi, provincia de Morona Santiago, Ecuador. Fuente: elaboración propia

El área de estudio sembrada con la variedad amarilla tenía 0,41 ha, en tanto que la variedad roja ocupaba 0,6 ha; se reportaron 1.200 plantas, de las cuales se seleccionaron al azar 60 de cada variedad para evitar el efecto de borde. Se adoptó un enfoque mixto: el análisis cuantitativo se aplicó para determinar la calidad del suelo mediante la determinación del área de cultivo y los puntos de muestreo en el sitio, de manera visual, aplicando escalas de observación directa. El análisis de las muestras de suelo se hizo en el laboratorio de la ESPOCH. El análisis del estado fitosanitario de las variedades de pitahaya fue objeto de un estudio transversal que estableció la correlación comparativa de los diferentes parámetros mediante un diagrama de tipo ameba a partir de escalas definidas para determinar la sustentabilidad de las variedades.

***Determinación de los puntos de muestreo de suelos***

Se aplicó el método de zigzag siguiendo a **Mendoza & Espinoza** (2017) para determinar 13 puntos de muestreo a una profundidad de 0,20 m. Se obtuvo 1 kg con toda la codificación de la muestra para realizar el análisis en el laboratorio con base en la cartografía proporcionada por el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) e imágenes satelitales obtenidas con el programa SAS Planet Stable de Satellite.

Se emplearon indicadores específicos para evaluar las dos variedades de pitahaya mediante la metodología de **Altieri & Nicholls** (2002), la cual es versátil y puede ajustarse a una amplia variedad de ecosistemas. La elección de estos indicadores respondió a su practicidad y comprensibilidad para los agricultores, pues son precisos y de fácil interpretación, sensibles a los cambios ambientales y al impacto de las prácticas de manejo del suelo y del cultivo. Estos indicadores abarcan propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como su relación con los procesos del ecosistema (**Cabrera**, 2012; **González *et al.,*** 2019). Se seleccionaron 25 parámetros para evaluar la calidad del suelo; para la evaluación de la salud del suelo se determinaron diez parámetros, todos ellos adaptados a las condiciones biofísicas de la Amazonia ecuatoriana y de fácil comprensión para los productores locales.

Para determinar la s, cada indicador se evaluó de manera individual, asignándole un valor en una escala del 1 al 10 (donde 1 indica el valor menos deseado, 5 representa un valor medio y 10 corresponde al valor deseado) (**Peredo-Parada & Barrera-Salas**, 2019). Este proceso se ajustó a las características particulares del suelo o del cultivo, considerando los atributos relevantes de cada indicador (**Tabla 1**). Los resultados fueron muy beneficiosos para los productores, ya que les permitieron comprender el comportamiento de las fincas ante una respuesta ecológica y productiva superior o inferior a la de otras. Además, les brindaron información sobre las medidas que podrían implementar para mejorar los aspectos en los que los indicadores arrojaron valores bajos. Se trabajó con las siguientes ecuaciones:

$$Calidad\ del\ suelo: \frac{\sum total\ de\ cada\ indicador\ evaluado}{Número\ de\ indicadores\ totales} \quad [1]$$

$$Sanidad\ del\ cultivo: \frac{\sum total\ de\ cada\ indicador\ evaluado}{Número\ de\ indicadores\ totales} \quad [2]$$

**Tabla 1.** Índice de sostenibilidad

| Índice | Rango |
|---|---|
| Sustentable | 7,1 - 10 |
| Moderadamente sustentable | 4,1 - 7 |
| No sustentable | 1 - 4 |

Fuente: **Haro *et al.*** (2022)

En la evaluación de la sostenibilidad, comprendida como un conjunto de requisitos agroecológicos que deben cumplir las fincas, se aplicó la metodología expuesta por **Haro *et al.*** (2022), la cual recomienda sumar los valores obtenidos para cada indicador y dividir por el número total de indicadores evaluados, tanto para la calidad del suelo [Ecuación 1] como para la sanidad del cultivo [Ecuación 2]. La comparación de los valores finales se presenta en la **Tabla 1**. Este enfoque facilita la determinación del nivel de sostenibilidad de cada proceso a lo largo del tiempo, el cual se lleva a un gráfico de tipo ameba, con el fin de obtener un juicio de valor sobre los sistemas de producción agrícola.

Para comparar el resultado final de la calidad del suelo y la sanidad vegetal, se tomaron en cuenta los siguientes rangos: los valores de 1 a 3,9 se asimilaron a 1 como valor de ponderación bajo, de 4 a 6,9 se asimilaron a 5 como valor de ponderación medio, y de 7 a 9,9 se igualaron a 10 como valor de ponderación alto. Para comparar la valoración de los macronutrientes y micronutrientes de las dos especies de pitahaya se tomaron en cuenta los datos iniciales con sus respectivas unidades, es decir, los resultados en ppm y mEq/100 ml.

## Resultados y discusión

### *Evaluación de calidad del suelo*

La evaluación multiparamétrica del suelo y la sanidad de *Hylocereus megalanthus* y *H. undatus* permitió determinar relaciones edáficas y fitosanitarias determinantes para la sostenibilidad productiva en Huambi, Morona Santiago, Ecuador.

Según los resultados presentados en la **Tabla 2**, los valores de pH fueron de 5,88 para la pitahaya amarilla y de 5,99 para la pitahaya roja, es decir, un pH medianamente ácido, por lo que no hubo diferencias en las condiciones que pudieran afectar negativamente el suelo y el crecimiento de las plantas. Ello concuerda con lo expuesto por **Rodríguez *et al.*** (2019), quienes plantean que el pH óptimo para el cultivo de la pitahaya está entre 5,5 y 6,5.

En cuanto a la evaluación del color del suelo en estado húmedo, este tuvo una tonalidad marrón oscura tanto en el cultivo de la pitahaya amarilla como el de la roja, lo cual es positivo, ya que indica una buena retención de agua y presencia de humus y nutrientes. Esta tonalidad del suelo concuerda con lo reportado por **Patil *et al.*** (2014) en su estudio en la región amazónica, donde el color del suelo es marrón oscuro. Por otra parte, las tonalidades amarillas o pardo amarillentas sugieren la presencia de minerales ricos en hierro (**Eraso *et al.***, 2011). La variación en el color del suelo se debe a diferencias en la composición mineral o la cantidad de materia orgánica.

El suelo del cultivo de pitahaya amarilla registró una densidad aparente de 0,83 $gcm^{-3}$, en tanto que en el de pitahaya roja fue de 0,88 $gcm^{-3}$, es decir, sin diferencia significativa, considerándose ambas adecuadas para el desarrollo del cultivo. Estos valores se asemejan a los hallados por **Cristache *et al.*** (2018), en los que el suelo analizado registró un valor de 0,80 $gcm^{-3}$, lo que se debe a la distribución de los tamaños de los poros y la conductividad hidráulica, que puede variar según el uso del suelo, la localidad y la profundidad.

En cuanto a la textura del suelo, en el cultivo de pitahaya amarilla se determinó un porcentaje de arena de 47 %, de limo de 35 % y de arcilla de 18 %, clasificándose como un suelo franco, en tanto que en el de pitahaya roja el porcentaje de arena fue de 51 %, el de limo 25 % y el de arcilla 24 %, clasificándose como un suelo franco-arenoso-arcilloso; estos porcentajes concuerdan con los hallados por **Díaz** (2005) y **García *et al.*** (2012). Los cultivos de pitahaya se desarrollan mejor en suelos francos y franco-arenoso-arcillosos por su buen drenaje y buena disponibilidad de humedad.

El suelo donde se sembró la pitahaya amarilla tenía un nivel ligeramente más alto de materia orgánica (12 %) que el de la pitahaya roja (10,84 %), lo que concuerda con lo expuesto por **González *et al.*** (2020) en cuyo estudio la materia orgánica en el suelo analizado fue de 12,1 %, fundamentalmente debido a las condiciones edafoclimáticas y la acumulación de residuos animales y vegetales propios de la Amazonía.

**Tabla 2.** Resultados de evaluación de calidad de suelo en los cultivos de pitahaya amarilla y pitahaya roja

| Parámetros | Pitahaya amarilla | | | | Pitahaya roja | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Resultados | Unidad | Valor | Ponderación | Resultados | Unidad | Valor | Ponderación |
| pH | 5,88 | Adim. | 10 | Alto | 5,99 | Adim. | 10 | Alto |
| Color del suelo | 10 YR 3/3 – Húmedo | Adim. | 10 | Alto | 10YR 3/3 - Húmedo | Adim. | 10 | Alto |
| Densidad aparente | 0,83 | $gcm^{-3}$ | 10 | Alto | 0,88 | $gcm^{-3}$ | 10 | Alto |
| Textura del suelo | Franco | Adim. | 10 | Alto | Franco arenoso-arcilloso | Adim. | 10 | Alto |
| Materia orgánica | 12 | % | 10 | Alto | 10,84 | % | 10 | Alto |
| Compactación | Estructura con poros | Adim. | 5 | Medio | Estructura con pocos poros | Adim. | 5 | Medio |
| Cobertura del suelo | 30 | % | 5 | Medio | 30 | % | 5 | medio |
| Estado de los residuos | En descomposición | Adim. | 5 | Medio | En descomposición | Adim. | 5 | Medio |
| Infiltración | 0,95 | $cmh^{-1}$ | 5 | Medio | 1,08 | $cmh^{-1}$ | 5 | Medio |
| Profundidad de la capa arable | 9 | cm | 1 | Bajo | 10 | cm | 1 | Bajo |
| Profundidad de las raíces | 20 | cm | 5 | Medio | 20 | cm | 5 | Medio |
| Retención de humedad | 78 | % | 10 | Alto | 58 | % | 10 | Alto |
| Erosión | Sin erosión | Adim. | 10 | Alto | Sin erosión | Adim. | 10 | Alto |
| Actividad biológica | 0,5 | Adim. | 1 | Bajo | 0,65 | Adim. | 1 | Bajo |
| Amonio ($NH_4$) | 39,1 | ppm | 5 | Medio | 28,2 | ppm | 5 | Medio |
| Fósforo (P) | 16,3 | ppm | 5 | Medio | 22,6 | ppm | 10 | Alto |
| Boro (B) | 0,33 | ppm | 1 | Bajo | 0,29 | ppm | 1 | Bajo |
| Potasio (K) | 0,84 | meq/100 mL | 10 | Alto | 0,34 | meq/100 mL | 5 | Medio |
| Calcio (Ca) | 15,59 | meq/100 mL | 10 | Alto | 15,73 | meq/100 mL | 10 | Alto |
| Magnesio (Mg) | 1,52 | meq/100 mL | 5 | Medio | 1,56 | meq/100 mL | 5 | Medio |
| Zinc (Zn) | 10,72 | ppm | 10 | Alto | 7,69 | ppm | 10 | Alto |
| Cobre (Cu) | 22,01 | ppm | 10 | Alto | 20,03 | ppm | 10 | Alto |
| Hierro (Fe) | 128,70 | ppm | 10 | Alto | 107,40 | ppm | 10 | Alto |
| Manganeso (Mn) | 10,72 | ppm | 5 | Medio | 7,69 | ppm | 5 | Medio |
| Azufre (S) | 7,03 | ppm | 1 | Bajo | 3,32 | ppm | 1 | Bajo |
| Total | | | 6.7 | Medio | Total | | 6,7 | Medio |

Adim.: adimensional

La compactación e infiltración de agua en los dos suelos fueron de valor medio: el de la pitahaya roja presentaba una tasa de infiltración ligeramente superior (1,08 $cmh^{-1}$ frente a 0,95 $cmh^{-1}$), lo que concuerda con **Rivera *et al.*** (2018), quienes reportaron valores medios en su estudio que permitían una penetración de agua por capilaridad más rápida y eficiente.

La cobertura del suelo en los dos cultivos de pitahaya es moderada, con un valor del 30 %, concordando con el estudio realizado por **Raffo *et al.*** (2021) y **Salinas-Crespo** (2012). Estos autores anotan que la cobertura del suelo es esencial para ayudar a reducir la erosión, mantener la humedad y una temperatura constante en el suelo, así como el desarrollo de las raíces y la actividad microbiana. En los dos sistemas de producción, el valor del estado de residuos fue medio, siendo equivalentes en los dos procesos, ya que la actividad de los microorganismos y el proceso de degradación de los residuos generaron ventajas comparativas en el desarrollo del cultivo, lo cual coincide con las recomendaciones de **Raffo *et al.*** (2021) sobre la evaluación y sustentabilidad en fincas de producción de pitahaya con manejo orgánico y convencional.

En el suelo del cultivo de pitahaya amarilla, la profundidad de la capa arable era de 9 cm, por lo que se clasificó como de rango bajo, en tanto que la profundidad de la capa arable en el cultivo de pitahaya roja era ligeramente mayor a 10 cm, es decir, de nivel bajo, lo que se asemeja a lo reportado por **Bermeo & Dioses** (2020), en cuyo estudio los valores obtenidos fueron de 10 cm y los horizontes eran superficiales, lo que limitaba el crecimiento de las raíces y la disponibilidad de nutrientes, siendo esto una desventaja equivalente para el anclaje y desarrollo de las raíces.

En los suelos de cultivo de las dos especies el desarrollo de las raíces se clasificó como medio, con una longitud de 20 cm, y sin diferencias significativas. Estos valores se asemejan a los del estudio de **Raffo *et al.*** (2021), en el cual la longitud de las raíces fue de 5 a 25 cm y el área de expansión de aproximadamente 30 cm; en consecuencia, las raíces de las dos variedades tuvieron un crecimiento regulado por el tamaño de la capa arable.

En cuanto al parámetro de retención de la humedad, el suelo del cultivo de pitahaya amarilla presentó una retención de humedad del 78 % y el cultivo de pitahaya roja del 58 %, lo que se considera bueno y se asemeja a los valores encontrados por **Bejar *et al.*** (2020), con una humedad del suelo de 70 %, es decir, alta, lo que asegura un buen proceso de conservación de la humedad y de manejo sostenible de suelo.

En cuanto a la erosión, en ninguno de los dos cultivos se evidenció este proceso, lo que los cataloga dentro de un rango alto y concuerda con los hallazgos de **Noellemeyer *et al.*** (2021), en cuyos suelos de estudio se movilizaban partículas pequeñas en presencia de viento o en momentos de labranza, es decir, una erosión baja.

Según los datos presentados, tanto en el cultivo de pitahaya amarilla como en el de pitahaya roja, la actividad biológica del suelo se ha clasificado como baja, concordando con lo analizado por **Pinos** (2022) en su estudio con respecto a la calidad del suelo medida con indicadores físicos y químicos aplicados a tres usos. Ese estudio encontró que la actividad microbiana era baja por el exceso de agroquímicos y su acumulación en el suelo, lo que resulta en una presencia limitada de organismos beneficiosos para el suelo y la planta, lo que restringe las interacciones que los favorecen.

El análisis del contenido de ion amonio en los suelos de cultivo de pitahaya amarilla arrojó un valor de 64,9 $kgha^{-1}$, para la variedad roja fue de 70,5 $kgha^{-1}$, lo que los sitúa en el mismo rango medio. Este elemento puede ser asimilado por los vegetales de manera directa, lo que concuerda con lo analizado por **Schloter *et al.*** (2003) en su estudio sobre los efectos agrobiológicos de coberturas verdes en el cultivo de pitahaya donde demuestran que el rango medio equivale a una disminución del contenido de materia orgánica, lo que lleva a que los nutrientes sean menos accesibles para su absorción.

El contenido de fósforo en los suelos de cultivo de pitahaya amarilla presentó un nivel de 27,1 $kgha^{-1}$, catalogado como medio, mientras que en los de la pitahaya roja el contenido fue mayor, con 56,5 $kgha^{-1}$, clasificado como alto, lo que implica una diferencia

significativa y concuerda con lo hallado por **Mejía & Montes** (2006), quienes señalan que el contenido de fósforo en su estudio dependió de la presencia de las arcillas alófanas de origen volcánico que fijan de forma irreversible el ion fosfato.

El contenido de boro en los suelos del cultivo de pitahaya amarilla fue de 0,5 $kgha^{-1}$ y en los de pitahaya roja, 0,7 $kgha^{-1}$, lo que se clasifica como bajo, y concuerda lo expuesto por **Ortiz *et al.*** (2021). La carencia de boro genera problemas fisiológicos y de crecimiento de los frutos, ya que este elemento es necesario para el cuajado de los frutos y el desarrollo de las semillas.

En el análisis del potasio en los suelos de cultivo de la pitahaya amarilla, se encontró un valor catalogado como alto, de 0,84 meq/100 mL, en tanto que en los de pitahaya roja, se halló un valor catalogado como medio, de 0,34 meq/100 mL. **Ortiz *et al.*** (2021) señalan que la concentración de potasio baja debido a factores como la cantidad de materia orgánica, el pH y la textura de los suelos.

El contenido de calcio en el suelo de cultivo de las dos variedades de pitahaya se clasificó como alto. **Ortiz *et al.*** (2021) han planteado que este nutriente es importante para el desarrollo de la pitahaya e interviene en la división y la estabilidad de las paredes celulares, el crecimiento, el llenado y la calidad de la fruta.

El contenido de magnesio en el suelo de cultivo de las dos variedades de pitahaya se catalogó como medio. **Ortiz *et al.*** (2021) explican cómo este elemento cumple funciones importantes en la planta, como la activación enzimática y el constituyente de la clorofila, así como el transporte y la movilidad del fósforo.

El zinc en los suelos de siembra de la pitahaya amarilla tuvo un valor de 10,72 ppm, en tanto que en los de la pitahaya roja fue de 7,69 ppm, lo que se cataloga como alto. **Ortega** (2009) señala que el zinc participa en la formación de auxinas que estimulan el crecimiento y, dado que su contenido fue alto en los dos cultivos, los frutos tendrán un tamaño y forma uniformes y, además, será mayor la resistencia a las enfermedades.

El cobre disponible en los suelos de cultivo de la pitahaya amarilla fue de 22,01 ppm y en los de la pitahaya roja, de 20,03 ppm. **Ortega *et al***. (2022) aclaran que este elemento estimula el crecimiento, reduce el riesgo de plagas y enfermedades, mejora la polinización y la fertilización, e interviene en la síntesis de azúcares y de vitamina C, lo que, en consecuencia, mejora el rendimiento.

El contenido de hierro en los suelos de cultivo de pitahaya amarilla fue de 128,70 ppm y en los de pitahaya roja, de 107,40 ppm, es decir, altos. **Ortega *et al.*** (2022) señalan que este nutriente participa en la formación de clorofila y mejora la viabilidad del polen, lo que asegura una buena calidad, forma, color y tamaño de los frutos.

El manganeso disponible en los suelos del cultivo de pitahaya amarilla fue de 10,72 ppm y en los de pitahaya roja, 7,69 ppm, lo que los clasifica como de valor medio. **Ortiz *et al.*** (2021) aclaran que cuando su contenido es medio puede limitar el desarrollo y la productividad del cultivo.

El azufre en los suelos del cultivo de pitahaya amarilla fue de 7,03 ppm y en los de pitahaya roja de 3,32 ppm, es decir, un contenido pobre, lo que concuerda con lo hallado en el estudio de **Ortiz *et al.*** (2021). Los bajos niveles de azufre afectan negativamente el rendimiento y calidad de los cultivos, limita el crecimiento de las plantas, el número de flores y la viabilidad de polen, y provoca caídas de frutos.

### *Evaluación de la sanidad del cultivo*

En la evaluación de la sanidad del cultivo se propusieron diez indicadores evaluados el sitio (**Tabla 3**).

Según los resultados (**Tabla 3**; **Figura 2**), los suelos de cultivo de la pitahaya amarilla y la pitahaya roja tenían una apariencia calificada como buena, con un follaje verde intenso y sin signos de deficiencia ni ataque de plagas y enfermedades, lo que coincide con lo hallado por **Vargas *et al.*** (2018) en su estudio de la pitahaya en la Amazonía ecuatoriana, cuyos cultivos presentaban suelos de buena apariencia, asociada con factores como su adecuada aireación, niveles apropiados de humedad y materia orgánica y presencia de nutrientes esenciales.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):790-803, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4038

La incidencia de enfermedades y plagas tanto en el cultivo de pitahaya amarilla como en el de pitahaya roja fue baja, menor al 20 %, aunque se registraron síntomas leves en algunas plantas, es decir, las dos especies clasificaban como resistentes. Al comparar con el estudio de **Raffo *et al.*** (2021), que evaluó la sustentabilidad en fincas de producción de pitahaya manejadas tanto de forma orgánica como convencional, la presencia de plagas y enfermedades afectó significativamente la producción y la calidad de la fruta debido a la ausencia de prácticas de manejo adecuadas, de monitoreo regular y de control biológico.

**Tabla 3.** Resultados de sanidad en los cultivos de pitahaya amarilla y pitahaya roja

| Parámetros | Pitahaya amarilla | | Pitahaya roja | |
|---|---|---|---|---|
| | Valoración | Ponderación | Valoración | ponderación |
| Apariencia | 10 | Alto | 10 | Alto |
| Incidencia de enfermedades y plagas | 10 | Alto | 10 | Alto |
| Competencia por malezas | 10 | Alto | 10 | Alto |
| Resistencia o tolerancia al estrés | 10 | Alto | 10 | Alto |
| Rendimiento actual o potencial | 10 | Alto | 10 | Alto |
| Sistema agrosilvopastoril | 10 | Alto | 10 | Alto |
| Diversidad vegetal | 1 | Bajo | 10 | Alto |
| Crecimiento del cultivo | 10 | Alto | 10 | Alto |
| Sistema de manejo | 1 | Bajo | 1 | Bajo |
| Diversidad natural circundante | 5 | Medio | 1 | Bajo |
| Total | | 7,7 | | 8,2 |

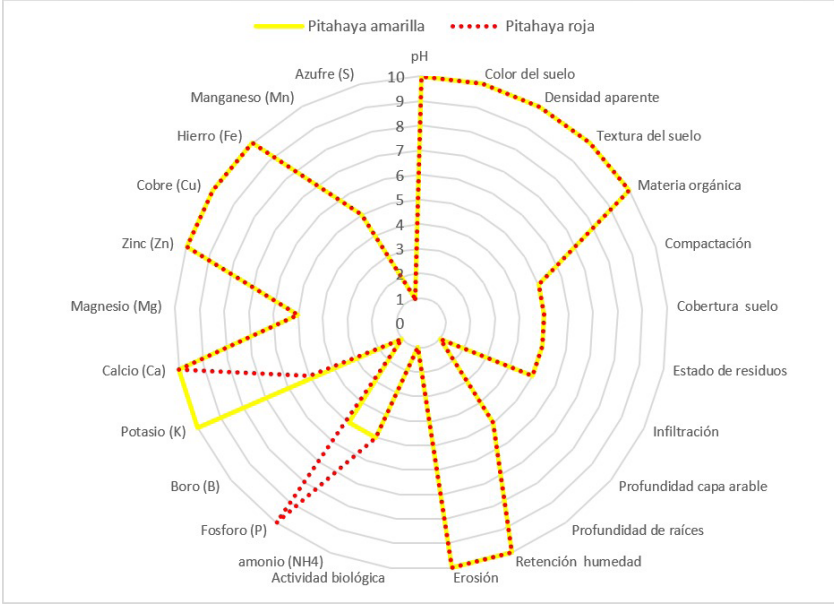



**Figura 2.** Indicadores de la calidad del suelo en los cultivos de pitahaya amarilla *vs*. los de pitahaya roja. Fuente: elaboración propia

La competencia por malezas en ambos sistemas de cultivo de la pitahaya se calificó como alta, y se observó un cultivo vigoroso que se sobreponía a las malezas. Esto concuerda con lo analizado por **Raffo *et al.*** (2021), quienes señalan que un buen control de malezas evita la competencia para el cultivo y permite un desarrollo y una productividad normales.

La evaluación de la resistencia o tolerancia al estrés en los cultivos de las dos especies de pitahaya se calificó de alta, pues soportaron lluvias intensas. Algo similar encontraron **Verona *et al.*** (2020); en su estudio las plantas fueron capaces de sobrellevar condiciones climáticas adversas, asunto crucial para mantener la salud y el rendimiento del cultivo sin generar una competencia perjudicial en ninguno de los dos casos.

El rendimiento actual o potencial en las dos especies de pitahaya tuvo una ponderación alta en comparación con el promedio de la zona del cultivo (**Tabla 3**), tal como lo observaron **Verona *et al.*** (2020) en su estudio de evaluación de la calidad de las plantas, lo que atribuyeron a la presencia de nutrientes esenciales en el suelo que garantizan un buen desarrollo y rendimiento de los cultivos de pitahaya.

En cuanto al sistema agrosilvopastoril, su manejo se ponderó como adecuado en los cultivos de las dos especies de pitahaya. **Contreras *et al*.** (2023) puntualizan en su estudio de los sistemas silvopastoriles cómo aquellos implementados en la Amazonía mejoraron la salud del suelo mediante la integración de árboles, cultivos y pastoreo en la misma área, proporcionando beneficios como la diversificación, la conservación del suelo y la sostenibilidad.

La diversidad vegetal de la pitahaya amarilla registró un valor bajo, que corresponde a la de un monocultivo sin presencia de sombra, en comparación con la pitahaya roja, que tuvo un valor alto por la presencia de más de dos especies de sombra, además de otros cultivos o malezas dominantes. En su estudio **Raffo *et al.*** (2021) plantean que la diversidad en una finca es deseable, ya que mejora las condiciones de crecimiento, da sombra, especialmente de otras especies vegetales, y proporciona beneficios como la conservación del suelo, la regulación de la temperatura y la mantención de hábitats aptos para fauna benéfica.

El crecimiento de los cultivos de las dos especies de pitahaya se reportó como bueno, observándose un cultivo denso, uniforme, de buen crecimiento, con ramas y tallos gruesos y uniformes, similar al de los cultivos reportados por **Verona *et al.*** (2020) en su estudio.

En cuanto al sistema de manejo, este registró un valor bajo en los cultivos de las dos especies de pitahaya, pues se trataba de monocultivos convencionales manejados con agroquímicos. Esto guarda estrecha relación con lo hallado por **Contreras *et al.*** (2023), quienes concluyeron que las labores y prácticas llevadas a cabo eran insuficientes o inadecuadas, con gestiones de tipo convencional, dependientes de agroquímicos.

La diversidad natural circundante del cultivo de pitahaya amarilla obtuvo un valor de 5, catalogado como moderado; se encontró que estaba rodeado por vegetación natural en uno de los lados, por lo menos, en comparación con el de pitahaya roja, cuya puntuación fue de 1, es decir, baja, pues el cultivo estaba rodeado por otros cultivos, campos baldíos o carretera. Esto concuerda con lo analizado por **Raffo *et al.*** (2021) en su estudio de evaluación y análisis de la sustentabilidad en fincas de producción de pitahaya con manejo orgánico y convencional (**Figura 3**).

El análisis de la sustentabilidad con base en los promedios que se presentan en la **Tabla 4** concluyó que en el cultivo de pitahaya amarilla la calidad del suelo presentaba una sustentabilidad moderada, con un valor de 6,7, y una sanidad de cultivo de 7,7, siendo este un parámetro sustentable. En cuanto a la variedad de pitahaya roja, el análisis de calidad del suelo reflejó un valor de 6,7, correspondiente a una sustentabilidad moderada, en tanto que la sanidad del cultivo obtuvo un valor de 8,2, correspondiente a sustentable.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):790-803, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4038

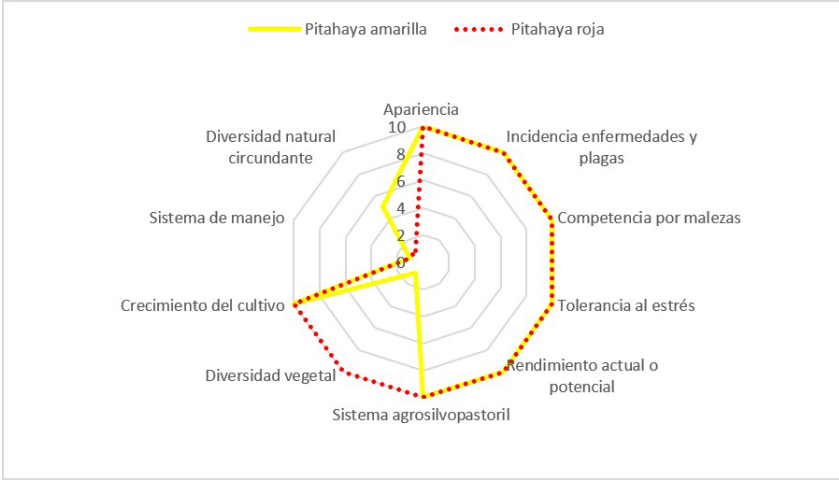



**Figura 3.** Indicadores sanidad del cultivo de pitahaya amarilla *vs.* el de pitahaya roja. Fuente: elaboración propia

**Tabla 4.** Resultados de la sustentabilidad de los dos cultivos de pitahaya

| Rangos | Ponderación | Pitahaya amarilla | | Pitahaya roja | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Calidad de suelo | Sanidad de cultivo | Calidad de suelo | Sanidad de cultivo |
| 7,1 - 10 | Buena | | 7,7 | | 8,2 |
| 4,1 - 7 | Moderada | 6,7 | | 6,7 | |
| 1 - 4 | Mala | | | | |

Fuente: elaboración propia

## Conclusiones

La calidad del suelo y la sanidad vegetal se evaluaron mediante indicadores físicos, químicos y biológicos después de determinar y seleccionar aquellos más pertinentes para los cultivos de pitahaya *(Hylocereus megalanthus* y *H. undatus)*. El análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo en el cultivo de pitahaya amarilla *(H. megalanthus)* de la finca Don Bolo registró contenidos medios en amonio, fósforo, magnesio y manganeso, y contenidos bajos en boro y azufre. El resto de los nutrientes se encontraron en concentraciones adecuadas para la nutrición vegetal; dado que este suelo tiene una textura franca, se registró una densidad aparente de 0,83 $g^{cm-3}$ y un pH medianamente ácido, lo que indica condiciones no compactadas, propicias para el suelo. El cultivo de pitahaya roja *(H. undatus)* presentó contenidos medios de amonio, potasio, magnesio y manganeso, y contenidos bajos en boro y azufre; su textura es de un suelo franco-arenoso-arcilloso, con una densidad aparente de 0,88 $g^{cm-3}$ y un pH medianamente ácido.

Con respecto a la actividad microbiana, en los cultivos de las dos especies de pitahaya (*H. megalanthus* y *H. undatus*) se observó escasa presencia de invertebrados, lo que se debe al uso excesivo de fertilizantes químicos y pesticidas sintéticos, los cuales afectan negativamente la actividad de los microorganismos beneficiosos y los procesos que estos realizan en el suelo.

En cuanto a la sanidad del cultivo, el sistema de manejo obtuvo una puntuación baja, pues se trataba de un sistema convencional. En el cultivo de la variedad amarilla la diversidad vegetal se reportó como baja y la diversidad natural circundante como media, en tanto que en el de la variedad roja la diversidad natural circundante fue baja.

La sustentabilidad de las dos variedades de pitahaya se midió asignando escalas (1) (5) (10) a cada indicador. Los resultados establecieron que el cultivo de pitahaya amarilla presentaba una sustentabilidad moderada en el parámetro de calidad del suelo, con un valor de 6,7, y la sanidad de cultivo era sustentable, con un valor de 7,7. En cuanto a la variedad de pitahaya roja, el análisis de la calidad del suelo reflejó una sustentabilidad moderada, con un valor de 6,7, y la sanidad del cultivo registró un valor de 8,2, es decir, sustentable.

## Agradecimientos

Agradecemos a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y al Grupo de Investigación Innovación Tecnología Morona Santiago, por permitir la realización de esta investigación.

## Contribución de los autores

**J.P.H.A**: conceptualización, curaduría de datos, análisis formal, investigación, metodología. **C.V.H.V:** conceptualización, curaduría de datos**, v**alidación, escritura y revisión. **W.E.C.B:** conceptualización, curaduría de datos, validación. **J.A.A.T:** análisis y toma de datos, validación en campo. **M.A.O.R.: p**royecto, administración, supervisión de recursos.

## Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## Referencias

**Abawi, G. S. & Widmer, T. L.** (2000). Impacto de las prácticas de manejo de la salud del suelo en los patógenos transmitidos por el suelo, los nematodos y las enfermedades de las raíces de los cultivos hortícolas. *Ecología Aplicada del Suelo, 15*(1), 37-47. https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00070-6

**Abi-Saab Arrieche, R., Ponce Clavijo, N. L.** (2012). *Evaluación de la calidad del suelo, en el sistema productivo orgánico la estancia, Madrid, Cundinamarca*. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales.

**Altieri, M. A. & Nicholls C. I.** (2002). Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología, 64*, 17-24.

**Altieri, M. A. & Nicholls, C. I.** (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: Principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología, 8*(1), 7-20. https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/182921

**Balendres, M. A. & Bengoa, J. C.** (2019). Enfermedades de la pitahaya (*Hylocereus species*): Etiología y opciones de manejo actuales. *Protección de Cultivos, 126*, 104920. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104920

**Bejar, S. J., Cantú, I., Yáñez, M. I., Luna, E. O.** (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 11*(59), 31-50. https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666

**Bermeo, T. B. & Dioses, D. Y.** (2020). *Influencia de la edad del cultivo de pitahaya amarilla (Selenicereus megalanthus (K. Schum. Ex Vaupel) Moran) en la fertilidad del suelo, Cantón Palora, Provincia Morona Santiago*. Undergraduate thesis, Universidad Estatal Amazónica.

**Bonilla, N. J., Gutiérrez-Barranquero, J. A., De Vicente, A., Cazorla, F. M.** (2012). Mejora de la calidad del suelo y la salud de las plantas mediante enmiendas orgánicas supresoras. *Diversidad*, 4(4), 475-91. https://doi.org/10.3390/d4040475

**Cabrera, G.** (2012). La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo. Resultados obtenidos en Cuba. *Pastos y Forrajes, 35*(4), 346-63.

**Contreras, J. L., Martínez, J., Rodríguez, J. L., Barragán, W., Garrido, J., Falla-Guzmán, C. K.** (2023). Índice de calidad del suelo bajo sistemas agropecuarios en el bosque seco tropical - Colombia. *Revista Tierra Latinoamericana, 41*, 1-18. https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1694

**Cristache, S.-E., Vuță, M., Marin, E., Cioacă, S.-I., Vuță, M.** (2018). Agricultura ecológica frente a agricultura convencional: un paradigma para el desarrollo sostenible de los países europeos. *Sostenibilidad, 10*(11), 4279. https://doi.org/10.3390/su10114279.

**Díaz, J. (**2005). Biología y manejo postcosecha de pitahaya roja y amarilla (*Hylocereus* spp. y *Selenicereus* spp.). *La Calera, 5*(6), 44-49.

**García, Y., Ramírez, W., Sánchez. S.** (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes, 35*(2),125-38.

**Gomiero, T., Paoletti, M. G., Pimentel, D.** (2008). Problemas energéticos y ambientales en la agricultura orgánica y convencional. *Reseñas críticas en ciencias vegetales, 27*(4), 239-54. https://doi.org/10.1080/07352680802225456.

**Gomiero, T.** (2019). Manejo del suelo y de los cultivos para ahorrar alimentos y mejorar la seguridad alimentaria. En C. M. Galanakis (ed.), *Ahorro de alimentos (*pp. 33-87). Academic Press.

**González, C., Jara, M., Fuenzalida, I., Rivas, F.** (2020). *Estudios de infiltración y determinación de la constante de permeabilidad en los suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca*. Universidad de Talca.

**González, V., Bravo, C., Romero, M., Andrade, S., Andino, M., Valle, A., Hidalgo- Guerrero, I., Andrade, V.** (2019). Evaluación de la calidad de los suelos en cultivares de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en la parroquia Fátima provincia de Pastaza. *Ciencia y Tecnología, 12*(2),15-22. https://doi.org/10.18779/cyt.v12i2.322.

**Haro, J. P., Osorio, M. A., Vivar, M. A., Jácome, S. P., Narváez, J. M.** (2022). Evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción de la agricultura familiar, cantón Penipe, Ecuador, 2021. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 25*(3). https://doi.org/10.56369/tsaes.4331

**Jeronimo, M. C., Costa-Orsine, J. V., Novaes, M. R. C. G. (**2017). Características nutricionales, farmacológicas y toxicológicas de la pitahaya (*Hylocereus undatus*): Una revisión de la literatura. *Revista Africana de Farmacia y Farmacología, 11*(27), 300-304. https://doi.org/10.5897/AJPP2016.4582.

**Jiménez, R.** (2017). *Introducción a la contaminación de suelos*. Ediciones Mundi-Prensa.

**Mejía, L. A. & Montes, C. E.** (2006). *Efecto de tres especies de leguminosas sobre la dinámica poblacional, abundancia, diversidad de malezas y su aporte de (NPK) a partir de la materia orgánica al suelo en el cultivo de la pitahaya (Hylocereus undatus Britton y Rose)*. Undergraduate thesis. Universidad Nacional Agraria, Nicaragua.

**Mendoza, R. & Espinoza, A.** (2017). *Guía Técnica para muestreo de suelos*. Universidad Nacional Agraria and Catholic Relief Services, Nicaragua.

**Noellemeyer, E., Álvarez, L., Leizica, E., Gómez, F, Quiroga, A, Fernández, R., Frasier, I., Álvarez, C.** (2021). *Guía para la evaluación visual de la calidad del suelo*. Universidad Nacional de la Pampa and INTA Anguil, La Pampa.

**Ortega, G.** (2009). *Agroecología vs. agricultura convencional*. BASE Investigaciones Sociales, Asunción.

**Ortega, J.G., Zambrano, A., Velázquez, R. V., Merchán García, W.** (2022). Análisis físico y químico de los suelos agrícolas del Sur de Manabí y su relación con los cultivos (Original). *ROCA. Revista Científico-Educacional de la Provincia Granma, 18*(3).

**Ortiz, M., Delatorre Castillo, J. P., Sepúlveda, I., Low, C., Ruiz, K. B., Delatorre Herrera, J.** (2021). Efectos de distintas concentraciones de boro y pH en el crecimiento de *Zea mays* var. Capia blanco, un maíz ancestral de Chile. *Idesia (Arica), 39*(2), 111-19. https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000200111

**Patil, S., Reidsma, P., Shah, P., Purushothaman, S., Wolf, J.** (2014). Comparación de la agricultura convencional y orgánica en Karnataka, India: ¿Dónde y cuándo puede ser sostenible la agricultura orgánica? *Política de uso de la tierra*,*37*, 40-51. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.01.006

**Peredo-Parada, S. & Barrera-Salas, C.** (2019). Evaluación participativa de la sustentabilidad entre un sistema campesino bajo manejo convencional y uno agroecológico de una comunidad Mapuche de la Región de la Araucanía (Chile). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo, 51*(1), 323-36.

**Pinos, S. D.** (2022). *Calidad del suelo a partir de indicadores físicos y químicos aplicado a tres usos de suelo para la generación de propuestas de gestión por impactos en el suelo por acciones antrópicas en el bosque y vegetación protectores de Sunsun - Yanasacha*. Tesis de pregrado. Universidad Politecnica Salesiana, Cuenca.

**Quimis-Gómez, A. J., Jaramillo-Véliz, J. J., De Las Mercedes-Álvarez-Gutiérrez, Y., Rodríguez-Avilés, A. J**. (2018). Calidad del suelo empleado con fines agrícolas en el Valle de Joa, Cantón Jipijapa. *Polo del Conocimiento, 3*(5), 31. https://doi.org/10.23857/pc.v3i5.477

**Vallejo-Quintero, V. E.** 2013. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos a través del componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal, 16*(1), 83-99. https://doi.org/ 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06

**Raffo, L. A., Torres, L. A, Beltrán, D. S., Macías, J. C.** (2021). Producción de pitahayas con manejo orgánico y convencional: Una propuesta de sustentabilidad. *Polo del Conocimiento: Revista Científico - Profesional, 6*(11), 1004-21.

**Rivera, J. S., Delgado-Dallatorre, Y., Zaldívar, J. M.** (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático, 4*(7), 889-896.

**Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., Pennock, D.** (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta.* FAO, Roma.

**Salinas Crespo, S. I.** (2012). Evaluación fenológica, foliar y productiva del pasto Toledo (*Brachiaria Brizantha* CV) con fertilización orgánica, en el Cantón Pablo VI (Morona Santiago). Tesis de pregrado. Universidad Estatal Amazónica.

**Schloter, M., Dilly, O., Munch J. C.** (2003). Indicadores para evaluar la calidad del suelo. *Agricultura, Ecosistemas y Medio Ambiente, 98*(1), 255-62. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00085-9

**Średnicka-Tober, D., Obiedzińska, A., Kazimierczak, R.** (2016). Impacto ambiental de la agricultura orgánica frente a la convencional: una revisión. *Revista de Investigación y Aplicaciones en Ingeniería Agrícola. 61*(4), 204-11.

**Toro, J. A. L., Quevedo-Guerrero, J. N., García-Batista, R. M.** (2023). Evaluación de dos variedades de pitahaya bajo manejo integrado usando biocarbón y microorganismos eficientes. *Revista Científica Agroecosistemas, 11*(1),100-106.

**Vargas, Y. B., Prado, J. K., Nicolalde, J., Casanoves, F., De Melo-Virginio, E., Viera, W.** (2018). Caracterización y rol de los frutales amazónicos en fincas familiares en las provincias de Sucumbíos y Orellana (Ecuador). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 19*(3), 485-99.

**Verona, A., Urcia, J., Paucar-Menacho, L. M.** (2020). Pitahaya (*Hylocereus spp*.): Cultivo, características fisicoquímicas, composición nutricional y compuestos bioactivos. *Scientia Agropecuaria, 11*(3), 439-53. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.16.

**Vivar-Arrieta, M. A., Haro-Altamirano, J. P., Carrillo Barahona, W. E., López Sampedro, S. E., Usmanovich, B. A., Usmonov, B., Kizi, M. S. U.** (2023). Evaluación multicriterio de sistemas agrícolas familiares ancestrales, provincia de Chimborazo, Ecuador. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, *21*(5), 1123-34. https://doi.org/10.22124/cjes.2023.7400.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):804-820, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3222



Artículo original

# Estado ecológico del humedal Torca-Guaymaral basado en un índice de integridad biótica desarrollado para la comunidad fitoplanctónica

## Ecological status of the Torca-Guaymaral wetland based on a biotic integrity index developed for the phytoplankton community

**Camilo Fonseca-Barreto, Camilo B. García, Gabriel Pinilla-Agudelo***

Grupo de investigación "Biodiversidad, biotecnología y conservación de ecosistemas", Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

## Resumen

La integridad biótica del fitoplancton depende de las condiciones ambientales y es, asimismo, un indicador de la salud del ecosistema. En el presente estudio se tomaron muestras de fitoplancton y se registraron variables físicas y químicas en nueve estaciones del humedal Torca-Guaymaral tanto en la temporada seca como en la de lluvias. Se detectó un gradiente de contaminación en los sitios menos deteriorados del sector de Torca, así como en las estaciones más impactadas en la sección de Guaymaral. De 67 atributos del fitoplancton, se preseleccionaron 27 y, finalmente, se escogieron nueve métricas para la elaboración del índice de integridad biótica (IIB) del fitoplancton. El IIB reflejó adecuadamente la heterogeneidad espacial del sistema, identificando las estaciones con quebradas como sitios con buena integridad biótica, en tanto que algunos ambientes lénticos y de canal se consideraron áreas con menor integridad. Al parecer, las condiciones lóticas favorecen una mejor calidad del agua, mientras que los otros hábitats tienden a acumular contaminantes, lo que podría afectar la integridad del fitoplancton. El promedio general del IIB no mostró diferencias significativas entre las épocas climáticas, lo que sugiere una relativa estabilidad funcional del fitoplancton frente a la variación estacional. No obstante, las fluctuaciones a nivel local apuntan a la necesidad de hacer monitoreos de mayor resolución espacial y temporal. El índice propuesto es una primera aproximación que debe asumirse con precaución, pero constituye una herramienta útil para el seguimiento ecológico del humedal Torca-Guaymaral y aporta información importante para la implementación de evaluaciones bióticas en los humedales urbanos de Bogotá.

**Palabras clave:** atributos comunitarios; calidad del agua; humedales andinos; microalgas planctónicas; salud ecosistémica.

## Abstract

The biotic integrity of phytoplankton communities depends on environmental conditions and serves as an indicator of ecosystem health. Here, we collected phytoplankton samples and recorded physical and chemical variables at nine stations in the Torca-Guaymaral wetland during both the rainy and dry seasons. We detected a pollution gradient from the least-deteriorated sites in the Torca sector to the most-impacted stations in the Guaymaral section. Of 67 phytoplankton attributes, we preselected 27 and determined nine metrics to develop a biotic integrity index (BII) for the wetland phytoplankton. The BII accurately reflected the system's spatial heterogeneity, identifying stream stations as sites with good integrity and some lentic and channel environments as areas with lower integrity. Apparently, lotic conditions favor water quality, while the other habitats tend to accumulate pollutants, which could affect phytoplankton integrity. The overall average BII did not differ significantly among climatic seasons, suggesting phytoplankton relative functional stability in the face of seasonal variation. However, local fluctuations indicate the need for monitoring at

**Citación:** Fonseca-Barreto C, et al. Estado ecológico del humedal Torca-Guaymaral basado en un índice de integridad biótica desarrollado para la comunidad fitoplanctónica. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):804-820, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3222

**Editor:** Jhon Charles Donato

***Correspondencia:**
Gabriel Pinilla-Agudelo;
gapinillaa@unal.edu.co

**Recibido:** 13 de mayo de 2025
**Aceptado:** 9 de julio de 2026
**Publicado en línea:** 5 de agosto de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

higher spatial and temporal resolutions. The proposed index serves as a first approximation that should be considered with caution but constitutes a useful tool for ecological monitoring of the Torca-Guaymaral wetland and provides important information for implementing biotic assessments in Bogotá's urban wetlands.

**Keywords:** Andean wetlands; community attributes; ecosystem health; planktonic microalgae; water quality.

## Introducción

Los humedales urbanos de Bogotá abarcan actualmente cerca de 800 hectáreas, lo que representa apenas entre el 2 y el 3 % de la extensión original que tenían a principios del siglo XX (**Pulido-López & Pinilla-Agudelo**, 2017). A pesar de su drástica reducción, se reconoce su contribución fundamental al mantenimiento de la estructura ecológica de la ciudad (**Cortés-Ballén**, 2017) y la provisión de servicios ecosistémicos claves, como el control de inundaciones, la recarga de acuíferos, la conservación de la diversidad biológica de múltiples grupos de organismos y el soporte de valores culturales y paisajísticos (**Guillot & Pinilla**, 2017).

Frente al deterioro y la pérdida de estos ecosistemas, resulta imperativo implementar diversas acciones orientadas a su evaluación, restauración y manejo. En este sentido, una de las herramientas más útiles son los índices ecológicos, que permiten diagnosticar el estado de salud de los humedales. Las aproximaciones más simples se cimentan en variables abióticas, como los nutrientes, los iones, los gases disueltos y los aspectos geomorfológicos e hidrológicos (**Pinilla-Agudelo**, 2016). Sin embargo, otros enfoques incorporan las comunidades acuáticas y analizan aspectos como la composición taxonómica, la abundancia y la tolerancia a la contaminación, entre otras variables. Dentro de estas perspectivas biológicas, se destacan los índices de integridad biótica (IIB), que, además de considerar la estructura de las comunidades, integran un conjunto de rasgos funcionales y de historia de vida, tales como el tamaño, la forma del cuerpo, el tipo y duración del ciclo de vida, los modos de alimentación, las estrategias reproductivas y los mecanismos de dispersión, lo que los ubica dentro de los denominados índices multimétricos o multiatributo (**Karr *et al.***, 2021).

Los atributos biológicos considerados en un IIB deben reflejar aspectos de composición, estructura y función de las comunidades acuáticas (**Schmitter-Soto**, 2014), de modo que el índice logre captar adecuadamente el grado de integridad biológica, la cual se define como la "capacidad de una comunidad de organismos para soportar y mantener una condición balanceada, integrada y adaptativa, conservando una composición, diversidad y organización funcional comparables a las de los hábitats naturales de una región" (**Karr**, 1981; **Karr & Dudley**, 1981). Cada atributo o métrica se asocia con una característica específica del sitio de muestreo y su conjunto permite caracterizar la integridad ecológica subyacente de dicho sitio (**Karr *et al.,*** 1986). Esta integridad está vinculada a la salud ecosistémica, un concepto planteado por **Schaeffer *et al.*** (1988) para explicar al público el estado ecológico. Debe entenderse como una metáfora y no como una propiedad fija, pues los sistemas naturales cambian constantemente y no tienen una condición óptima (**Calow**, 1992), ya que los ecosistemas fluctúan entre diversos estados debido a variaciones ambientales y no tienen una "mejor salud", sino la capacidad de mantener su estructura, productividad, autonomía y resiliencia al estrés (**Lu *et al.,*** 2015). No obstante, el concepto de salud ecológica resulta útil para comunicar y guiar políticas que preserven el medio ambiente y el bienestar humano.

En el ámbito internacional hay numerosas experiencias sobre el desarrollo y aplicación de índices de integridad biológica basados en las algas planctónicas, tanto en ambientes lóticos (**Teng *et al.***, 2014; **Al-Janabi *et al.***, 2016; **Wu *et al.***, 2019; **Huang *et al.,*** 2022), como en sistemas lénticos, principalmente lagos (**Kane *et al.***, 2009; **Maulood *et al.***, 2011; **Zhu *et al.***, 2021; **Cao *et al.***, 2024). En Bogotá, algunos estudios han desarrollado índices ecológicos y de calidad del agua para los humedales, con énfasis en variables tróficas

(concentración de clorofila-*a*, nitrógeno y fósforo) **(Pulido-López & Pinilla-Agudelo**, 2017) y en otros factores físicos y químicos (**Caho-Rodríguez & López-Barrera**, 2017; **Guillot**, 2017a), mientras que otros han incorporado características biológicas de comunidades acuáticas, como la composición, la abundancia y la tolerancia de algas, macrófitas e invertebrados (**Pinilla**, 2010; **Castro-Roa & Pinilla-Agudelo**, 2014; **Castro & Pinilla**, 2017; **Pinilla**, 2017). Incluso se ha propuesto el uso de tasas de crecimiento de algas encapsuladas en alginato como indicadoras del estado trófico (**Pinilla *et al.***, 2021), pero hasta la fecha no se ha elaborado ningún IIB para los humedales de la ciudad.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar una herramienta de evaluación ecológica para el humedal Torca-Guaymaral, un índice de integridad biótica basado en la comunidad fitoplanctónica (IIB-F). Este índice permitirá monitorear cambios futuros en la salud ecosistémica del humedal y servirá como insumo para su manejo y conservación, así como para la toma de decisiones en el contexto urbano de Bogotá.

## Materiales y métodos

### *Área de estudio*

El estudio se llevó a cabo en el humedal Torca-Guaymaral, situado al norte de Bogotá, a 2.565 m s.n.m., en las coordenadas 4°48′21.07″ N y 74°2′36.04″ W. Este humedal se divide en dos sectores: Torca (24 ha), perteneciente a la localidad de Usaquén, y Guaymaral (49 ha), ubicado en la localidad de Suba. Ambos sectores están separados por la Autopista Norte, aunque se mantienen conectados hidráulicamente mediante alcantarillas estándar y o alcantarillas de caja (*box culverts*). El clima es frío (12 - 18 °C) y húmedo (500 a 1000 mm anuales); el régimen de precipitación es bimodal tetraestacional, con la primera época de lluvias entre marzo y mayo y la segunda entre septiembre y noviembre. El primer periodo seco ocurre entre diciembre y febrero y el segundo entre junio y agosto (**Montoya-Rojas & Rivera-Marroquín**, 2021).

El sector de Torca recibe el aporte hídrico del río homónimo, que fluye de sur a norte a través de un canal, así como de las quebradas Aguas Calientes, Patiño y San Juan, provenientes de los cerros orientales de la Sabana de Bogotá. El sector Guaymaral, además de recibir agua a través de las conexiones artificiales con la porción de Torca, se alimenta de las quebradas La Floresta, Cañiza, Novita y Torca. Todo el caudal hídrico del sistema drena finalmente al río Bogotá (**Alcaldía Mayor de Bogotá**, 2017).

### *Muestreos y análisis de laboratorio*

Los muestreos se hicieron el 21 de septiembre de 2021 (106,7 mm de precipitación), durante la segunda época de lluvias, y el 3 de febrero de 2022 (41,4 mm), durante la primera época seca del año. Los datos de precipitación se obtuvieron de la estación climática UDCA del **IDEAM** (2022). Se establecieron nueve estaciones de muestreo (**Figura 1**) distribuidas en tres tipos de hábitats según sus características fisiográficas: quebrada (Q, estaciones 1, 2 y 4), canal (C, estaciones 5, 6 y 7) y léntico (L, estaciones 3, 8 y 9). En cada estación y época climática se registraron *in situ* el pH, la temperatura del agua, el oxígeno disuelto, el porcentaje de saturación de oxígeno y la conductividad eléctrica mediante una sonda multiparamétrica HACH-HQ40d. Además, se recolectaron muestras de agua para medir en laboratorio las variables clorofila-*a*, cloruros, demanda biológica de oxígeno ($DBO_5$), demanda química de oxígeno (DQO), ortofosfatos, nitritos, nitratos y sólidos suspendidos totales, siguiendo las metodologías estándar de la American Public Health Association (**Baird & Bridgewater**, 2017). Para evaluar posibles diferencias temporales en las variables físicas y químicas entre las dos épocas climáticas, se utilizó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney porque los datos no presentaron normalidad.

Las muestras de fitoplancton se obtuvieron filtrando 30 L de agua a través de una red cónica con criba de 23 µm (**Guillot & Pinilla**, 2017). El concentrado se conservó con un volumen equivalente de solución Transeau (agua, etanol al 90 % y formol al 40 % en proporción 6:3:1). En total, se recolectaron 18 muestras, correspondientes a tres estaciones por hábitat, en dos épocas climáticas.

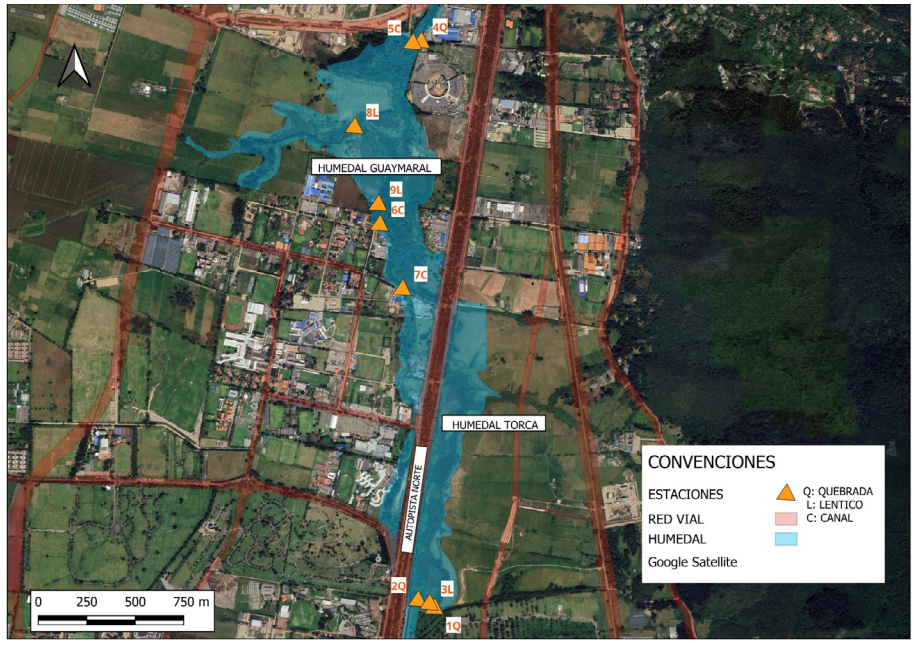



**Figura 1.** Ubicación del sistema hídrico Torca-Guaymaral y de las estaciones de muestreo

La identificación y el conteo de los organismos fitoplanctónicos se llevaron a cabo con cámaras Sedgwick-Rafter (50 mm de ancho x 20 mm de alto x 1 mm de profundidad, volumen: 1 ml). Las muestras se observaron a 20x y 40x (**McAlice**, 1971; **LeGresley & McDermott**, 2010). Cuando la densidad de algas o el contenido de materia orgánica eran elevados, la muestra se diluyó con agua destilada. El factor de dilución se utilizó posteriormente para calcular la densidad original. Los organismos se contaron hasta alcanzar 400 individuos del mismo taxón en las muestras de cada sitio (**Francoeur *et al.***, 2013).

Las algas se identificaron hasta el nivel de género siempre que fue posible. Se emplearon claves y listados taxonómicos específicos, como los de **Tell y Conforti** (1986), **Cardozo *et al.*** (2005), **Bicudo y Menezes** (2006), **Bellinger y Sigee** (2010), **Oliva-Martínez *et al.*** (2014), **Wehr *et al.*** (2015), **Necchi** (2016), **Dos Santos** (2016) y **González e Inostroza** (2017). Toda la nomenclatura taxonómica se basó en **Guiry y Guiry** (2025). Se tomaron fotografías de los taxones utilizando un microscopio Leica con cámara equipado con el *software* de adquisición de imágenes LAS EZ. Las mediciones se realizaron con el programa ImageJ2 (**Rueden *et al.***, 2017), siguiendo los modelos geométricos y las representaciones algorítmicas propuestas por **Hillebrand *et al.*** (1999) y **Sun y Liu** (2003).

### *Elaboración del índice de integridad biótica del fitoplancton (IIB-F)*

*Escogencia de los sitios de referencia*. En primer lugar se hizo un análisis descriptivo de las variables ambientales mediante diagramas de violín complementados con diagramas de cajas y bigotes, con el fin de visualizar la variabilidad de dichos factores en el humedal. Posteriormente, se aplicó un análisis de componentes principales (ACP) a los promedios de las variables ambientales por sitio para identificar los gradientes ambientales y establecer grupos de sitios con características similares. Para este ACP se eliminó el porcentaje de saturación de oxígeno por estar estrechamente correlacionado con el oxígeno disuelto, y la temperatura por tener un coeficiente de variación muy bajo (menor del 10 %). En el ACP se incluyeron los promedios de datos físicos y químicos reportados por **Pulido-López y Pinilla-Agudelo** (2017) para El Salitre, considerado el humedal urbano con el menor grado de contaminación de la ciudad de Bogotá. A partir del ACP se definieron los lugares de referencia como aquellas estaciones con las mejores condiciones ambientales, es decir, los lugares menos perturbados disponibles en el sistema (**Whittier *et al.***, 2007).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):804-820, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3222

*Determinación y selección de atributos candidatos del fitoplancton.* Para seleccionar los rasgos más representativos del fitoplancton que pudieran formar parte del IIB-F, se empleó inicialmente la técnica gráfica de medias y bigotes (*box plots*), comparando los datos de los atributos candidatos de los sitios de referencia con los datos de los sitios alterados detectados mediante el ACP. El humedal El Salitre se incluyó como sitio de referencia adicional, para lo cual se utilizaron los datos reportados por **Pulido-López** (2015) y **Pulido-López y Pinilla-Agudelo** (2017). Así, se seleccionaron como métricas candidatas aquellas cuyos bigotes (correspondientes al intervalo del 95 % del error estándar) en un determinado grupo no se superpusieron con los del otro grupo, pero que en caso de traslaparse, su media quedara por fuera de los bigotes del otro grupo. Posteriormente, se utilizó la razón señal:ruido (promedio del atributo/valor individual del atributo en cada sitio; **Wolterbeek *et al.***, 1996) de las variables preseleccionadas y los resultados se representaron mediante gráficas de cajas y bigotes. Cuando la razón señal:ruido se acercaba a 1 en los sitios contaminados, la métrica resultó poco adecuada, debido a que no reflejaba las variaciones en el gradiente de deterioro (**Guillot**, 2017a). Con las métricas seleccionadas en el paso anterior, se hizo un análisis de redundancia mediante la correlación de Spearman y se aplicó la corrección de Bonferroni para reducir la probabilidad de hallar resultados significativos por azar. Si los coeficientes de correlación correspondían a $r \leq 0{,}8$, los atributos no eran redundantes; en el caso de dos atributos que aportaban información ecológica similar y que tenían un $r > 0{,}8$ y un $p \leq 0{,}05$, se conservaba solo uno de ellos para los análisis posteriores; en estos casos, se mantenía el atributo de menor señal-ruido.

*Estandarización y puntuación de los atributos seleccionados.* Dado que los rasgos seleccionados se midieron en diferentes escalas (p. ej., número de individuos, número de taxones, $mg/m^3$, $\mu m^3$, porcentaje, fracción), se utilizó la estandarización de razones recomendada por **Cao *et al.*** (2024) debido a su precisión y eficacia. Para los atributos que disminuyeron con el grado de contaminación, se usó como valor esperado el percentil 95 del atributo en todas las muestras y la puntuación de la métrica fue igual a su valor dividido por el valor esperado (Ecuación 1). Para los atributos que aumentaron con el deterioro, se empleó como valor esperado el percentil 5 de la métrica de todas las muestras y la puntuación del atributo se calculó según la Ecuación 2. De esta manera, los puntajes variaron entre 0 y 1; cuando el puntaje era > 1, se registraba como 1.

La ecuación para la estandarización de los atributos que decrecían con la perturbación es la siguiente:

$$Puntaje = \frac{X}{X95}, \qquad \text{(Ecuación 1)},$$

donde $X$ es el valor del atributo en cada sitio y $X95$ es el percentil 95 de los valores del atributo en todos los sitios.

Para la estandarización de los atributos que aumentaban con la perturbación se utilizó la siguiente expresión:

$$Puntaje = \left( \frac{(Xmax - X)}{(Xmax - X5)} \right), \qquad \text{(Ecuación 2)},$$

donde $X$ es el valor del atributo en cada sitio, $X5$ es el percentil 5 de los valores del atributo en todos los sitios y $Xmax$ es el máximo valor registrado de ese atributo. La puntuación final del IIB-F de cada sitio fue el promedio de las puntuaciones de todos los atributos y varió entre 0 y 1.

Para establecer las escalas de calificación de la integridad biótica de la comunidad de fitoplancton y conocer el grado de contaminación en las diferentes estaciones de muestreo del humedal Torca-Guaymaral, se siguieron las sugerencias de **Gao *et al.*** (2023) y de **Cao *et al.*** (2024). Las escalas se elaboraron con base en el percentil 95 de la puntuación final del IIB-F en todos los sitios. Dicho percentil 95 correspondió al límite superior de la escala de calificación, valor que se dividió en cuatro porciones iguales, con lo cual se obtuvieron cinco niveles de evaluación del IIB-F: un resultado superior al percentil 95 se calificó como "excelente", en tanto que los otros cuatro niveles se escalaron en forma descendiente y se calificaron como "bueno", "moderado", "deficiente" y "grave", respectivamente.

Los resultados del IIB-F de la época lluviosa se compararon con los del IIB-F del periodo seco mediante la prueba U de Mann-Whitney, ya que no se cumplieron los requisitos de normalidad y homocedasticidad necesarios para realizar un análisis paramétrico. Para este análisis se utilizó el programa PAST 5.2 (**Hammer *et al.*,** 2001), con el cual también se realizaron los análisis estadísticos descriptivos y multivariados mencionados anteriormente.

## Resultados

### *El ambiente físico y químico del humedal*

Los datos físicos y químicos y de la clorofila-*a* en las estaciones muestreadas en el humedal Torca-Guaymaral en los dos periodos climáticos, así como los promedios de estas variables en el humedal El Salitre reportados por **Pulido-López y Pinilla-Agudelo** (2017), se consignan en la **Tabla 1**. La **Figura 2** muestra la variabilidad de estos factores

**Tabla 1.** Valores de las variables físicas y químicas y de la clorofila-*a* en nueve estaciones de muestreo del humedal Torca-Guaymaral, registrados en septiembre de 2021 (temporada de lluvias) y en febrero de 2022 (temporada seca).

| Estación | Época climática | Clorofila-*a* (mg/m$^3$) | Cloruros (mg/L) | $DBO_5$ (mg $O_2$/L) | DQO (mg $O_2$/L) | Ortofosfatos (mg/L) | Nitratos (mg/L) | Nitritos (mg/L) | pH (Unidades) | Ox. Disuelto (mg/L) | Saturación Ox. (%) | Temperatura (ºC) | Conductividad (µS/cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1Q | Lluvias | 17 | 10,5 | 2,5 | 12,9 | 0,035 | 0,113 | 0,00304 | 6,87 | 4,3 | 73,1 | 16,4 | 131,2 |
| | Temporada seca | 0,1 | 11,4 | 2,5 | 2,5 | 0,035 | 0,113 | 0,00304 | 6,55 | 3,26 | 43,8 | 15 | 155,6 |
| 2Q | Lluvias | 26,1 | 4,95 | 2,5 | 44,8 | 0,035 | 0,113 | 0,00304 | 6,94 | 0,82 | 13,3 | 13,9 | 192.2 |
| | Temporada seca | 0,1 | 4,95 | 2,5 | 2,5 | 0,035 | 0,961 | 0,00304 | 6,54 | 0,98 | 13,2 | 14,8 | 238 |
| 3L | Lluvias | 36,7 | 4,95 | 2,5 | 77 | 0,252 | 0,113 | 0,00304 | 7,16 | 7,06 | 129,5 | 20,2 | 160,4 |
| | Temporada seca | 0,1 | 4,95 | 2,5 | 2,5 | 0,416 | 0,896 | 0,00304 | 6,35 | 0,43 | 5,5 | 6,35 | 168,4 |
| 4Q | Lluvias | 1,01 | 4,95 | 2,5 | 2,5 | 0,035 | 0,113 | 0,00304 | 7,11 | 3,75 | 62,7 | 15,4 | 64,7 |
| | Temporada seca | 0,1 | 4,95 | 2,5 | 2,5 | 0,035 | 0,411 | 0,136 | 6,2 | 4,03 | 53,1 | 14,1 | 71,2 |
| 5C | Lluvias | 20,4 | 25,1 | 2,5 | 39,6 | 0,51 | 0,113 | 0,00304 | 7,13 | 0,71 | 12 | 16 | 131,6 |
| | Temporada seca | 0,1 | 26,3 | 2,5 | 2,5 | 0,035 | 0,489 | 0,00304 | 6,81 | 1,19 | 16,3 | 15,6 | 326 |
| 6C | Lluvias | 42,9 | 24,1 | 2,5 | 36,6 | 0,444 | 0,113 | 0,00304 | 7,18 | 1,59 | 27,9 | 18 | 477 |
| | Temporada seca | 0,1 | 26,4 | 2,5 | 2,5 | 0,035 | 0,415 | 0,0177 | 6,91 | 2,97 | 43 | 18,2 | 336 |
| 7C | Lluvias | 32 | 4,95 | 2,5 | 19,2 | 0,501 | 0,5 | 0,00304 | 7,24 | 2,43 | 42,8 | 17,9 | 352 |
| | Temporada seca | 0,1 | 29,8 | 2,5 | 2,5 | 0,035 | 0,113 | 0,00304 | 6,72 | 0,75 | 10,3 | 16,1 | 327 |
| 8L | Lluvias | 0,1 | 39,2 | 6,78 | 21,9 | 0,035 | 0,113 | 0,00304 | 7,05 | 2,45 | 35 | 18,2 | 335 |
| | Temporada seca | 0,1 | 38,2 | 2,5 | 2,5 | 0,035 | 0,961 | 0,00304 | 6,78 | 1,23 | 17,1 | 16,4 | 320 |
| 9L | Lluvias | 0,1 | 35,1 | 14,1 | 26,4 | 0,12 | 0,113 | 0,00304 | 7 | 2,01 | 26,9 | 15,2 | 232 |
| | Temporada seca | 0,1 | 25,8 | 2,5 | 2,5 | 0,416 | 0,896 | 0,00304 | 6,7 | 0,73 | 10,2 | 17 | 220 |
| Promedio Torca-Guaymaral | | 9,845 | 18,14 | 3,38 | 16,85 | 0,169 | 0,369 | 0,0112 | 6,84 | 2,26 | 35,31 | 15,82 | 235,46 |
| Desviación estándar Torca-Guaymaral | --- | 15,05 | 12,99 | 2,85 | 21 | 0,19 | 0,33 | 0,03 | 0,29 | 1,73 | 30,71 | 2,87 | 111,69 |
| El Salitre | | 40,95 | --- | 10,3 | 55 | 0,119 | 0,05 | 0,01 | 6,85 | 6,43 | 93,05 | 18,11 | 98,75 |

Con fines de comparación, se incluyen los datos del humedal El Salitre, considerado un sistema no contaminado (**Pulido & Pinilla**, 2017). Q: quebrada; C: canal; L: léntico (ver la ubicación de las estaciones en la **Figura 1**)

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):804-820, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3222

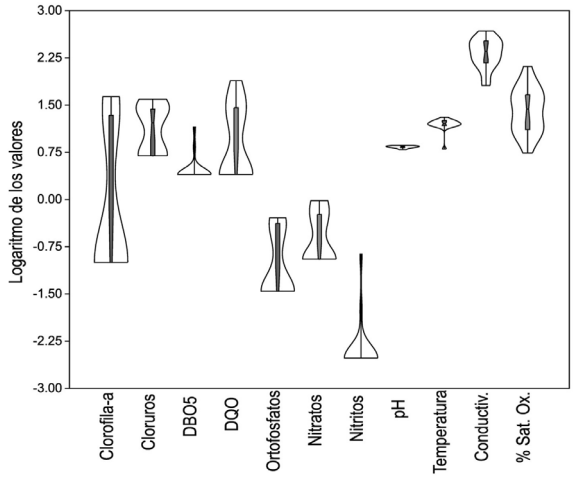



**Figura 2.** Diagramas de violín con cajas y bigotes de las variables ambientales del humedal Torca-Guaymaral. Las escalas de los diferentes factores se logaritmizaron para facilitar la comparación.

en Torca-Guaymaral mediante una gráfica con una escala logarítmica para permitir la comparación entre las distintas variables. Los promedios de la conductividad (235,46 µS/cm), los cloruros (18,14 mg/L), la DQO (16,85 mg $O_2$/L) y la saturación de oxígeno (35,31 %) fueron relativamente altos, mientras que la clorofila-*a* (0,1 a 42,9 mg/m$^3$) fue el factor más variable, con una propensión a presentar un mayor número de registros en los extremos de su rango. Por el contrario, el pH (6,84 unidades) y la temperatura (15,82 °C) del agua presentaron muy pocas variaciones. Los nitritos se destacaron por sus concentraciones mínimas (0,0112 mg $NO_2$/L), mientras que la $DBO_5$ (3,38 mg $O_2$/L), los ortofosfatos (0,169 mg $PO_4$/L) y los nitratos (0,369 mg $NO_3$/L) presentaron valores medios a bajos. Todas las características mencionadas indican que, en general, el humedal Torca-Guaymaral es un sistema de aguas frías y neutras, con tendencia a la mineralización, la eutrofia y la saprobiedad.

En cuanto a las diferencias en las características físicas y químicas entre los períodos climáticos, el análisis de Mann-Whitney mostró que la concentración de clorofila-*a* ($p$ = 0,001), la DQO ($p$ = 0,0005) y el pH ($p$ = 0,0005) fueron significativamente mayores durante la estación lluviosa. Por otro lado, los nitratos ($p$ = 0,008) aumentaron notablemente durante la temporada de sequía.

### *Gradiente de contaminación y sitios de referencia*

Sehgún el ACP (**Figura 3**), el gradiente de deterioro y contaminación se extendió desde los sitios más limpios del humedal Torca-Guaymaral (estaciones 4Q, 1Q y 3L) hasta los lugares de menor calidad del agua (estaciones 5C, 6C, 7C, 8L y 9L). La estación 2Q se ubicó en una posición intermedia. Los sitios más contaminados se asociaron con altos niveles de cloruros, conductividad, ortofosfatos y nitratos. Los sitios más limpios se ubicaron en el cuadrante opuesto a estas variables y se asociaron con aguas más oxigenadas. Los nitritos y las demandas de oxígeno también se relacionaron con estos lugares, pero sus concentraciones fueron bajas (promedios: 0,025 mg de $NO_2$/L; $DBO_5$: 2,5 mg de $O_2$/L; DQO: 26,6 mg de $O_2$/L). El vector de la clorofila-*a* se ubicó igualmente en el sector de las estaciones más limpias. Es notable la posición del humedal El Salitre en la zona izquierda del ACP, en el sector de las estaciones menos contaminadas, lo cual concuerda con el supuesto de buenas condiciones ecológicas señalado por la literatura en este cuerpo de agua (**Pulido-López & Pinilla-Agudelo**, 2017).

A partir de estos datos, los sitios seleccionados como las locaciones de referencia fueron las estaciones 4Q, 1Q, 3L y el humedal El Salitre. Las estaciones 6C, 7C, 8L, 9L y 5C se definieron como lugares afectados o alterados.

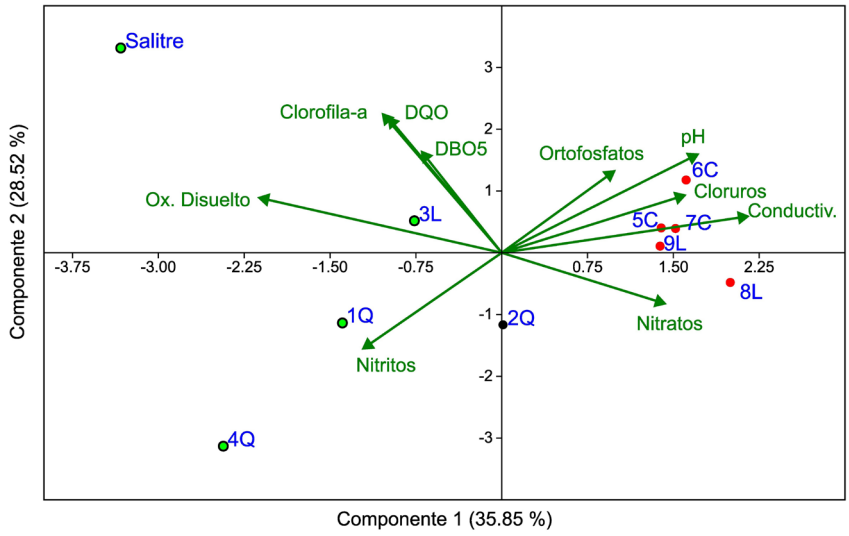



**Figura 3.** Análisis de componentes principales de las variables ambientales del humedal Torca-Guaymaral. Los puntos verdes corresponden a los sitios de mejor calidad del agua y los puntos rojos, a los más contaminados. Q: quebrada; C: canal; L: léntico. Se incluye el humedal El Salitre como sistema de referencia. El componente 1 explica el 35,85 % de la varianza y el componente 2 el 28,52 %.

### *Atributos candidatos y métricas seleccionadas*

De los 67 atributos originalmente propuestos (**Tabla 1S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3222/5377), la técnica de análisis con gráfico de medias y bigotes permitió reducirlos a 27 (**Figura 1S,** https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3222/5378). De estos se seleccionaron nueve que cumplían con el requisito establecido por la razón señal:ruido, es decir, con valores del índice alejados de 1. Tales atributos fueron cuatro de composición y abundancia (concentración de clorofila-*a*, abundancia relativa de diatomeas centrales, relación de la abundancia relativa de diatomeas centrales/pennales, abundancia relativa de *Navicula+Nitzschia+Surirella*), uno morfológico (biovolumen de cianobacterias) y cuatro de diversidad y funcionalidad (riqueza de desmidias, densidad total de los tres taxones más dominantes, número de taxones filamentosos y número de taxones con aerotopos) (**Figura 4**). Las correlaciones de Spearman no hallaron redundancia alguna entre las nueve métricas definidas por la razón señal:ruido.

### *Estandarización de los atributos seleccionados*

La estandarización de los atributos finalmente seleccionados se presenta en la **Tabla 2**, donde se observa que algunas métricas disminuyeron con el incremento de la contaminación: la clorofila-*a*, la abundancia relativa de diatomeas centrales, la relación entre la abundancia de diatomeas centrales y pennales, la riqueza de taxones de desmidias, el número de taxones filamentosos y el número de taxones con aerotopos. Los otros rasgos (abundancia relativa de *Navicula+Nitzschia+Surirella*, biovolumen de cianobacterias y densidad de los tres taxones más dominantes) aumentaron con el gradiente de deterioro. El IIB-F de cada sitio correspondió al promedio de los atributos estandarizados. Es notable el valor más alto del IIB-F para el humedal El Salitre, cuyas condiciones de aislamiento y ubicación lo alejan de las fuentes de contaminación (**Pulido-López & Pinilla-Agudelo**, 2017).

### *Escalas del IIB-F*

La técnica utilizada para establecer las escalas del IIB dio como resultado una graduación de cinco clases de integridad biótica del fitoplancton, como se muestra en la **Tabla 3**. Los valores de la escala construida fluctuaron entre <0,173 y >0,693. Cada clasificación de la

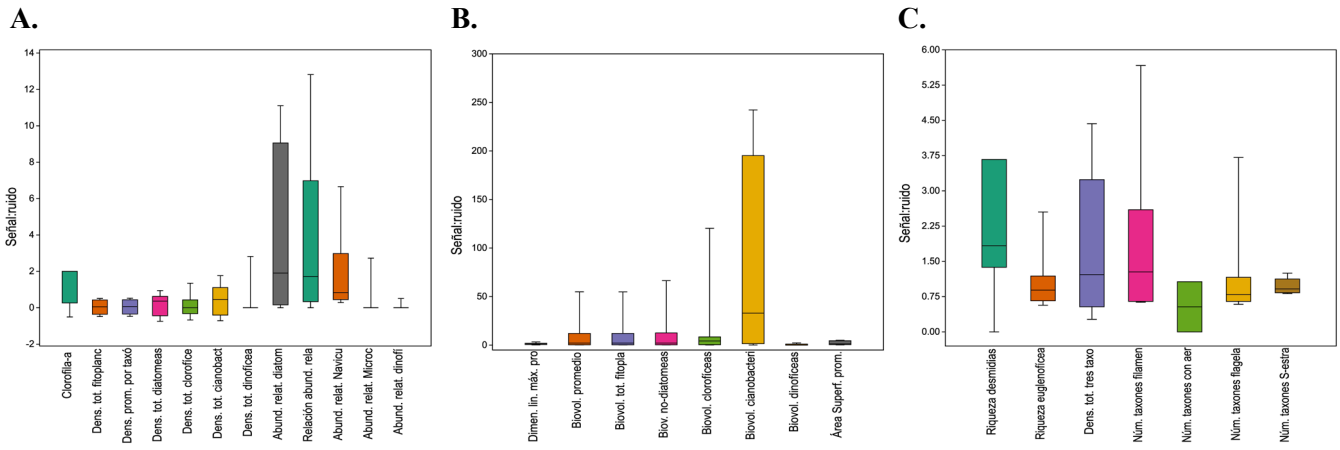



**Figura 4.** Análisis de la razón señal:ruido de los atributos seleccionados en los sitios contaminados. **A.** Atributos de composición y abundancia. **B.** Atributos morfológicos. **C.** Atributos de diversidad y funcionalidad. Los atributos que se alejan del valor 1 son los más adecuados para integrar el IIB-F del fitoplancton del humedal Torca-Guaymaral.

**Tabla 2.** Resultados de la estandarización de los atributos del IIB-F.

| Atributo | Tendencia con la contaminación | Ecuación | Salitre | 1Q-LL | 2Q-LL | 3L-LL | 4Q-LL | 5C-LL | 6C-LL | 7C-LL | 8L-LL | 9L-LL | 1Q-SC | 2Q-SC | 3L-SC | 4Q-SC | 5C-SC | 6C-SC | 7C-SC | 8L-SC | 9L-SC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Concentración de clorofila-*a* | Disminuye | *X*/*X*95 | 0,997 | 0,404 | 0,621 | 0,873 | 0,024 | 0,485 | 1 | 0,761 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Abundancia relativa de diatomeas centrales | Disminuye | *X*/*X*95 | 0,199 | 1 | 0,903 | 0,075 | 0,129 | 0,184 | 0,012 | 0,021 | 0,023 | 0,373 | 0,344 | 0,085 | 0,008 | 0,255 | 0,041 | 0,17 | 0,096 | 0 | 0 |
| Abundancia relativa de Navicula + Nitzschia + Surirella | Aumenta | $\left(\frac{(Xmax - X)}{(Xmax - X5)}\right)$ | 0,917 | 0,81 | 0,999 | 0,965 | 0,921 | 0 | 0,783 | 0,659 | 0,17 | 0,92 | 0,767 | 0,798 | 0,947 | 0,799 | 0,689 | 0,51 | 0,687 | 0,954 | 1 |
| Relación entre la abundancia relativa de centrales/ pennales | Disminuye | *X*/*X*95 | 0,713 | 0,694 | 0 | 0,977 | 0,971 | 0,965 | 0,995 | 0,992 | 0,995 | 0,963 | 0,951 | 0,958 | 0,996 | 0,928 | 0,978 | 0,946 | 0,955 | 1 | 1 |
| Biovolumen de ciano-bacterias | Aumenta | $\left(\frac{(Xmax - X)}{(Xmax - X5)}\right)$ | 1 | 0,989 | 0,994 | 0,996 | 0,998 | 0 | 0,985 | 0,988 | 0,999 | 0,53 | 0,982 | 0,864 | 0,977 | 0,997 | 0,998 | 0,986 | 0,981 | 0,999 | 0,999 |
| Riqueza de desmidias | Disminuye | *X*/*X*95 | 1 | 0,169 | 0 | 0,169 | 0,508 | 0 | 0,338 | 0,169 | 0,169 | 0,338 | 0,338 | 0,169 | 0,508 | 0,169 | 0,338 | 0 | 0,169 | 0,508 | 0,338 |
| Densidad total de los tres taxones más dominantes | Aumenta | $\left(\frac{(Xmax - X)}{(Xmax - X5)}\right)$ | 0,672 | 0,8515 | 0,886 | 0,824 | 0,983 | 0,758 | 0,855 | 0,713 | 0,939 | 0,369 | 0,998 | 0,947 | 0,392 | 1 | 0,96 | 0,947 | 0,931 | 0,827 | 0 |
| Número de taxones que forman filamentos | Disminuye | *X*/*X*95 | 1 | 0,333 | 1 | 0,555 | 0,666 | 1 | 1 | 1 | 0,222 | 0,555 | 0,888 | 0,666 | 0,777 | 0,666 | 0,444 | 0,888 | 0,888 | 0,111 | 0,333 |
| Número de taxones con aerotopos | Disminuye | *X*/*X*95 | 1 | 0,333 | 0,333 | 0,666 | 0,333 | 0,333 | 0 | 0 | 0 | 0,333 | 0,333 | 0,333 | 1 | 0,333 | 0,333 | 0 | 0 | 0,333 | 0 |
| IIB-F | | | **0,833** | **0,62** | **0,637** | **0,677** | **0,614** | **0,413** | **0,663** | **0,589** | **0,391** | **0,487** | **0,622** | **0,535** | **0,623** | **0,572** | **0,531** | **0,494** | **0,523** | **0,526** | **0,408** |

Se indica la ecuación de estandarización empleada para cada métrica. Se incluye el humedal El Salitre, considerado un sistema de referencia (**Pulido & Pinilla**, 2017). Q: quebrada; C: canal; L: ambiente léntico; LL: periodo lluvioso; SC: periodo seco

integridad biótica del fitoplancton se asoció con una descripción de la salud ecosistémica, es decir, con las condiciones ambientales que posibilitan o restringen el grado de integridad de la comunidad de microalgas planctónicas.

### *El IIB-F y el estado ecológico del humedal Torca-Guaymaral*

Al aplicar la escala de integridad biótica (**Tabla 3**) a los datos del IIB-F de los sitios estudiados en los humedales Torca-Guaymaral (**Tabla 2**), se obtuvieron las condiciones ecológicas de cada lugar para ambos periodos climáticos. En el caso de El Salitre se utilizaron los promedios de los atributos de las épocas seca y lluviosa reportados por **Pulido-López y Pinilla-Agudelo** (2017). Los resultados del IIB-F se ordenaron de mayor a menor valor (**Tabla 4**) para agrupar los sitios con una salud ecosistémica similar. Se destaca que el único punto con una excelente integridad biótica y, por ende, con una salud ecológica muy buena fue el humedal El Salitre. Ninguna de las estaciones de muestreo del humedal Torca-Guaymaral alcanzó esta calificación de excelencia.

Sin embargo, a pesar de no tener la integridad biótica más elevada, también debe destacarse que ningún sitio del humedal Torca-Guaymaral en los dos periodos climáticos evaluados se calificó como de integridad deficiente o grave. Durante la época lluviosa, seis estaciones se catalogaron con un IIB-F bueno (3L, 6C, 2Q, 1Q, 4Q y 7C) y tres estuvieron en la clase de integridad biótica moderada (9L, 5C y 8L). En temporada seca, solo dos lugares se catalogaron con un IIB-F moderado (6C y 9L) y los demás presentaron una buena integridad biótica. Entre el periodo lluvioso y el seco la estación 6C perdió integridad, mientras que en las locaciones 5C y 8L mejoraron las condiciones para el fitoplancton. Los promedios del IIB-F para las dos épocas fueron similares, sin diferencias significativas entre periodos (U de Mann-Whitney = 40,5, p = 0,496). Se puede decir que, para las fechas de muestreo (finales de 2021 e inicios de 2022), el humedal Torca-Guaymaral presentó, en general, una calidad del agua que permitió el desarrollo moderado o aceptable de la comunidad fitoplanctónica.

Es interesante observar que los tres sitios del sector Torca (1Q, 2Q y 3L) se ubicaron en la clase de integridad buena, con valores elevados en esta categoría, tanto en el periodo lluvioso como en la época seca. Por el contrario, varios sitios del tipo de canal y léntico, especialmente en el sector de Guaymaral, tendieron a mostrar una menor integridad del fitoplancton.

**Tabla 3.** Escala de calificación de la integridad biológica del fitoplancton del humedal Torca-Guaymaral con base en el IIB-F desarrollado

| Clases | Clasificación de la integridad biótica del fitoplancton | Implicaciones sobre la salud del ecosistema |
|---|---|---|
| IIB-F > 0,693 | **Excelente** | Las óptimas condiciones de calidad física y química del agua de estos sitios favorecen un desarrollo favorable de la comunidad de fitoplancton. La salud del ecosistema en estos sitios es muy buena. |
| 0.693 ≤ IIB-F ≥ 0,519 | **Buena** | Las condiciones de contaminación reducida del agua de estos lugares permiten el desarrollo de la comunidad de fitoplancton de forma aceptable. La salud del ecosistema en estos sitios es buena. |
| 0,519 ≤ IIB-F ≥ 0,346 | **Moderada** | El grado de contaminación del agua en estos sitios es apreciable y provoca un importante deterioro en la integridad del fitoplancton. La salud ecosistémica de estos sitios está disminuida. |
| 0,346 ≤ IIB-F ≥ 0,173 | **Deficiente** | La calidad física y química del agua en estos sitios es mala y no favorece un buen desarrollo de la comunidad de fitoplancton. La salud ecosistémica de estas localidades es deficiente. |
| IIB-F < 0,173 | **Grave** | Las condiciones de calidad del agua en estos sitios son muy malas y restringen un buen desarrollo de las algas planctónicas. La salud del ecosistema en estos lugares es mala. |

**Tabla 4.** Estado ecológico de las diferentes estaciones del humedal Torca-Guaymaral, en los dos periodos climáticos, con base en el IIB-F de las algas planctónicas. Se incluye el humedal El Salitre, considerado un sistema de referencia (**Pulido & Pinilla**, 2017). Q: quebrada; C: canal; L: ambiente léntico; LL: periodo lluvioso; SC: periodo seco

| Sitios | IIB-F Fitoplancton | Integridad del fitoplancton | Implicaciones sobre la salud del ecosistema |
|---|---|---|---|
| **El Salitre** | 0,833 | **Excelente** | Calidad del agua óptima<br>Integridad del fitoplancton muy alta<br>Salud del ecosistema muy buena |
| **3L-LL** | 0 677 | **Buena** | Contaminación del agua reducida<br>Integridad del fitoplancton aceptable<br>Salud del ecosistema buena |
| **6C-LL** | 0,663 | | |
| **2Q-LL** | 0,637 | | |
| **1Q-LL** | 0,62 | | |
| **4Q-LL** | 0,614 | | |
| **7C-LL** | 0,589 | | |
| **9L-LL** | 0,487 | **Moderada** | Contaminación del agua apreciable<br>Integridad del fitoplancton deteriorada<br>Salud del ecosistema moderada |
| **5C-LL** | 0,413 | | |
| **8L-LL** | 0,391 | | |
| **Promedio temporada lluvias** | **0,592** | **Buena** | Contaminación del agua reducida<br>Integridad del fitoplancton aceptable<br>Salud del ecosistema buena |
| **3L-SC** | 0,623 | **Buena** | Contaminación del agua reducida<br>Integridad del fitoplancton aceptable<br>Salud del ecosistema buena |
| **1Q-SC** | 0,622 | | |
| **4Q-SC** | 0,572 | | |
| **2Q-SC** | 0,535 | | |
| **5C-SC** | 0,531 | | |
| **8L-SC** | 0,526 | | |
| **7C-SC** | 0,523 | | |
| **6C-SC** | 0,494 | **Moderada** | Contaminación del agua apreciable<br>Integridad del fitoplancton deteriorada<br>Salud del ecosistema moderada |
| **9L-SC** | 0,408 | | |
| **Promedio temporada seca** | **0,566** | **Buena** | Contaminación del agua reducida<br>Integridad del fitoplancton aceptable<br>Salud del ecosistema buena |

## Discusión

La caracterización física y química indicó una tendencia general hacia la mineralización y la eutrofización moderada del sistema, especialmente en los sitios con características de canal y en las zonas lénticas. Este patrón es consistente con lo reportado por **IDEA y EAAB** (2008) y **Guillot y Pinilla** (2017), que encontraron una heterogeneidad espacial en la calidad del agua del humedal Torca-Guaymaral, ya que algunas zonas del sector Guaymaral presentaban una mayor afectación por descargas urbanas y acumulación de nutrientes, mientras que otras áreas del sector de Torca estaban menos deterioradas. En este sentido, el ACP confirmó la existencia de este gradiente ambiental, que abarcó desde estaciones con condiciones relativamente conservadas (1Q, 3L, 4Q, las dos primeras en el sector de Torca) hasta sitios con mayor deterioro (6C, 5C, 8L, 9L) en el sector de Guaymaral. Las mayores concentraciones de clorofila-*a* en los sitios menos deteriorados indican una mayor productividad del fitoplancton, lo cual es consistente con ambientes más favorables

para el desarrollo de esta comunidad. El sitio 4Q del sector de Guaymaral se encuentra en una quebrada cuyo flujo constante ayuda a diluir y limpiar el agua, a pesar de estar muy cerca del Centro Comercial Bima. En cambio, la estación 5C se encuentra en un canal con condiciones más estancadas, lo que dificulta el recambio del agua. Además, la quebrada sobre la que se ubica la estación 4Q desciende de los cerros orientales de Bogotá (**IDEA & EAAB**, 2008) y es de aguas limpias, a diferencia de la estación 5C, cuyo canal recibe aguas con cierto grado de contaminación provenientes del norte de la ciudad. Estas diferencias podrían explicar las condiciones opuestas de estas dos estaciones, pese a su proximidad.

La diferencia entre sitios coincide con estudios previos que señalan que las presiones antrópicas sobre el humedal varían en intensidad según el tipo de hábitat y la conectividad hidráulica (**Montoya-Rojas & Rivera-Marroquín**, 2021; **Guillot & Pinilla**, 2017). Así, los ambientes lóticos funcionan como corredores hidráulicos que promueven la renovación continua del agua y limitan la acumulación de materia orgánica y nutrientes, mientras que las áreas lénticas, al presentar menor recambio y mayor retención hidrológica, favorecen procesos de sedimentación y acumulación de contaminantes, así como condiciones fisicoquímicas menos favorables para la autorregulación del sistema. Esta diferenciación estructural entre hábitats explica en gran medida los contrastes en la calidad del agua observados entre estaciones próximas, lo que refuerza la necesidad de considerar la dinámica hidrológica interna del humedal como factor clave para interpretar su estado ecológico y orientar las acciones de manejo.

La selección de métricas biológicas consistentes y no redundantes es esencial para la construcción de índices de integridad biótica. En este caso, las nueve métricas seleccionadas capturaron tanto las respuestas estructurales (composición, abundancia y riqueza) como las funcionales (formas de vida, biovolumen, presencia de aerotopos), lo que refuerza el enfoque multimétrico de los índices de integridad biótica desarrollado por **Karr *et al.*** (1986) y **Schmitter-Soto** (2014). Así, la combinación de atributos sensibles a la contaminación como la reducción de la riqueza de desmidias o la proliferación de géneros tolerantes como *Nitzschia* y *Navicula* permitió establecer relaciones consistentes entre el deterioro ambiental y la integridad fitoplanctónica.

La aplicación del IIB-F en el humedal Torca-Guaymaral (**Tabla 4**) reveló que ninguna estación alcanzó el nivel de integridad "excelente", con excepción del humedal El Salitre, lo que implica que los procesos de deterioro y contaminación que soporta el humedal Torca-Guaymaral obstaculizan, en alguna medida, el desarrollo óptimo de las comunidades fitoplanctónicas. Sin embargo, la mayoría de los sitios presentaron buenas condiciones de integridad biótica, tanto en la época lluviosa como en el periodo seco, lo que refleja una comunidad fitoplanctónica que aún es funcional en gran parte del sistema. Este panorama contrasta con la situación de otros humedales urbanos como La Vaca, La Conejera, Juan Amarillo y El Burro, donde se han registrado condiciones de deterioro graves que se reflejan en la dominancia de cianobacterias y en una carga orgánica extrema (**Pinilla**, 2010; **Castro-Roa & Pinilla-Agudelo**, 2014).

A pesar de estar ubicada en un ambiente léntico, la estación 3L mostró durante la temporada lluviosa el valor más elevado del IIB-F dentro del sistema Torca-Guaymaral (0,677), lo que destaca su relevancia como núcleo de buena calidad ecológica. En este sitio se encontró una gran riqueza de desmidias, un grupo de algas muy sensible a los cambios en el pH, a la conductividad elevada y al exceso de nutrientes (**Necchi**, 2016). Su presencia suele asociarse a ambientes de aguas muy oxigenadas, con menor carga contaminante y una estructura funcional compleja. Esta observación es coherente con el patrón reportado por **Guillot y Pinilla** (2017), quienes identificaron áreas lénticas dentro de los humedales con mejores condiciones físicas y químicas debido a una menor exposición directa a las fuentes de contaminación difusa, como parece ser el caso de la estación 3L en el sector de Torca.

Durante la temporada seca, esta estación también registró un IIB-F alto (0,623), lo que sugiere una tendencia a cierto grado de estabilidad temporal, independientemente del periodo climático. Ello probablemente indica que determinados sectores del sistema

poseen algún nivel de resiliencia, eventualmente vinculada a la presencia de vegetación de macrófitas, lo que amortigua los efectos de la eutrofización, y a una hidrodinámica menos expuesta a contaminantes y flujos externos.

Los sectores lóticos o de quebradas (1Q, 2Q, 4Q) también se mantuvieron en la categoría de buena integridad en ambos periodos. Estos ambientes de flujo más constante suelen estar menos expuestos al estancamiento, lo que favorece una comunidad fitoplanctónica dominada por diatomeas centrales y pennales con biovolúmenes y relaciones ecológicas estables (**Bicudo & Menezes**, 2006). En particular, la alta proporción de diatomeas centrales —métrica incluida en el IIB-F— parece asociarse con condiciones de mayor oxigenación, baja turbidez y menor carga orgánica, atributos presentes en estas estaciones. En contraste, las estaciones 5C, 6C, 8L y 9L, especialmente durante el periodo lluvioso, presentaron valores más bajos de IIB-F, ubicándose en la categoría de integridad moderada.

Las condiciones de mayor carga orgánica podrían favorecer la presencia de géneros tolerantes, como *Navicula*, *Nitzschia* y *Surirella*, cuya abundancia relativa aumenta con la contaminación (**Oliva-Martínez *et al.***, 2014). La aparición de estos géneros, junto con un incremento del biovolumen de las cianobacterias observado en los sitios de menor integridad biótica, constituye una señal clara de un aumento de la eutrofización. De hecho, las cianobacterias son organismos pioneros que prosperan en ambientes con baja competencia, alta temperatura y nutrientes disponibles, especialmente fósforo, por lo que su biovolumen —otra métrica incluida en el IIB-F— aumenta con el grado de deterioro (**Gao *et al.***, 2023; **Cao *et al.,*** 2024).

Un aspecto interesante es que, aunque el sitio 6C registró un IIB-F bueno durante la época lluviosa (0,663), este descendió a moderado en el periodo seco (0,494), lo cual puede deberse a un aumento de la acumulación de nutrientes en este hábitat de canal durante la disminución del caudal. En estos ambientes canalizados es probable que la disminución de los aportes de agua durante el período seco intensifique los efectos de la concentración de contaminantes, debido a que los canales recogen y acumulan sustancias provenientes de los drenajes que los abastecen, las cuales tienden a concentrarse durante la temporada de estiaje, lo que podría afectar rápidamente a las comunidades fitoplanctónicas. Por el contrario, las estaciones 8L y 5C mostraron una ligera mejora entre ambos periodos, probablemente debido a una disminución temporal de las cargas externas o a procesos de sedimentación de los sólidos suspendidos, lo que podría incrementar la transparencia y favorecer a las algas planctónicas. Sin embargo, la condición ecológica de estos lugares sigue siendo de cuidado, puesto que permanecieron dentro del rango de integridad moderada.

El promedio general del IIB-F para ambas épocas fue similar (0,592 en el periodo de lluvias y 0,566 en la fase de sequía), sin diferencias estadísticamente significativas (U de Mann-Whitney, $p > 0,05$), lo que sugiere una relativa estabilidad funcional del fitoplancton frente a la variación estacional, al menos entre los dos periodos climáticos estudiados y parece corroborarse por la homogeneidad temporal observada en muchas de las variables físicas y químicas detectada mediante la prueba de Mann-Whitney, según la cual solo la concentración de clorofila-*a*, la DQO, el pH y los nitratos presentaron cambios significativos entre épocas climáticas. Sin embargo, las fluctuaciones entre los diferentes sitios del humedal evidencian la importancia de realizar monitoreos continuos, con resoluciones espaciales y temporales lo suficientemente detalladas como para capturar las posibles respuestas dinámicas de las algas.

En síntesis, nuestros resultados demuestran que el IIB-F desarrollado permitió discriminar adecuadamente entre los distintos niveles de perturbación en el humedal Torca-Guaymaral, proporcionando un diagnóstico acertado de su estado ecológico. Por su alta sensibilidad a las condiciones locales, a la disponibilidad de nutrientes, a la estabilidad hidrológica y a la transparencia del agua, la comunidad de algas planctónicas actúa como un indicador temprano y eficaz de cambios en la calidad ambiental (**Wehr *et al.***, 2015; **Bellinger & Sigee**, 2010). En este sentido, el IIB-F propuesto constituye una herramienta útil para evaluar la salud del ecosistema y complementa los enfoques previos centrados exclusivamente en las variables físicas y químicas (**Caho-Rodríguez & López-Barrera**,

2017) en las comunidades perifíticas (**Castro & Pinilla**, 2017) o en los macroinvertebrados (**Guillot**, 2017b; **Venegas-Escovar**, 2017). No obstante, es importante tener presente que la información utilizada proviene de unos pocos muestreos temporales y espaciales, por lo que los resultados del IIB-F, aunque coherentes, deben tomarse con la debida cautela. En el futuro, se requerirá aumentar el número de sitios evaluados y la frecuencia de los muestreos para afinar y consolidar el índice planteado. Un posible resultado de este incremento en el esfuerzo de muestreo espacial y temporal sería la creación de un mapa de zonificación que indique la integridad biológica del fitoplancton y la salud del ecosistema del humedal Torca-Guaymaral, proporcionando así una herramienta útil para su gestión y conservación. Por el momento, los resultados muestran que el sector que requiere las mayores medidas para controlar la contaminación es la zona de Guaymaral.

## Información suplementaria

Tabla suplementaria: https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3222/5377

Figura suplementaria: https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3222/5378

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Biología de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, por facilitar el uso de sus instalaciones y por el apoyo brindado durante la realización de los análisis de las muestras fitoplanctónicas en sus laboratorios, y al Laboratorio de Hidrobiología Ambius S.A.S. por la provisión de los equipos necesarios para la ejecución del trabajo de campo, lo cual fue fundamental para el desarrollo de este estudio. También se agradece a la Secretaría Distrital de Ambiente por los permisos y el acompañamiento durante los muestreos de campo, así como a los revisores anónimos, cuyos comentarios permitieron optimizar la versión final del artículo.

## Contribución de los autores

CFB concibió el proyecto y realizó los muestreos de campo y los análisis de laboratorio; CGR contribuyó con el diseño del muestreo y el análisis de los datos; GAP hizo los análisis numéricos y estadísticos del índice biótico; CFB, CGR y GAP redactaron el documento, participaron en el análisis de los resultados e hicieron aportes conceptuales a la versión final.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses.

## Referencias

**Alcaldía Mayor de Bogotá.** (2017). *Plan de ordenamiento zonal del norte ciudad Lagos de Torca*. Documento Técnico de Soporte. https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/anexo_n_1_documento_tecnico_de_soporte.pdf

**Al-Janabi, Z. Z., Al-Obaidy, A-H. M. J., Al-Kubaisi, A-R.** (2016). Use of Phytoplankton Index of Biological Integrity (P-IBI) as a tool to evaluate Tigris River Health. *Mesopotamia Environmental Journal*, Special Issue A, 62-68.

**Baird, R. & Bridgewater, L**. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). American Public Health Association.

**Bicudo, C. D. & Meneses M.** (2006). *Géneros de algas de águas continentais do Brasil: chave para identificação e descrições*, 2. ed. Rima Editora.

**Bellinger, E., Sigee, D.** (2010). *Freshwater algae: identification and use as bioindicators*. Wiley-Blackwell.

**Caho-Rodríguez, C. A. & López-Barrera, E. A.** (2017). Determination of the water quality index for the western section of the Torca-Guaymaral wetland using UWQI and CWQI methodologies. *Producción + Limpia*, *12*(2), 35-49. https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a3

**Calow, P.** (1992). Can ecosystems be healthy? Critical consideration of concepts. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, *1*, 1-5. https://doi.org/10.1007/BF00044403

**Cao, J-L., Liang, H-Y., Zhang, Y-H., Du, S-L., Zhang, J., Tao, Y.** (2024). Development and evaluation of the Plankton Biological Integrity Index (P-IBI) in dry and wet seasons for Dianchi Lake. *Ecologies*, *5*, 68-82. https://doi.org/10.3390/ ecologies5010005

**Cardozo, A. Y., Bermúdez, A., Aranguren, N., Duque, S. R.** (2005). Algas planctónicas del lago de Tota: listado taxonómico actualizado. *Ciencia en Desarrollo*, *2*(1), 80-88. https://doi.org/10.19053/issn.0121-7488

**Castro-Roa, D. & Pinilla-Agudelo, G. A.** (2014). Periphytic diatom index for assessing the ecological quality of the Colombian Andean urban wetlands of Bogotá. *Limnetica*, *33*(2), 297-312. https://doi.org/10.23818/limn.33.23

**Castro, D. & Pinilla, G.** (2017). Índice de diatomeas perifíticas para evaluar la calidad del agua en los humedales distritales bogotanos (IDHB). En Guillot, G.H., Pinilla, G.A. (Eds), *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*, pp. 270-284. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

**Cortés Ballén, L. A.** (2017). Aproximación al paisaje de los humedales urbanos de Bogotá dentro de la estructura ecológica principal de la ciudad. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, *27*(1), 118-130. https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n1.60584.

**Dos Santos, M.** (2016). *Atlas algas del Paraguay. Características e importancia, muestreos en Paraguay, claves de identificación e ilustraciones*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción.

**Francoeur, S. N., Rier, S. T., Whorley, S. B.** (2013). Methods for sampling and analyzing wetland algae. En J. Anderson, C. Davis (Eds.), *Wetland Techniques*, pp. 1-58. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6931-1_1

**Gao, W., Xiong, F., Lu, Y., Qu, X., Xin, W., Chen, Y.** (2023). Development of a phytoplankton-based index of biotic integrity for ecological health assessment in the Yangtze River. *Ecological Processes*, *12*, 41. https://doi.org/10.1186/s13717-023-00456-7

**González, M. & Inostroza, I.** (2017). *Manual taxonómico y fotográfico de géneros fitoplanctónicos (excl. Diatomeas) de 7 lagunas de Gran Concepción*. Universidad de Concepción.

**Guillot, G.** (2017a). Protocolo para el muestreo y seguimiento de humedales. En G. H. Guillot, G. A. Pinilla (Eds.), *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*, pp. 33-80. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

**Guillot, G.** (2017b). Implementación del protocolo para valorar las comunidades de macro-invertebrados asociados a la vegetación de los humedales Guaymaral, Santa María del Lago y Tibanica. En G. H. Guillot, G. A. Pinilla (Eds.), *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*, pp. 198-217. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

**Guillot, G. H. & Pinilla, G. A. (Eds.).** (2017). *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

**Guiry, M. D. & Guiry, G. M.** (2025). AlgaeBase. World-wide electronic publication, University of Galway. https://www.algaebase.org

**Hammer, O., Harper, D. T., Ryan, P. D.** (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica*, *4*(1), 9.

**Hillebrand, H., Dürselen, C., Kirschtel, D., Kirschtel, D., Pollingher, U., Zohary, T.** (1999). Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, *35*(2), 403-424. https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x

**Huang, X., Xu, J., Liu, B., Guan, X., Li, J.** (2022). Assessment of aquatic ecosystem health with indices of biotic integrity (IBIs) in the Ganjiang River System, China. *Water*, *14*, 278. https://doi.org/10.3390/w14030278

**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.** (2022). Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos. http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/

**Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia – IDEA & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB.** (2008). *Plan de manejo ambiental de los humedales de Torca y Guaymaral. Diagnóstico*. EAAB.

**Kane, D. D., Gordon, S. I., Munawar, M, Charlton, M. N, Culver, D. A.** (2009). The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): An approach for assessing lake ecosystem health. *Ecological Indicators*, *9*(6), 1234-1247. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.03.014

**Karr, J. R.** (1981). Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, *6*(6), 21-27. https://doi. org/10.1577/1548-8446(1981)006<0021:aobiuf>2.0.co;2

**Karr, J. R. & Dudley, D. R.** (1981). Ecological perspective on water quality goals. *Environmental Management*, *5*(1), 55-68. https://doi.org/10.1007/BF01866609

**Karr, J. R., Fausch, K. D., Angermeier, P. L., Yant, P. R., Scholosser, I. J.** (1986). *Assessing biological integrity in running waters. A method and its rationale*. Illinois Natural History Survey.

**Karr, J. R., Larson, E. R., Chu, E. W.** (2021). Ecological integrity is both real and valuable. *Conservation Science and Practice*, 4:e583. https://doi.org/10.1111/csp2.583

**LeGresley, M. & McDermott, G.** (2010). Counting chamber methods for quantitative phytoplankton analysis: Haemocytometer, Palmer-Maloney cell and Sedgewick-Rafter cell. En B. Karlson, C. Cusack, E. Bresnan (Eds.), *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis*, pp. 25-30. UNESCO (IOC Manuals and Guides, Nº. 55.) (IOC/2010/MG/55).

**Lu, Y., Wang, R., Zhang, Y., Su, H., Wang, P., Jenkins, A., Ferrier, R. C., Bailey, M., Squire, G.** (2015). Ecosystem health towards sustainability. *Ecosystem Health and Sustainability*, *1*(1), 1-15. http://dx.doi.org/10.1890/EHS14

**Maulood, B. K., Alobaidy, A. H. M. J., Alsaboonchi, A., Abid, H. S., Alobaidy, G. S.** (2011). Phytoplankton Index of Biological Integrity (P-IBI) in several marshes, Southern IRAQ. *Journal of Environmental Protection*, *2*, 387-394. https://doi.org/10.4236/jep.2011.24043

**McAlice, B.** (1971). Phytoplankton sampling with the Sedgwick-Rafter cell. *Limnology and Oceanography*, *16*(1), 19-28. https://doi.org/10.4319/lo.1971.16.1.0019

**Montoya-Rojas, G. A. & Rivera-Marroquín, M. E.** (2021). Los componentes ambientales de la cuenca Torca: un insumo para el análisis de los escenarios de variabilidad climática en la ciudad de Bogotá, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, *24*(1), e183. https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1833

**Necchi, O. (Ed.).** (2016). *River Algae*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31984-1_1

**Oliva-Martínez, M., Godínez-Ortega, J. L., Zuñiga-Ramos, C. A.** (2014). Biodiversidad del fitoplancton de aguas continentales de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *Supl. 85*, S54-S61. httpS://doi.org/ 10.7550/rmb.32706

**Pinilla, G.** (2010). An index of limnological conditions for urban wetlands of Bogotá city, Colombia. *Ecological Indicators*, *10*, 848-856. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.01.006

**Pinilla-Agudelo, G. A.** (2016). Algunas experiencias en el uso de índices limnológicos en Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, *21*(1), S241-248. httpS://doi.org/10.15446/abc.v21n1sup.51073

**Pinilla, G.** (2017). Índice de condiciones limnológicas para los humedales de la ciudad de Bogotá. En G. H. Guillot, G. A. Pinilla (Eds.), *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*, pp. 285-309. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

**Pinilla, G. A., Montenegro, L. C., Melgarejo, L. M., Molano-González, N., Pineda, A., Delgadillo, I. P., Forero, M. A.** (2021). Growth rates of microalgae encapsulated in calcium alginate as a possible indicator of the trophic state of aquatic ecosystems. *Limnetica*, *40*(2), 385-398. httpS://doi.org/10.23818/limn.40.26

**Pulido-López, P. C.** (2015). *El fitoplancton en la determinación del estado trófico del humedal El Salitre (Bogotá D.C., Colombia) en épocas climáticas contrastantes*. Tesis Maestría, Universidad Jorge Tadeo Lozano.

**Pulido-López, P. C. & Pinilla-Agudelo, G. A.** (2017). Evaluación del estado trófico de El Salitre, último humedal urbano de referencia en Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *41*(158), 41-50. http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.411

**Rueden, C. T., Schindelin, J., Hiner, M. C., De Zonia, B. E., Walter, A. E., Arena, E. T., Eliceiri, K. W.** (2017). ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics*, *18*(1), 1-26. https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z

**Schmitter-Soto, J. J.** (2014). Los índices bióticos de integridad en el monitoreo ambiental. En C. A. González Zuarth, S. Vallarino, J. C. Pérez Jiménez, A. M Low Pfeng (Eds.), *Bioindicadores: guardianes de nuestro futuro ambiental*, pp. 65-82. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

**Schaeffer, D. J., Herricks, E. E., Kerster, H. W.** (1988). Ecosystem health. I. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, *12*, 445-455. https://doi.org/10.1007/BF01873258

**Sun, J. & Liu, D.** (2003). Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, *25*(11), 1331-1346. https://doi.org/10.1093/plankt/fbg096

**Tell, G. & Conforti, V.** (1986). *Euglenophyta pigmentadas de la Argentina*. J. Cramer.

**Teng, L., Zhang, B., Liu, X., Bai, C., Zhang, J., Tan, D., Huang, P.** (2014). Development and use of a phytoplankton-index of biotic integrity to assess Yongjiang River ecosystem health. *Polish Journal of Environmental Studies*, *23*(3), 901-908.

**Venegas-Escovar, M.** (2017). Estado limnológico de los humedales Tibanica, Guaymaral, Jaboque y Meridor utilizando macroinvertebrados como bioindicadores. En G. H. Guillot, G. A. Pinilla (Eds.), *Estudios ecológicos en humedales de Bogotá: aplicaciones para su evaluación, seguimiento y manejo*, pp. 218-231. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

**Wehr, J., Sheath, R., Patrick, J.** (2015). *Freshwater algae of North America. Ecology and classification*, 2da ed. Academic Press.

**Whittier, T. R., Stoddard, J. L., Larsen, D. P., Herlihy, A. T.** (2007). Selecting reference sites for stream biological assessments: best professional judgment or objective criteria. *Journal of the North American Benthological Society*, *26*(2), 349-360. https://doi.org/10.1899/0887-3593(2007)26[349:SRSFSB]2.0.CO;2

**Wolterbeek, H., Bode, P., Verburg, T.** (1996). Assessing the quality of biomonitoring via signal-to-noise ratio analysis. *The Science of the Total Environment*, *180*, 107-l16. https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04944-4

**Wu, Z., Kong, M., Cai, Y., Wang, X., Li, K.** (2019). Index of biotic integrity based on phytoplankton and water quality index: Do they have a similar pattern on water quality assessment? A study of rivers in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, *658*, 395-404. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.216

**Zhu, H., Hu, X-D., Wu, P-P., Chen, W-M., Wu, S-S., Li, Z-Q., Zhu, L., Xi, Y-L., Huang, R.** (2021). Development and testing of the phytoplankton biological integrity index (P-IBI) in dry and wet seasons for Lake Gehu. *Ecological Indicators*, *129*, 107882. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107882.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):821-836, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4045



Original article

# Antioxidant, anti-inflammatory, and antimicrobial activity of a fluid extract and anthocyanidins of *Vaccinium floribundum* Kunth (Mortiño) berries from Cotopaxi

## Actividad antioxidante, antiinflamatoria y antimicrobiana de un extracto fluido y de antocianidinas de bayas de *Vaccinium floribundum* Kunth (Mortiño) de Cotopaxi

**Johana Meneses*, Alexis Eras, Dayana Vásquez, María Elena Maldonado**

Research Group on Biotechnology Applied to Natural Resources (BIOARN), Polytechnic Salesian University (UPS), Quito, Ecuador

## Abstract

*Vaccinium floribundum* Kunth (QUPS Herbarium accession number 4803), commonly known as mortiño, is characterized by its high concentrations of bioactive compounds, particularly polyphenolic compounds, which play a significant role in its biological activity. Here, we aimed to investigate the role of anthocyanins after identifying and quantifying them using differential pH, thin-layer chromatography (TLC), and high-performance liquid chromatography (HPLC) on a fluid extract. Its biological activity was evaluated with antioxidant assays (ABTS and DPPH), which yielded antioxidant activity values of 833.47 µg/mL (ABTS) and 1418.01 µg/mL (DPPH). The anti-inflammatory activity, evaluated using membrane stability (MS) assays under thermal stress, showed maximum inhibition percentages of 32.31% and 34.26% for the anthocyanidins (cyanidin and delphinidin) at 1 µg/mL, with 92.56% inhibition in a 1000 µg/mL extract. Similarly, an additive effect was observed from the anthocyanins and flavonoids in the extract. Furthermore, antimicrobial evaluations using antibiograms and microplate dilution methods against urinary tract infection (UTI) pathogens demonstrated significant inhibition of *Staphylococcus saprophyticus* (50% extract, MIC = 3125 µg/mL, 55.29% inhibition), *Pseudomonas aeruginosa* (50% extract, MIC = 12500 µg/mL, 71.45% inhibition), *Escherichia coli* (50% extract, MIC = 12500 µg/mL, 35.04% inhibition), and *Candida tropicalis* (100% extract, MIC = 6250 µg/mL, 12.88% inhibition). Our findings suggest that the mortiño extract contains substantial levels of anthocyanins, with cyanidin being the predominant anthocyanin. Both anthocyanins and anthocyanidins exhibited significant antioxidant, anti-inflammatory, and antimicrobial activity, supporting the potential therapeutic value of mortiño in addressing oxidative stress, inflammation, and microbial infections.

**Keywords:** *Vaccinium floribundum;* antimicrobial activity; anti-inflammatory activity; antioxidant activity; urinary tract infections (UTIs); anthocyanidins.

## Resumen

*Vaccinium floribundum* Kunth (número de registro en el Herbario QUPS 4803), comúnmente conocida como mortiño, se caracteriza por sus altas concentraciones de compuestos bioactivos en compuestos polifenólicos, los cuales desempeñan un papel importante en su actividad biológica. Nuestro objetivo fue investigar el papel de las antocianinas en lo concerniente a sus propiedades biológicas después de identificarlas y cuantificarlas mediante pH diferencial, cromatografía en capa fina (TLC) y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) en un extracto fluido de mortiño. Las actividades biológicas se evaluaron mediante ensayos antioxidantes (ABTS y DPPH), que arrojaron valores de actividad antioxidante de 833,47 µg/mL (ABTS) y 1418,01 µg/mL (DPPH). La actividad antiinflamatoria evaluada en ensayos de estabilidad de membrana (MS) bajo estrés térmico mostraron porcentajes máximos de inhibición de 32,31 % y 34,26 % para las antocianidinas (cianidina y

**Citation:** Meneses J, et al. Antioxidant, anti-inflammatory, and antimicrobial activity of a fluid extract and anthocyanidins of *Vaccinium floribundum* Kunth (Mortiño) berries from Cotopaxi. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):821-836, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4045

**Editor:** Sonia Moreno

***Corresponding autor:**
Johana Meneses; jmeneses@ups.edu.ec

**Received:** February 4, 2026
**Accepted:** May 3, 2026
**Published on line:** June 18, 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

delfinidina) en 1 µg/mL, con 92,56 % de inhibición para el extracto de 1000 µg/mL, así como un efecto aditivo de las antocianinas y flavonoides. Además, las evaluaciones antimicrobianas mediante antibiogramas y métodos de dilución en microplaca contra patógenos causantes de infecciones del tracto urinario (ITU) demostraron una inhibición significativa de *S. saprophyticus* (extracto al 50 %, CMI = 3125 µg/mL, 55,29 % de inhibición), *P. aeruginosa* (extracto al 50 %, CMI = 12500 µg/mL, 71,45 % de inhibición), *E. coli* (extracto al 50 %, CMI = 12500 µg/mL, 35,04 % de inhibición) y *C. tropicalis* (extracto al 100 %, CMI = 6250 µg/mL, 12,88 % de inhibición). Estos hallazgos sugieren que el extracto de mortiño contiene niveles sustanciales de antocianinas, siendo la cianidina la predominante en el estudio. Tanto las antocianinas como las antocianidinas exhibieron importantes actividades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas, lo que respalda el valor terapéutico potencial del mortiño para abordar el estrés oxidativo, la inflamación y las infecciones microbianas.

**Palabras clave:** *Vaccinium floribundum;* actividad antimicrobiana; actividad antiinflamatoria; actividad antioxidante; infecciones del tracto urinario (UTIs); antocianidinas.

## Introduction

Anthocyanins are glycosylated derivatives of anthocyanidins; they are phenolic compounds with essential biological functions in plants, including UV protection, osmotic regulation, and pollinator attraction. They also act as sun filters, photoprotective agents, providers of post-harvest benefits, and defense mechanisms (**Liu *et al.***, 2018; **Riaz *et al.,*** 2016). These compounds typically accumulate in young tissues and sun-exposed parts, such as fruits, where they protect against photoinhibition and photobleaching (**Esquivel-Alvarado *et al.***, 2020). Anthocyanins and anthocyanidins (aglycones) share a core chemical structure, which is the flavylium or 2-phenylbenzopyrylium cation that contains the oxonium group or charged oxygen (2,6,9). The six most common anthocyanidin derivatives are cyanidin (Cy), delphinidin (Df), celargonidin (Pg), petunidin (Pt), peonidin (Pn), and malvidin (Mv), which collectively represent approximately 90% of identified anthocyanins (**Riaz *et al.***, 2016; **Yuzhi Jiao**, 2012; **Cerrato *et al.***, 2022). Their biosynthesis occurs via the phenylpropanoid metabolic pathway (a mixed process involving the shikimic and acetic acids pathway) mediated by multiple enzymes, in which chalcones are synthesized. Chalcones are then converted into dihydroflavonols, which are subsequently reduced to form leucoanthocyanidins that are later transformed into anthocyanidins. These last compounds are derivatized to stabilize them and produce anthocyanins (**Zhang *et al.***, 2013). Additionally, their biosynthesis is controlled by the regulatory complex MYB-bHLH-WD40 (MBW), which encodes structural and regulatory genes responsible for the enzyme production of the metabolic pathway and transcription factors, respectively (**Liu *et al.***, 2018).

*Vaccinium floribundum* Kunth, commonly known as mortiño, Andean berry, wild berry, or Andean blueberry, exhibits high concentrations of biologically active compounds, particularly anthocyanins. Its fruit is rich in anthocyanins, flavonols, phenolic acids, and proanthocyanins (PCAs), with anthocyanins and flavonols being the most predominant compounds (**Martău *et al.***, 2023). The species typically grows at an average altitude of 3,600 meters above sea level (MASL), thriving in moors and mountain ranges along the Andes. Taxonomically, it belongs to the order Ericales, family *Ericaceae,* and genus *Vaccinium*. Its scientific name is *Vaccinium floribundum* Kunth, with the synonym *Vaccinium mortinia* (**Howell**, 2020). *Vaccinium* genus fruits, including *V. floribundum*, are notable for their antioxidant properties, which are attributed to their high content of bioactive compounds. This characteristic is shared with other *Vaccinium* species whose anthocyanins are the compounds associated with significant biological activities (**Esquivel-Alvarado *et al.***, 2020; **Howell,** 2020; **Pérez *et al.***, 2021; **Re *et al.***, 1999). Anthocyanins are water-soluble active ingredients that can be degraded at high temperatures and basic pH, for which a suitable extraction method can be percolation, since it is a mild process allowing for the obtention of unstable molecules (**Re *et al.***, 1999). It is a commonly employed technique that uses methanol as a solvent and a strong acid (e.g., HCl) as an acidifying agent. However, the solvent can be substituted by ethanol, given the toxicity of methanol, and the strong

acids by soft ones or no acid, given the hydrolysis of anthocyanins. Rotary evaporation of the extract needs temperatures between 30 and 60°C (**Re *et al.***, 1999) and is a common extraction method for various preparations in the Chinese pharmacopeia since it is easy, but it uses large amounts of solvent, and the extraction time is long. In Ecuador, it is part of phytopharmacology, and it is a common method for obtaining raw extracts with bioactive metabolites from medicinal plants.

In several studies, chromatography techniques have shown that *V. floribundum* (mortiño) phytochemical profile reveals the abundance of anthocyanins and flavonols as key components of its composition. Among the anthocyanins, cyanidin (Cy), delphinidin (Df), peonidin (Pn), and pelargonidin (Pg) have been identified, with cyanidin derivatives being the most predominant. Mortiño's antimicrobial activity against urinary tract infections (UTIs) caused by fungi (*Candida* spp.: *C. albicans, C. glabrata, C. auris, C. parapsilosis, C. tropicalis, C. kefir, C. lusitanae, C. guilhermondi*, and *C. dubliniensis*), Gram-positive (*Enterococcus* spp., *S. saprophyticus, S. aureus*, Group B *Streptococcus*), and Gram-negative bacteria (*E. coli, Klebsiella pneumoniae, Proteus mirabilis, P. aeruginosa*) (**Ortega**, 2018) was demonstrated by **Barba-Ostria *et al.*** (2024) in their study: *V. floribundum* extract exhibited minimum inhibitory concentrations (MIC) ranging from 2.1–2.5 mg/mL for Gram-positive bacteria, 12–18 mg/mL for Gram-negative bacteria, and 100–180 mg/mL for yeasts. The extract was most effective against Gram-positive bacteria, showing susceptibility across all strains studied (**Pérez *et al.***, 2021). Another study evaluated the ability of the extract to inhibit biofilm formation, demonstrating its inhibitory effects on *S. aureus, E. faecalis, L. monocytogenes, C. tropicalis*, and *B. cepacia*. The minimum biofilm inhibitory concentrations (MBIC50) were found to be between 0.5 and 5 mg/mL for the first four strains and 20 mg/mL for *B. cepacian* (**Brand-Williams *et al.***, 1995). Focusing on pathogens associated with UTIs, previous studies have highlighted the role of cranberry, a related species from the *Vaccinium* genus, in preventing them (**Alarcón-Barrera *et al.***, 2018).

There is no in-depth information regarding the potential anti-inflammatory and antimicrobial activity (i.e., antiadhesion activity) on uropathogens of pure anthocyanidins, the more reactive form of anthocyanins, and of pure anthocyanin mortiño extract, which has cyanidin derivatives as the main anthocyanin. In this context, we aimed to determine the presence of anthocyanins (identification and quantification) in the hydroethanolic extract of *V. floribundum* (mortiño), to evaluate its anti-inflammatory activity and its antimicrobial activity on uropathogens, as well as the antioxidant properties of mortiño anthocyanin-rich extract, and compare it to pure anthocyanin.

## Materials and methods

### *Vegetal material*

Plant material was collected in the province of Cotopaxi, Sigchos canton, at Mercado 24 de Mayo, located at 00° 42' 03''S and 78°53'14'W. Before obtaining the *V. floribundum* ethanolic extract, the fruits were cleaned to remove impurities, including leaves, stems, and damaged or unripe fruits. The fruits were then washed three times with distilled water to eliminate surface impurities and subsequently disinfected using 1% sodium hypochlorite ($NaClO_3$) (**Howell**, 2020).

### *Extraction*

The fruit (3000 g) was left in the solvent for 24 hours at room temperature. The following day, the first filtration was performed, yielding 85% of the required final volume. Solvent was added again for another 24 hours to extract the second fraction. The resulting material also had to be filtered. The total volume obtained over the two days was concentrated in a rotary evaporator (Rotavapor, IKA RV) at 40°C until 15% of the required final volume was obtained. The two fractions were combined to produce the final fluid extract with a concentration of 1 g FF/mL. The extract was stored in amber glass bottles and refrigerated at 4°C for subsequent analysis. The extraction yield amounted to 36.67%.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):821-836, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4045

### *Anthocyanins hydrolysis*

The extract sample was pretreated through hydrolysis to facilitate the identification of anthocyanins, as the available standards were in the form of cyanidin chloride (CyCl) (Sigma-Aldrich) and delphinidin chloride (DfCl) (Sigma-Aldrich). The procedure followed a slightly modified version of the protocols described by **Pinho *et al*.** (2011) and **Filip *et al.*** (2012). For acidification, 50 mL of pure extract was combined with 5 mL of 6 M hydrochloric acid (HCl) (Fischer Scientific, 37%), and heated at 60°C for 30 minutes.

### *Identification of anthocyanins by thin-layer chromatography (TLC)*

Anthocyanins were identified following the protocol by **Poole** (2023). To confirm the presence of anthocyanins in the pure (Ep) and hydrolyzed extract (Ea), we performed a TLC with a mobile phase comprising ethyl acetate (AcEt), formic acid (HCOOH), glacial acetic acid ($CH_3COOH$), and distilled water ($H_2O$ d.) in a 10:1.1:1.1:2.6 ratio. The samples were compared with two cyanidin chloride and delphinidin chloride standards at a concentration of 0.1 mg/mL using a high-performance TLC F254 silica gel glass plate (10 × 10 cm) (Merck) and a Camag Linomat 5 applicator. Subsequently, the TLC was visualized with a Camag UV lamp at 365 nm and 254 nm, and we measured the retention factors (Rf) for each sample and standard.

### *Anthocyanins quantification by pH differential method*

We quantified total monomeric anthocyanins (TAC) using the AOAC official method (**AOAC**, 2005). Potassium chloride (KCl, 0.025 M, pH 1.0) and sodium acetate (AcONa, 0.4 M, pH 4.5) were used as buffers. The extract was then diluted in the buffer for analysis with a Jasco V730 UV-Vis spectrophotometer. Absorbance of each dilution was measured at 520 nm and 700 nm in triplicate. TAC was calculated using the following equations: cyanidin-3-glucoside (C3G) equivalents per liter of extract (mg C3G Eq/L Ep) (Equation 1) and C3G equivalents per gram of fresh fruit (mg C3G Eq/g FF) (Equation 2) (**Chandra Singh *et al*.**, 2022):

$$\text{TAC 1}(mg\ C3G\ Eq) = (A \times MW \times DF \times 103) / (\mathcal{E} \times 1) \quad (1)$$

$$\text{TAC 2}\ (mg\ C3G\ Eq / g\ FF) = CTA1 \times V \times M \quad (2)$$

(MW: molecular weight, 449.2 g/mol, FD: dilution factor, V: volume of the sample obtained from the extract (L), Ɛ: molar absorptivity coefficient of C3G, 26 900 1/M*cm, M: weight of the sample used for extract (g), I: length of the distance traveled; Absorbance: $A = (A520nm - A700nm)pH\ 1.0 - (A520nm - A700nm)pH\ 4.5$, where A520nm pH 1.0 and A700nm pH 1.0: Absorbance of the sample diluted in KCl buffer pH 1 at 520 nm and 700 nm, respectively; and A520nm pH 4.5 and A700nm pH 4.5: Absorbance of the sample diluted in NaOAc buffer pH 4.5 at 520 nm and 700 nm, respectively).

### *Anthocyanins quantification and identification using high-performance liquid chromatography*

To confirm anthocyanins quantification and identification, analyses were conducted using an Ultimate 3000 HPLC system equipped with a Hypertensil GOLD™ C-18 column (150 × 4.6 mm), an autosampler, a quaternary pump, a column compartment, and a diode array detector (DAD). The samples analyzed included the pure (Ep) and hydrolyzed (Ea) extracts, and the cyanidin chloride (CyCl) standard at 1000 ppm (2 mg/mL). All samples were filtered using 0.45 µm filters and placed in amber HPLC vials to prevent degradation. The analysis was performed using a reversed-phase C-18 column under isocratic conditions with a mobile phase of type I water ($H_2O$, 70%) and acetonitrile (ACN, analytical grade, 30%). The total run time was 10 minutes, with a flow rate of 1 mL/min and an injection volume of 5 µL. Anthocyanins were detected at an absorbance wavelength of 535 nm, which was also used for their quantification. Total anthocyanins were quantified using the internal standard method with cyanidin chloride (CyCl, 2 mg/mL) as the standard, and the following formula (Equation 3):

$$FR = ((Ax \times Cs)) / ((Cx \times As) \rightarrow Cx = ((Ax \times Cs)) / ((FR \times As)) \quad (3)$$

(*FR*: response factor, 1.36, *Ax*: sample relative area, *As*: standard relative area, *Cx*: sample concentration, *Cs*: standard concentration).

***Antioxidant activity***

We evaluated the antioxidant activity of mortiño using two well-established methods: the ABTS assay (2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (**Re *et al.,*** 1999; **Rumpf *et al.***, 2023) and the DPPH assay (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) (**Alarcón-Barrera *et al.***, 2018; **Howell**, 2020; **Xiao *et al.***, 2020).

The ABTS assay followed the procedure described by **Brand-Williams *et al.*** (1995), which involves generating the cationic radical ABTS•+. To prepare it, we used a 2.45 mM potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) solution to activate a 7 mM ABTS solution. Once the cationic radical was formed, the ABTS•+ solution was diluted in phosphate-buffered saline (PBS, pH 7.4, prepared in advance) to achieve an absorbance of 0.70 ± 0.02 at 734 nm.

After obtaining the appropriately diluted ABTS•+ solution, we conducted the antioxidant test. We mixed 990 µL of diluted ABTS•+ with 10 µL of each sample, including dilutions of the pure extract (Ep), ascorbic acid (AA, as the standard), or the blank (PBS). The mixture was shaken and allowed to react for 6 minutes, after which its absorbance was measured at 734 nm (λ = 734 nm). Ep and AA dilutions were prepared to determine their high minimum inhibitory concentration (IC50). The IC50 values were calculated using Equation (4) (**Meneses & Moncayo**, 2022; **Musuña & Varela**, 2020):

$$\% ((Ai - Af)) / (Ai) \times 100) \quad (4),$$

where Ai is ABTS•+ absorbance with the blank (PBS), and Af is ABTS•+ absorbance with the antioxidant after 6 minutes.

To calculate the ABTS antioxidant capacity, we used the average inhibition percentage of the pure extract (Ep) at 0.1 µg/mL. Using the linear estimation equation derived from the ascorbic acid (AA) standard curve (Equation 5), the equivalent concentration (Ceq) was determined. Subsequently, the equivalent concentration (Ceq) was used to compute the ABTS antioxidant capacity, expressed as milligrams of ascorbic acid equivalents per gram of fresh fruit (mg AA Eq/g FW), according to Equation 6 (**Meneses & Moncayo**, 2022; **Musuña & Varela**, 2020).

$$Equivalent\ Concentration = Ceq((ug\ AA\ Eq) / (mL\ of\ Extract) = /\mathrm{m} \quad (5)$$

$$ABTS\ Value\ (mg\ \ Eq / (g\ FW) = ((Ceq \times DF \times V)) / ((M \times 1000))) \quad (6)$$

(DF: dilution factor, V: volume of sample obtained from the extract (L), M: weight of the sample used for the extract (g), %I: Inhibition percentage of the sample (Ep 0.1 g/mL), m: slope of the standard line (AA), b: intercept of the standard line (AA).

The DPPH method followed the procedure described by **Brand-Williams *et al.*** (1995). First, the DPPH radical (DPPH•) was prepared. Then, a 0.120 mM DPPH solution was prepared to achieve an absorbance of approximately 1.0 at 517 nm (λ = 517 nm) and stored in an amber glass bottle for 24 hours. After, 1000 µL of DPPH• solution were mixed with 100 µL of each sample, including dilutions of the pure extract (Ep), ascorbic acid (AA, as a standard), and a blank (methanol, MeOH). The mixture was shaken and allowed to react for 30 minutes before measuring the absorbance at 517 nm. Ep and AA dilutions were prepared to determine their IC50 values. The IC50 was calculated using Equation 7:

$$\%I = ((Ai - Af)) / (Ai) \times 100) \quad (7),$$

where Ai: absorbance of DPPH• with the blank (MeOH) and Af: absorbance of DPPH• with the antioxidant after 30 minutes.

To determine the DPPH test value, we used the average inhibition percentage of the pure extract (Ep) at 0.1 µg/mL. Using the logarithmic estimation equation derived from the standard Equation 8, we calculated the equivalent concentration (Ceq). Subsequently, we

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):821-836, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4045

used it to estimate the DPPH antioxidant capacity, expressed as milligrams of ascorbic acid equivalents per gram of fresh fruit (FW) (mg AA Eq/g FW), using Equation 9 (**Meneses & Moncayo**, 2022; **Musuña & Varela**, 2020).

$$Equivalent\ Concentration = Cep\ ((ug\ AA\ Eq)/(mL\ of\ Extract) = ((\%I - b))/m) \quad (8)$$

$$DPH\ Value\ \ ((mg\ AA\ Eq)/(g\ FW) = ((Ceq \times DF \times Eq))/((M \times 1000)) \quad (9)$$

(FD: dilution factor, V: volume of the sample obtained from the extract (L), M: weight of the sample used for the extract (g), %I: percentage of inhibition of the sample (Ep 0.1 g/mL), m: slope of the standard line (AA), b: intercept of the standard line (AA).

***Anti-inflammatory activity***

We used the membrane stabilization (MS) assay to evaluate the anti-inflammatory activity in two anthocyanidins (Df and Cy), a flavonol (quercetin, Qc), a commercial anti-inflammatory (diclofenac sodium, Ds), and the pure extract (Ep). For the *in vitro* analysis, we used each of the compounds (Df, Cy, Qc, Ds, Ep) to measure their capacity to inhibit human red blood cells (HRBC) hemolysis induced by heat. For this, we collected intravenously fresh whole blood (5 mL) in heparinized tubes to prevent coagulation. A volume of 3 mL of blood was transferred to a Falcon tube and centrifuged at 3000 rpm for 5 minutes at room temperature using an Eppendorf 5430R refrigerated centrifuge. The red blood cell pellet was resuspended three times in an equal volume of normal saline solution (0.9% m/v saline solution, SS) to wash and remove turbidity. The volume obtained from the dissolved red blood pellet was measured and reconstituted as a 40% v/v suspension with isotonic buffer solution (sodium phosphate buffer, PBS pH 7.4). This reconstitution was used for the analysis, while the corresponding Qc, Ds, Df, Cy, and Ep dilutions were made from stock solutions (0.1 mg/mL) (**Qamar *et al.***, 2021; **Xiao *et al.***, 2020).

***Antimicrobial activity***

*Reactivation of strains*. To prepare viable strains for antibiogram and minimum inhibitory concentration (MIC) tests in microplates, we cultured the microorganisms from a cryobank using beads. We used the following bacterial strains and a yeast strain: *E. coli* ATCC 25922, *P. aeruginosa* ATCC 9027, *S. saprophyticus* ATCC 15305, and *C. tropicalis* ATCC 13803. A bead from each strain was extracted and streaked onto Petri dishes containing the appropriate culture medium for each microorganism. For *E. coli, P. aeruginosa*, and *S. saprophyticus*, tryptic soy agar (TSA) was used, and the plates were incubated at 37°C for 18–24 hours. For *C. tropicalis*, Sabouraud dextrose agar (SDA) was used, with incubation at 25°C for 48 hours (**Sadilova *et al.***, 2007).

The antimicrobial activity assays required standardization of the inoculum to a 0.5 McFarland scale after the incubation period.

***Antibiogram by agar diffusion method: Kirby-Bauer antibiotic testing***

We inoculated 200 µL of each microbial strain on a plate containing Mueller-Hinton Agar (MHA) medium. We inoculated four discs for each microorganism: one containing an antibiotic, one blank disc, one impregnated with 50% blueberry extract, and another one with 100% blueberry extract. The antibiotics used were the following: streptomycin for *E. coli*, cefepime for *P. aeruginosa*, nitrofurantoin for *S. saprophyticus*, and fluconazole for *C. tropicalis*. Petri dishes were incubated under the conditions described in the section "Reactivation of strains". After the incubation period, we assessed the results by measuring the inhibition halos around each disc. The measurements were recorded and analyzed using Equation 10:

$$\%I = ((Dd - Dh))/(Dd) \times 100) \quad (10)$$

(Dd: diameter of disc (6 mm) and Dh: diameter of inhibition halo). If no inhibition halo was observed, the result was reported as 6 mm, which corresponds to the diameter of the disc itself.

### *Minimum inhibitory concentration (MIC)*

To assess the MIC, we used the method described by **Meneses & Moncayo** (2022), with some slight modifications. Two microplates were prepared for each microorganism (*E. coli, P. aeruginosa, S. saprophyticus*, and *C. tropicalis*). The controls included a blank consisting of Mueller-Hinton Broth (MHB) alone, a negative control with MHB and inoculum, and a positive control with MHB, inoculum, and the appropriate antibiotic. MICs were determined using the microtiter dilution method with serial double dilutions of the extracts (ranging from 50000 to 195.32 µg/mL), anthocyanidins (ranging from 10 to 0.078 µg/mL), and antibiotics (ranging from 10 to 0.078 µg/mL). The inoculum for each dilution was standardized to a 0.5 McFarland scale.

After incubation, bacterial growth was assessed using 1% triphenyl tetrazolium chloride (TTC) as a color indicator, followed by an additional incubation period. The additional incubation for *E. coli* lasted 30 minutes; for *P. aeruginosa,* 15 minutes; for *S. saprophyticus,* 30 minutes, and for *C. tropicalis*, one hour. Absorbance was measured at 420 nm using a Biotek Epoch plate reader (**Cerrato *et al.***, 2022). The inhibition was expressed using Equation 11:

$$\%I = ((Ai - Af)/(Ai) \times 100) \quad (11)$$

(Ai: absorbance of MHB and inoculum, and Af: absorbance of MBH with the extract or anthocyanidin + inoculum).

### *Statistical analysis*

Data for the thin-layer chromatography (TLC) retention factor (Rf), the total anthocyanin content (TAC), the antioxidant activity (ABTS and DPPH assays), the $IC_{50}$ values, and the percentage inhibition (% inhibition) in antimicrobial assays were expressed as mean ± standard deviation (SD). All experiments were performed in triplicate (n = 3), and each value represents independent experimental replicates.

The anti-inflammatory assay had a completely randomized design. The effects of treatment (cyanidin, delphinidin, quercetin, and diclofenac) and the concentration (0.05–1 µg/mL), as well as their interaction, were evaluated using a two-way analysis of variance (ANOVA). Additionally, the effect of extract concentration was analyzed separately using a one-way ANOVA. When significant differences were detected, Tukey's *post hoc* test was applied for multiple comparisons. Statistical significance was established at $p < 0.05$. Normality and homogeneity of variances were verified before analysis. All statistical analyses were performed using R Studio software (Posit Team RStudio.Version 2024), and graphs were generated using Microsoft Excel.

In the experimental design for the anti-inflammatory activity, we used ANOVA 1-way (one independent variable) and 2-way (two factors), as always in anti-inflammatory tests, to compare mean values across multiple treatment groups simultaneously. One-way ANOVA tests for significant differences between treatments, while the 2-way test evaluates both individual factor effects and their interaction. In our case, 2-way ANOVA was applied because we had two factors (concentration and treatment), but also to evaluate the interaction between these two variables. On the other hand, 1-way ANOVA was applied because we only evaluated the effect of the extract concentration to prevent the hemolysis of red blood cells (**Kim**, 2014; **Qamar *et al.,*** 2021).

## Results and discussion

### *Anthocyanins identification by thin-layer chromatography (TLC)*

In the anthocyanins identification by TLC, the best results were obtained using the hydrolyzed extract (Ea) obtained under UV light at 254 nm. The analysis revealed the presence of cyanidin (Cy), with an Rf value of 6.8, while delphinidin (Df, Rf 6.2) was not detectable using this method. The mean Rf value for the extract was determined at 6.93 ±

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):821-836, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4045

0.06, confirming the presence of Cy (**Figure 1**). Retention factor (Rf) differences among anthocyanins are influenced by their molecular structure, particularly the substituents on the C-ring. These variations depend on the number and type of hydroxyl and methoxy groups present. Here, Df, which has a higher number of hydroxyl groups, traveled a shorter distance compared to Cy.

### *High-performance liquid chromatography (HPLC-DAD)*

We detected a primary peak corresponding to anthocyanins with retention times of 1.667 minutes for Ep and 1.737 minutes for Ea, with maximum absorbances of 276–280 nm and 526–530 nm, which are characteristic of anthocyanins. We also observed two smaller peaks and, notably, a peak in Ea at 2.127 minutes with the same retention time (2.110 minutes) and absorbance maximums (278 nm and 536 nm) as the cyanidin standard, indicating the presence of Cy as a product of hydrolysis (**Baenas *et al.***, 2020; **Howell**, 2020). These results (**Figure 2**) confirm the presence of cyanidin in the sample, suggesting that this anthocyanin predominated.

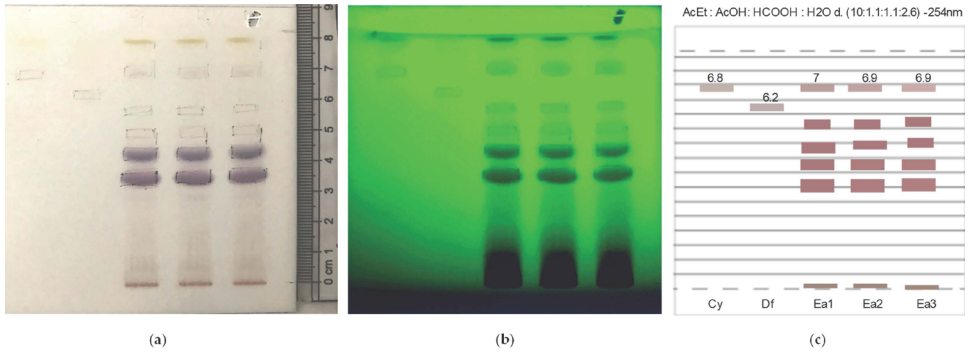



**Figure 1.** Identification of anthocyanins by TLC of *Vaccinium floribundum* (mortiño) acidified extract (Ea). **(a)** TLC with white light; **(b)** TLC with UV-254nm; **(c)** TLC scheme with the respective Rf. Cy: standard cyanidin; Df: standard delphinidin; Ea: acidified extract repetition; 1, 2, and 3: repetition number

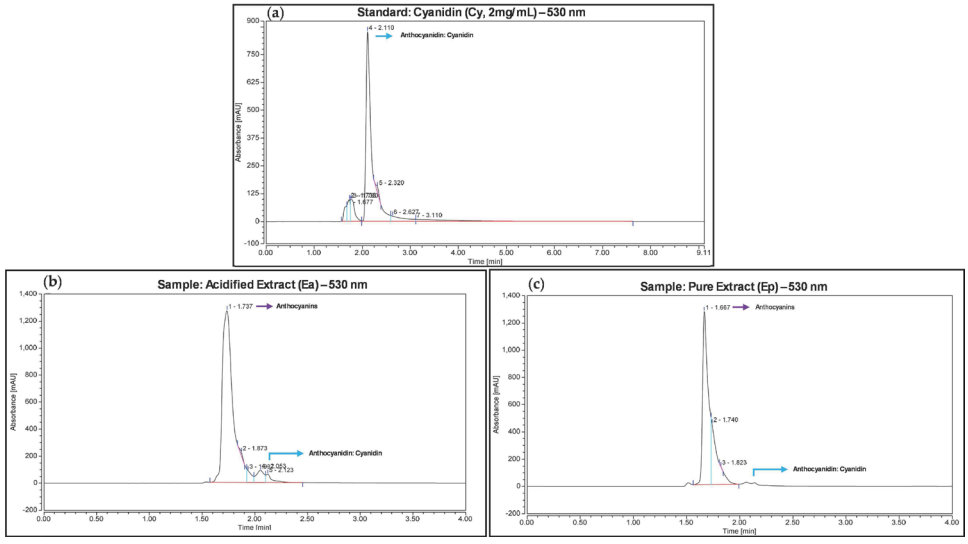



**Figure 2.** Chromatogram of **(a)** CyCl standard (2mg/mL), **(b)** Vaccinium floribundum (mortiño) Ea and **(c)** Ep extracts

### *Anthocyanins quantification by differential pH method and HPLC*

Anthocyanins quantified with the differential pH method in the mortiño extract were 416 ± 3.13 mg C3G Eq/L of extract, or 0.416 mg ± 0.003 C3G Eq/mg of fresh fruit (FW). When comparing with other studies, we found that *V. floribundum* samples from Peru and Costa Rica had been used after they were freeze-dried (dry weight, DW) and extracted primarily using 70% acetone, reporting TAC values of 14.5 mg C3G Eq/g DW and 9. 17 mg C3G Eq/g DW, respectively (**Cerrato *et al.***, 2022; **Esquivel-Alvarado *et al.***, 2020). In contrast, studies using fresh fruit (FW) from Peru and Ecuador in samples macerated with alcoholic solvents at varying concentrations (20% and 60% ethanol; 20%, 60%, and 80% methanol), and extracted at different temperatures (30°C and 60°C), reported TAC values ranging from 4.19 mg to 1.79 mg C3G Eq/g FW (**Re *et al.***, 1999). When comparing TAC values, anthocyanin content in this study was significantly lower than that of freeze-dried samples extracted with acetone. However, the values obtained were similar to those from studies using fresh fruit and alcoholic solvents (methanol and ethanol), and the differential pH method.

The differential pH method, while commonly used, is not very sensitive and requires corroboration with more precise methods. To address this shortcoming, anthocyanin quantification was also performed using high-performance liquid chromatography (HPLC). The total anthocyanin content (TAC) determined using cyanidin chloride (CyCl) as an internal standard was 1.47 ± 0.01 mg/g FW for the hydrolyzed extract (Ea) and 1.30 ± 0.00 mg/g FW for the pure extract (Ep).

### *Antioxidant activity*

Flavylium cation structure enables radical electron delocalization within $sp^2$ orbitals, leading to radical stabilization. The antioxidant efficacy of anthocyanins is influenced by their degree of hydroxylation, acylation, and glycosylation (**Esquivel-Alvarado *et al.***, 2020; **Liu *et al.,*** 2018; **Zhang *et al.***, 2013). Hydroxylation and methoxy groups on the C ring enhance antioxidant activity, with hydroxyl groups (-OH) contributing more significantly than methoxy groups ($-OCH_3$). Consequently, the antioxidant capacity of anthocyanidins increases in the following order: pelargonidin < peonidin < cyanidin < malvidin < petunidin < delphinidin. Glycosylation, on the other hand, reduces the antioxidant potential of anthocyanins because sugar residues diminish electron delocalization, proton donation, and chelating ability. As a result, anthocyanidins, which lack glycosylation, demonstrate greater activity than anthocyanins, while acylation contributes to the glycosylation process (**Esquivel-Alvarado *et al.***, 2020; **Liu *et al.***, 2018; **Jiang *et al.***, 2012).

### *ABTS*

The antioxidant activity was assessed by determining the $IC_{50}$ values for AA and Ep. The respective linear equations obtained were y = 10.424x + 0.5909 for AA and y = 0.0481x + 9.9099 for Ep (**Figure 3**), which both demonstrated a good linear fit, with coefficients

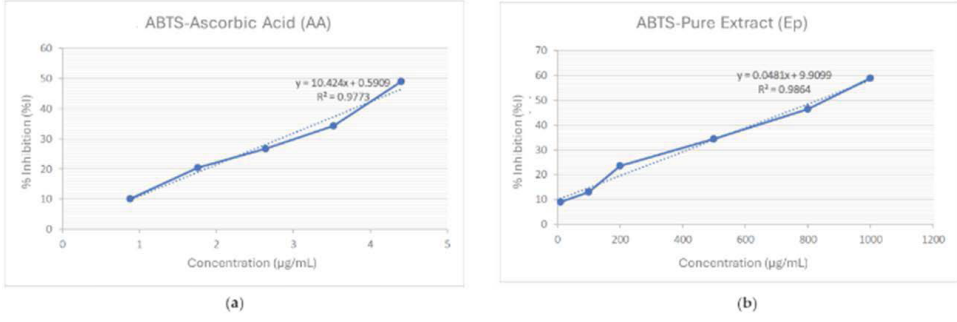



**Figure 3.** Inhibition percentage (%I) vs. concentration (ug/mL) curve of **(a)** ascorbic acid (AA) and **(b)** Vaccinium floribundum (mortiño) in the ABTS assay

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):821-836, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4045

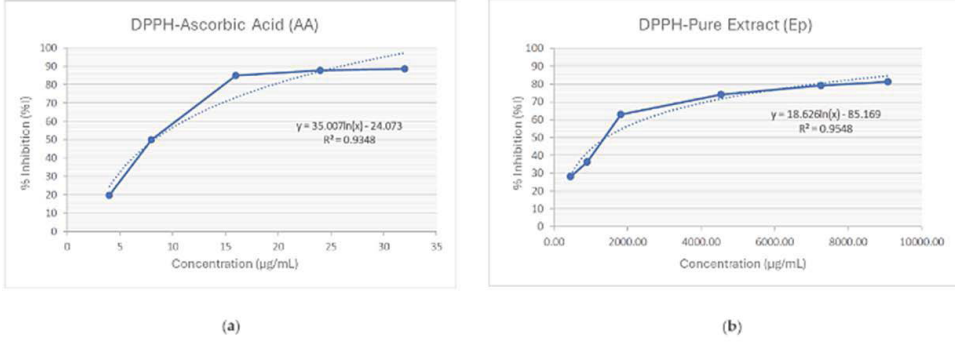
of determination close to 1, specifically 0.9773 for AA and 0.9864 for Ep. The $IC_{50}$ values calculated for AA and Ep were 4.74 ± 0.12 µg/mL and 833.47 ± 29.65 µg/mL, respectively. These results indicate that the antioxidant activity of the extract (Ep) is approximately 175 times lower than that of ascorbic acid (AA).

### *DPPH*

As in the previous essay, the $IC_{50}$ values for ascorbic acid (AA) and the extract (Ep) were determined to assess antioxidant activity. The respective equations derived were y = 35.007ln (x) - 24.073 for AA and y = 18.626ln (x) - 85.169 for Ep (**Figure 4**). A strong linear fit was observed, as indicated by the coefficients of determination for AA and Ep (0.9348 and 0.9548, respectively). The IC50 values calculated were 8.30 ± 0.22 µg / mL for AA and 1418.01 ± 188.59 µg / mL for Ep. These results show that the antioxidant activity of the extract is approximately 170 times lower than that of ascorbic acid.

### *Membrane stabilization (MS) assay*

Anthocyanins' anti-inflammatory activity has been corroborated by their ability to inhibit several substances and pro-inflammatory enzymes, such as tumor necrosis factor alpha (TNF-α), cyclooxygenase-2 (COX-2), interleukin-1 beta (IL-1β), interleukin-6 (IL-6), nitric oxide (NO), C-reactive protein (CRP), inducible nitric oxide synthases (iNOS), and lipoxygenase (LOX) (**Kozłowska & Dzierżanowski**, 2021). It also has an attenuating power on proinflammatory genes (tumor necrosis factor (TNF), interleukins (ILs), cyclooxygenase (COX), prostaglandin-endoperoxidase synthase, tenascin) and the ability to suppress chemokine genes (e.g., chemokine ligands and interferon alpha-inducible proteins) (**Chen *et al.***, 2008). Besides, anthocyanins have been shown to increase the amount of the enzymes glutamate-cysteine ligase (GCL) and glutamate-cysteine ligase-modifying subunit (GCLM), which influence the reduction of glutathione. It has even been reported that they have been able to inhibit nuclear factor kappa B (NF-κB), an important factor within the NF-κB pathway of inflammation that is responsible for cytokine production and transcriptional control (**Kozłowska & Dzierżanowski**, 2021). Some anthocyanins with an anti-inflammatory effect on these markers are cyanidin-3-glucoside, cyanidin-3-rutinoside, delphinidin-3-rutinoside, malvidin-3-glucoside, cyanidin-3-O-sophoroside, and cyanidin-3-O-sambubioside (**Chen *et al.***, 2008; **Sharma & Lee**, 2022; **Kozłowska & Dzierżanowski**, 2021). The model we used in our study was the membrane stabilization assay, since it enables the comparison of the erythrocyte membrane with the lysosomal membrane of macrophages, responsible for the inflammatory process. This means that by stabilizing its membrane, the release of protease is avoided and bactericidal enzymes are controlled (inflammatory response), while the hemolysis inhibition or stabilization shows mortiño extracts' potential to reduce the inflammatory response (**Qamar *et al.***, 2021).




(a) (b)

**Figure 4.** Inhibition percentage (%I) vs. concentration (ug/mL) curve of **(a)** ascorbic acid (AA) and **(b)** Vaccinium floribundum (mortiño) in the the DPPH assay

We evaluated, therefore, several standards for comparison sake: anthocyanidins (Cy and Df), the flavonol quercetin (Qc), a natural compound with known anti-inflammatory properties, and diclofenac sodium (Ds), a commercial anti-inflammatory drug. Anthocyanidins and Qc demonstrated comparable anti-inflammatory activity, with Qc exhibiting the highest percentage of inhibition among the natural compounds. The maximum inhibition percentages achieved at 1 µg/mL were 32.31, 34.26, and 37.68 % for Cy, Df, and Qc, respectively.

Our results were consistent with the anti-inflammatory activity reported by **Curinambe *et al.,*** 2024, who used ethanolic extracts and performed the membrane stability (MS) test by hypotonicity in erythrocytes, demonstrating an *in vitro* anti-inflammatory effect similar to indomethacin, with an inhibition percentage of 20 to 35%. On the other hand, they found that the mixture of anthocyanins had a greater effect, i.e., they had a summative effect and allowed greater inflammatory power (**Qamar *et al.,*** 2021). This is consistent with our results, where anthocyanidins had a similar anti-inflammatory effect, and the extract demonstrated greater anti-inflammatory activity, possibly due to the mixture of anthocyanins present in the mortiño extract (**Table 1**).

Two-way and one-way ANOVA tests were conducted to determine significant differences and assess the anti-inflammatory activity of various treatments and the blueberry extract, respectively. Our results indicated that the values of concentration, treatment, and the interaction between these two were statistically significant ($p < 0.05$) (**Table 2**). This means that both variables influenced the anti-inflammatory activity of the mortiño extract.

Finally, we noticed that the total anti-inflammatory activity of the extract was influenced by the additive effect of anthocyanins, with flavonoids and phenolic acids contributing to this effect. These compounds effectively reduce the production of pro-inflammatory mediators, as they reduce inflammation by inhibiting pro-inflammatory enzymes (COX-2, 5-LOX), suppressing inflammatory signaling pathways (NF-kB, MAPK), and lowering pro-inflammatory cytokines (IL-1β, TNF-α, IL-6). They also act as potent antioxidants, mitigating oxidative stress and modulating immune cell activity to decrease inflammatory reactions (**Al-Khayri *et al*.**, 2022; **Kiriyama *et al.***, 2024). As can be seen in quercetin (a type of flavonoid), there is an important effect that could explain the biological activity of the total extract, given that flavonoids and phenolic acids are also responsible for this biological effect.

### *Antimicrobial activity*

*Kirby-Bauer method.* Here, we assessed antimicrobial activity by measuring the diameter of inhibition halos. According to the classification criteria, halos <6 mm in diameter indicate resistance, those >6 mm are considered intermediate, and those 9 to 14 mm in diameter are classified as sensitive (**Dangles & Fenger**, 2018; **Esquivel-Alvarado *et al.***, 2020). The test evaluated the antimicrobial effectiveness of the 50% (E50) and 100% extracts (E100), as well as the corresponding antibiotics against *P. aeruginosa, S. saprophyticus, E. coli, and C. tropicali*s (**Table 3**). This means that the use of 100% mortiño extract against *P. aeruginosa* resulted in a 44.67% inhibition, with an inhibition halo of 8.68 mm. Our findings are comparable to those reported by **Masaquiza** (2018), who observed larger inhibition zones of 25.33 mm and 18.00 mm using encapsulated mortiño extract. In contrast, *S. saprophyticus* was classified as sensitive, as the mortiño extract at 50% concentration achieved a 57.67% inhibition, while at 100% concentration, inhibition reached 52.33%, which is consistent with **Chonlon & Espinoza's** (2022) and **Quispe & Soncco's** (2022) findings.

Likewise, a 24.50% inhibition against *E. coli* was obtained with the 50% extract, which increased to 39.33% with the 100% extract. These values are similar to those reported by **Guamán** (2022), who found a 28.8% inhibition. Finally, *C. tropicalis* showed the most favorable response to the treatment. The 100% extract produced a 73.33% inhibition, compared to 52.83% with the 50% extract, which supports **Escobar's** (2021) conclusion that higher extract concentrations lead to greater antimicrobial inhibition.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):821-836, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4045

**Table 1.** Anti-inflammatory activity of standards and mortiño extract (Vaccinium floribundum) evaluated using the membrane stabilization assay under thermal stress conditions. Data expressed as mean ± standard deviation (SD) (n = 3). Different lowercase letters indicate statistically significant differences among treatments according to Tukey's post hoc test ($p < 0.05$). Cy: cyanidin; Df: delphinidin; Qc: quercetin; Ds: diclofenac sodium; Ep: mortiño extract

| Muestra | Conc. (µg/mL) | A ± SD | | | %I ± SD | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ct** | | 0.7497 | ± | 0.0245??? | | | | |
| **Anti-inflammatory activity with various treatments - Membrane stability: Temperature** | | | | | | | | |
| **Df** | 0.05 | 0.5703 | ± | 0.0017 | 23.92 | ± | 2.26 | fg |
| | 0.1 | 0.5538 | ± | 0.0032 | 26.13 | ± | 2.83 | efg |
| | 0.2 | 0.5438 | ± | 0.0021 | 27.47 | ± | 2.26 | defg |
| | 0.5 | 0.5343 | ± | 0.0012 | 28.73 | ± | 2.49 | defg |
| | 0.8 | 0.5172 | ± | 0.0039 | 31.01 | ± | 2.08 | cdef |
| | 1 | 0.4928 | ± | 0.0186 | 34.26 | ± | 1.59 | cd |
| **Cy** | 0.05 | 0.5815 | ± | 0.0345 | 22.44 | ± | 2.68 | g |
| | 0.1 | 0.5524 | ± | 0.0038 | 26.31 | ± | 2.85 | efg |
| | 0.2 | 0.5401 | ± | 0.0031 | 27.95 | ± | 2.58 | defg |
| | 0.5 | 0.5351 | ± | 0.0014 | 28.63 | ± | 2.30 | defg |
| | 0.8 | 0.5248 | ± | 0.0028 | 30.00 | ± | 2.63 | def |
| | 1 | 0.5075 | ± | 0.0021 | 32.31 | ± | 1.94 | cde |
| **Qc** | 0.05 | 0.5647 | ± | 0.0004 | 24.67 | ± | 2.41 | fg |
| | 0.1 | 0.5511 | ± | 0.0029 | 26.49 | ± | 2.18 | efg |
| | 0.2 | 0.5452 | ± | 0.0009 | 27.28 | ± | 2.26 | defg |
| | 0.5 | 0.5345 | ± | 0.0032 | 28.70 | ± | 2.73 | defg |
| | 0.8 | 0.5225 | ± | 0.0018 | 30.30 | ± | 2.48 | def |
| | 1 | 0.4672 | ± | 0.0008 | 37.68 | ± | 2.08 | c |
| **Ds** | 0.05 | 0.1540 | ± | 0.0268 | 79.46 | ± | 4.23 | b |
| | 0.1 | 0.0870 | ± | 0.0056 | 88.39 | ± | 1.12 | a |
| | 0.2 | 0.0702 | ± | 0.0019 | 90.63 | ± | 0.45 | a |
| | 0.5 | 0.0533 | ± | 0.0019 | 92.89 | ± | 0.47 | a |
| | 0.8 | 0.0443 | ± | 0.0002 | 94.09 | ± | 0.20 | a |
| | 1 | 0.0359 | ± | 0.0038 | 95.21 | ± | 0.44 | a |
| **Anti-inflammatory activity with mortiño extract - Membrane stability: Temperature** | | | | | | | | |
| **Ep** | 0.05 | 0.1675 | ± | 0.0244 | 77.66 | ± | 2.94 | a |
| | 0.1 | 0.1132 | ± | 0.0019 | 84.90 | ± | 0.35 | b |
| | 0.2 | 0.1040 | ± | 0.0009 | 86.13 | ± | 0.36 | b |
| | 0.5 | 0.0751 | ± | 0.0047 | 89.99 | ± | 0.70 | c |
| | 0.8 | 0.0684 | ± | 0.0005 | 90.87 | ± | 0.36 | c |
| | 1 | 0.0558 | ± | 0.0012 | 92.56 | ± | 0.15 | c |

A= absorbance y SD= standard deviation

### *Minimun inhibitory concentration (MIC)*

We found that higher concentrations led to greater percentages of inhibition. In the case of *P. aeruginosa*, cyanidin and delphinidin inhibited bacterial growth at 2.5 µg/mL, with 82.99% and 89.88% inhibition, respectively. In contrast, the 50% extract showed

**Table 2.** Two-way ANOVA (treatment × concentration) for standard compounds and one-way ANOVA for mortiño extract in the membrane stabilization assay under thermal stress conditions. Statistical significance: $p < 0.05$

| | Df | Suma square | Mean square | F Value | P value |
|---|---|---|---|---|---|
| **Two-way ANOVA - Anti-inflammatory activity with various treatments** | | | | | |
| **Concentration (Conc)** | 5 | 1038 | 208 | 40.641 | $3.95x10^{-16}$ |
| **Treatment** | 3 | 51176 | 17059 | 3339.16 | $< 2x10^{-16}$ |
| **Conc:Treatment** | 15 | 152 | 10 | 1.989 | 0.0366 |
| **Residuals** | 48 | 245 | 5 | | |
| **One-way ANOVA - Anti-inflammatory activity with mortiño extract** | | | | | |
| **Concentration** | 5 | 440.3 | 88.06 | 55.39 | $7.13x10^{-8}$ |
| **Residuals** | 12 | 19.1 | 1.59 | | |

**Table 3.** Inhibition halos (mm) of the fluid extract of *Vaccinium floribundum* Kunth in antibiogram (Kirby-Bauer method) against pathogenic microorganisms in urinary tract infections

| | ***P. aeruginosa*** | ***S. saprophyticus*** | ***E. coli*** | ***C. tropicalis*** |
|---|---|---|---|---|
| **E50** | No inhibition | 9.46 *** | 7.47 ** | 9.17*** |
| **E100** | 8.68** | 9.14*** | 8.36 ** | 10.39*** |
| **Cefepime** | 25.11*** | - | - | - |
| **Nitrofurantoin** | - | 25.64*** | - | - |
| **Streptomycin** | - | - | 25.14*** | - |
| **Fluconazole** | - | - | - | No inhibition |

(*): Resistance; (**): Intermediate; (***): Sensivity; (-): Not applicable

a minimum inhibitory concentration (MIC) of 12,500 µg/mL with a 71.45% inhibition, while the 100% extract's MIC was 25,000 µg/mL, with a 66.37% inhibition. These values are comparable to those reported by **Sanhueza *et al*.** (2023), who observed inhibition rates between 60% and 80%.

*A*t a 2.5 µg/mL MIC, cyanidin exhibited a higher inhibition (93.05%) compared to delphinidin (64.78%). As for the extracts, the 50% concentration showed a 3,125 µg/mL MIC, with 52.29% inhibition, while the 100% extract had a 6,250 µg/mL MIC, with a slightly higher inhibition of 52.81%, confirming its effectiveness. Similarly, **Lamija *et al.*** (2021) reported favorable inhibition values.

Lower inhibition percentages were observed for *E. coli* at 2.5 µg/mL: cyanidin and delphinidin showed inhibition values of 40.96% and 42.99%, respectively. For the 50% extract, the MIC was 12,500 µg/mL, with a 35.04% inhibition, while the 100% extract showed a 2,500 µg/mL MIC, with a 18.55% inhibition. These findings are consistent with those by **Tempera *et al.*** (2010), who reported an inhibition percentage of 50.9%.

Finally, in *C. tropicalis,* cyanidin and delphinidin showed a 0.63 µg/mL MIC, with inhibition percentages of 12.08% and 13.97%, respectively. The 50% extract resulted in a 3,125 µg/mL MIC, with 8.87% inhibition, while the 100% extract showed a 6,250 µg/mL MIC, with a 12.88% inhibition. These results are comparable to those reported by **Musuña & Valera** 2020, who found a 79% inhibition with a 264 µg/mL MIC, which supports its effectiveness as a potential treatment for urinary tract infections (**Table 4**).

**Table 4.** MIC and inhibition percentage (%I) of the fluid extract of *Vaccinium floribundum* (mortiño) and anthocyanidins Cy and Df against pathogenic microorganisms in urinary tract infections

| | | *P. aeruginosa* | *S. saprophyticus* | *E. coli* | *C. tropicalis* |
|---|---|---|---|---|---|
| **E50** | MIC (µg/mL) | 12500 | 3125 | 12500 | 3125 |
| | %I | 71.45 ± 1.22 | 55.29 ± 1.44 | 35.04 ± 2.87 | 8.87 ± 5.54 |
| **E100** | MIC (µg/mL) | 25000 | 6250 | 25000 | 6250 |
| | %I | 66.37 ± 2.44 | 52.81 ± 0.26 | 18.55 ± 9.33 | 12.88 ± 2.08 |
| **Cy** | MIC (µg/mL) | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 0.63 |
| | %I | 82.99 ± 0.93 | 93.05 ± 3.09 | 40.96 ± 13.01 | 12.08 ± 5.68 |
| **Df** | MIC (µg/mL) | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 0.63 |
| | %I | 89.88 ± 1.36 | 64.78 ± 6.11 | 42.99 ± 4.27 | 13.97 ± 3.27 |

## Conclusions

We found that cyanidin, identified by TLC and HPLC based on maximum retention times and absorbance, was the predominant anthocyanidin in *Vaccinium floribundum* (mortiño) extract. Total anthocyanin content varied depending on the method used, with values of 0.416 ± 0.03 mg C3G Eq/g FW (pH differential method) and 1.47 ± 0.01 and 1.30 ± 0.00 mg/g FW (HPLC analysis of acidified and pure extracts), respectively.

The antioxidant activity was relatively low under the conditions evaluated, which may be related to the extraction solvent and its selectivity toward anthocyanins. Regarding the anti-inflammatory activity, the extract exhibited a maximum inhibition of 92.56% and 12.10% at 1000 µg/mL in membrane stabilization assays induced by temperature and hypotonicity, respectively. In the temperature-induced assay, the activity was comparable to that of diclofenac, suggesting relevant bioactive potential.

Additionally, the extract showed antimicrobial activity against all tested microorganisms, with the highest effects observed against *S. saprophyticus* and *C. tropicalis* at 50% and 100% concentrations. Overall, these results indicate that anthocyanin-rich extracts from *Vaccinium floribundum* possess anti-inflammatory and antimicrobial activities, supporting their potential as a source of bioactive compounds. However, further studies are required to evaluate their efficacy and safety *in vivo*.

## Acknowledgments

We thank Universidad Politécnica Salesiana and the Research Group on Biotechnology Applied to Natural Resources (BIOARN).

## Author contributions

**J.M.:** Mortiño extract obtention, botanical classification of the species in QUPS herbarium, quantification methodology, manuscript review, and drafting. **A.E.:** Evaluation of antioxidant and anti-inflammatory activity. **D.V.:** ATCC strain reactivation and antimicrobial activity evaluation. **M.M.:** Data analysis and contribution of materials, ATCC strains, and reactants.

## Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

## References

**Baenas, N., Ruales, J., Moreno, D. A., Barrio, D. A., Stinco, C. M., Martínez-Cifuentes, G., Meléndez-Martínez, A. J., García-Ruiz, A**. (2020). Characterization of Andean Blueberry in Bioactive Compounds, Evaluation of Biological Properties, and In Vitro Bioaccessibility. *Foods*, *9*, 1483. https://doi.org/10.3390/foods9101483

**Barba-Ostria, C., Carrera-Pacheco, S. E., González-Pastor, R., Zúñiga-Miranda, J., Mayorga-Ramos, A., Tejera, E., Guamán, L. P.** (2024). Exploring the Multifaceted Biological Activities of Anthocyanins Isolated from Two Andean Berries. *Foods*, *13*(16), 2625. https://doi.org/10.3390/foods13162625

**Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C.** (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, *28*, 25-30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5

**Cerrato, A., Piovesana, S., Aita, S. E., Cavaliere, C., Felletti, S., Laganà, A., Montone, C. M., Vargas-de la Cruz, C., Capriotti, A. L.** (2022). Detailed investigation of the composition and transformations of phenolic compounds in fresh and fermented Vaccinium floribundum berry extracts by high-resolution mass spectrometry and bioinformatics. *Phytochemical Analysis: PCA*, *33*, 507-516. https://doi.org/10.1002/pca.3105

**Curinambe, L., Rodríguez, C., Díaz-Ortega, J.** (2024). Actividad antioxidante, contenido de antocianinas y efecto antiinflamatorio in vitro del fruto de Vaccinium floribundum KUNTH "PUSHGAY". Interciencia, *49,* 371-376.

**Chandra Singh, M., Price, W. E., Kelso, C., Charlton, K., Probst, Y.** (2022). Impact of molar absorbance on anthocyanin content of the foods. *Food Chemistry*, *386*, 132855. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132855

**Dangles, O. & Fenger, J.-A.** (2018). The Chemical Reactivity of Anthocyanins and Its Consequences in Food Science and Nutrition. *Molecules*, *23*(8),1970. https://doi.org/10.3390/molecules23081970

**Esquivel-Alvarado, D., Muñoz-Arrieta, R., Alfaro-Viquez, E., Madrigal-Carballo, S., Krueger, C. G., Reed, J. D.** (2020). Composition of Anthocyanins and Proanthocyanidins in Three Tropical Vaccinium Species from Costa Rica. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *68*(10), 2872-2879. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01451

**Filip, M., Vlasa, M., Copaciu, F., Coman, V.** (2012). Identification of Anthocyanins and Anthocyanidins from Berry Fruits by Chromatographic and Spectroscopic Techniques to Establish the Juice Authenticity from Market. *Journal of Planar Chromatography - Modern TLC*, *25*(6), 534-541. https://doi.org/10.1556/JPC.25.2012.6.8

**Howell, A. B.** (2020). Potential of cranberry for suppressing *Helicobacter pylori*, a risk factor for gastric cancer. *Journal of Berry Research*, *10*, 11-20. https://doi.org/10.3233/JBR-180375

**Jiao, Y., Yanjie Jiang, Weiwei Zhai, Zhendong Yang.** (2012). Studies on antioxidant capacity of anthocyanin extract from purple sweet potato (Ipomoea batatas L.). *African Journal of Biotechnology, 11*(27), 7046-7054. https://doi.org/10.5897/AJB11.3859

**Kim H. Y.** (2014). Analysis of variance (ANOVA) comparing means of more than two groups. *Restorative dentistry & endodontics, 39*(1), 74-77. https://doi.org/10.5395/rde.2014.39.1.74

**Liu, Y., Tikunov, Y., Schouten, R., Marcelis, L., Visser, R., Bovy, A.** (2018). Anthocyanin Biosynthesis and Degradation Mechanisms in Solanaceous Vegetables: A Review. *Frontiers in Chemistry, 6*, 52. https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00052

**Martău, G. A., Bernadette-Emőke, T., Odocheanu, R., Soporan, D. A., Bochiș, M., Simon, E., Vodnar, D. C.** (2023). *Vaccinium* Species (Ericaceae): Phytochemistry and Biological Properties of Medicinal Plants. *Molecules*, *28*(4), 1533. https://doi.org/10.3390/molecules28041533

**Meneses, J. & Moncayo, S.** (2022). *Determinación de los compuestos fenólicos (antocianinas) y evaluación de la actividad antimicrobiana del extracto de Vaccinium floribundum (mortiño) proveniente de la provincia de Cotopaxi, en el tratamiento preventivo de infecciones de vías urinarias.* Universidad Politécnica Salesiana.

**Musuña, G. & Varela, S.** (2020). *Evaluación de la eficacia antimicrobiana in vitro de cápsulas de extracto fluido de Vaccinium floribundum kunth (Mortiños); en infecciones agudas del tracto urinario.* Universidad Politécnica Salesiana.

**Ortega, A.** (2018). *Determinación del efecto antimicrobiano de los aceites esenciales de tomillo (Thymus vulgaris) y orégano (Origanum vulgare) frente a la bacteria Staphylococcus aureus ATCC: 12600*. Universidad Politécnica Salesiana.

**Pérez, B. P., Endara, A. B., Garrido, J. A., Ramírez Cárdenas, L. de los Á., Pérez, B., Endara, A., Garrido, J., Ramírez-Cárdenas, L.** (2021). Extraction of anthocyanins from Mortiño (*Vaccinium floribundum*) and determination of their antioxidant capacity. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *74*(1), 9453-9460. https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n1.89089

**Pinho, C., Melo, A., Mansilha, C., Ferreira, I. M. P. L. V. O.** (2011). Optimization of Conditions for Anthocyanin Hydrolysis from Red Wine Using Response Surface Methodology (RSM). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *59*(1), 50-55. https://doi.org/10.1021/jf103839j

**Poole, C.** (2023). *Instrumental Thin-Layer Chromatography* (2nd ed.). Elsevier.

**Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C.** (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, *26*, 1231–1237. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3

**Riaz, M., Zia Ul Haq, M., Saad, B.** (2016). *Anthocyanins and Human Health Biomolecular and therapeutic aspects*. Springer International Publishing.

**Rumpf, J., Burger, R., Schulze, M.** (2023). Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins. *International Journal of Biological Macromolecules*, *233*, 123470. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123470

**Sadilova, E., Carle, R., Stintzing, F. C.** (2007). Thermal degradation of anthocyanins and its impact on color and *in vitro* antioxidant capacity. *Molecular Nutrition & Food Research*, *51*(12), 1461–1471. https://doi.org/10.1002/mnfr.200700179

**Xiao, F., Xu, T., Lu, B., Liu, R.** (2020). Guidelines for antioxidant assays for food components. *Food Frontiers*, 2020(1), 60–69. https://doi.org/10.1002/fft2.10

**Zhang, Y., Butelli, E., De Stefano, R., Schoonbeek, H., Magusin, A., Pagliarani, C., Wellner, N., Hill, L., Orzaez, D., Granell, A., Jones, J., Martin, C.** (2013). Anthocyanins Double the Shelf Life of Tomatoes by Delaying Overripening and Reducing Susceptibility to Gray Mold. *Current Biology*, *23*(12), 1094–1100. https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.04.072

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):837-850, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3349



Original article

# Thermodynamic consistency and model correlation of isobaric vapor–liquid equilibria in binary and ternary chloroform, methanol, and benzene systems

## Consistencia termodinámica y correlación de modelos de los equilibrios isobáricos vapor-líquido en sistemas binarios y ternarios de cloroformo, metanol y benceno

**Leonardo Steyman Reyes-Fernández, Elíseo Amado-González, Juan Camilo Restrepo-Vásquez***

Research Group on Energy, Chemical Transformation and the Environment (IBEAR), Faculty of Basic Sciences, University of Pamplona, Pamplona, Colombia

## Abstract

Vapor–liquid equilibrium (VLE) data are essential for the design and optimization of separation processes; however, their reliability remains a challenge, particularly for multicomponent systems, due to inconsistencies in legacy datasets. Here, we analyzed isobaric VLE data at 101.33 kPa for the binary systems chloroform(1) + benzene(2), chloroform(1) + methanol(2), and methanol(1) + benzene(2), as well as for the corresponding ternary system, using data from the Dortmund Data Bank (DDB) and the Korean Data Bank (KDB). Thermodynamic consistency was assessed using the Wisniak-modified Herington test for binaries and the Wisniak (L–W) test for the ternary system, and only consistent datasets were used to estimate thermodynamic parameters. Binary interaction parameters were determined for the Wilson, NRTL, and UNIQUAC models and evaluated through the average absolute deviation in temperature (AADT). The results indicated strong non-ideality, particularly for the chloroform(1) + methanol(2) pair, suggesting hydrogen bonding, whereas chloroform(1) + benzene(2) exhibits near-ideal behavior. On the contrary, the methanol(1) + benzene(2) interactions were highly unfavorable compared to those of the pure components, despite the possibility of association through π–dipole interactions. Additionally, the models Wilson and UNIQUAC showed the best performance for the ternary system (AADT = 0.5849 and 0.6141, respectively), while NRTL had higher deviations (AADT = 0.9896). The study presents a structured thermodynamic evaluation framework for ternary mixtures that integrates consistency testing, dataset selection, parameter optimization, and multi-model validation, thereby enhancing the reliability of VLE predictions in non-ideal multicomponent systems.

**Keywords:** Vapor-liquid equilibrium (VLE); thermodynamic consistency; isobaric; NRTL; Wilson; UNIQUAC.

## Resumen

Los datos de equilibrio vapor–líquido (VLE) son esenciales para el diseño y la optimización de procesos de separación; sin embargo, su confiabilidad sigue siendo un desafío, particularmente para sistemas multicomponentes debido a inconsistencias en los datos experimentales reportados. En este trabajo se analizaron datos VLE isobáricos a 101.33 kPa para los sistemas binarios cloroformo(1) + benceno(2), cloroformo(1) + metanol(2) y metanol(1) + benceno(2), así como para el sistema ternario correspondiente, reportados en las bases de datos Dortmund Data Bank (DDB) y Korean Data Bank (KDB). La consistencia termodinámica se evaluó utilizando la prueba de Herington modificada por Wisniak para los sistemas binarios, y para el sistema ternario se empleó la prueba de Wisniak (L–W); se utilizaron únicamente los conjuntos de datos consistentes para la estimación de los parámetros termodinámicos. Los parámetros de interacción binaria se determinaron para los

**Citation:** Reyes-Fernández LS, et al. Thermodynamic consistency and model correlation of isobaric vapor–liquid equilibria in binary and ternary chloroform, methanol, and benzene systems. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):837-850, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3349

**Editor:** Sonia Moreno

***Corresponding author:**
Juan Camilo Restrepo-Vásquez;
juan.restrepo@unipamplona.edu.co

**Received:** October 24, 2025
**Accepted:** May 4, 2026
**Published on line:** July 21, 2026

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

modelos Wilson, NRTL y UNIQUAC, y se evaluaron mediante la desviación absoluta promedio en temperatura (AADT). Los resultados indicaron una fuerte no idealidad, particularmente para el par cloroformo(1) + metanol(2), lo que sugiere la formación de enlaces de hidrógeno, mientras que el sistema cloroformo(1) + benceno(2) presentó un comportamiento cercano al ideal. Por el contrario, las interacciones metanol(1) + benceno(2) fueron altamente desfavorables en comparación con los componentes puros, a pesar de la posibilidad de asociación mediante interacciones π–dipolo. Los modelos Wilson y UNIQUAC mostraron el mejor desempeño para el modelamiento del sistema ternario (AADT = 0.5849 y 0.6141, respectivamente), mientras que el modelo NRTL presentó desviaciones mayores (AADT = 0.9896). El estudio presenta un marco estructurado de evaluación termodinámica para mezclas ternarias que integra pruebas de consistencia, selección de conjuntos de datos, optimización de parámetros y validación multimodelo, mejorando así la confiabilidad de las predicciones VLE en sistemas multicomponentes no ideales.

**Palabras clave:** equilibrio líquido-vapor (VLE); consistencia termodinámica; isobárico, NRTL; Wilson; UNIQUAC.

## Introduction

The thermodynamic interest in the mixture of methanol, chloroform, and benzene lies in its complex molecular interactions, making it a system of both industrial and academic interest (**Kijevčanin *et al.***, 2007). Mixtures of methanol and chloroform are commonly used in protein purification chloroform and benzene mixtures are used as insecticides (**Sahayaraj & Jeeva**, 2011), and methanol and benzene mixtures are present in industrial wastewater (**Rajamohan *et al.***, 2021; **Thanekar *et al.,*** 2021). The ternary system under study was selected as no previous reports have proposed thermodynamic correlation models that adequately describe the behavior of the chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3) mixture, which is likely to exhibit azeotropic behavior (**Wisniak & Tamir**, 1978). Therefore, we aimed to provide insights into the reliability of experimental vapor–liquid equilibrium (VLE) data compiled from databases and to determine the interaction parameters required for modeling the activity coefficients essential to describe the behavior of the analyzed ternary mixture.

The modeling of activity coefficients is key to describing the ideality and non-ideality of various mixtures in the vapor-liquid equilibrium (VLE) (**Belvèze *et al.***, 2004). Reliability in the experimental equilibrium data is necessary, since they constitute a fundamental tool in the simulation of processes (**Han *et al.***, 2021). Usually, the random errors present in isothermal and isobaric systems are found with graphic techniques (e.g., P-x-y and T-x-y) (**McDermott & Ellis**, 1965); in the case of systematic errors, consistency tests play an important role (**Wisniak *et al.***, 2017).

Our sources were the international thermodynamic databases known as the Dortmund Data Bank (DDB 2022) and the Korean Data Bank (KDB 2022), and the Dortmund Data Bank (DDB 2022) and the Korean Data Bank (KDB 2022), hosted by the Chemical Engineering Materials Research Information Center (CHERIC), for all systems at atmospheric pressure conditions (isobaric). Thermodynamic consistency was checked by the Herington method modified by Wisniak and the Wisniak (L-W tests) for ternary systems (**Wisniak**, 1993; **Wisniak *et al.,*** 1997). Wilson (**Grant**, 1964), NRTL (**Renon & Prausnitz**, 1968), and UNIQUAC (**Fredenslund *et al.***, 1975) models were used for data correlation and prediction of interaction parameters for both binary and ternary systems.

The design and optimization of separation processes depend fundamentally on the availability of reliable vapor–liquid equilibrium (VLE) data (**Mathias**, 2017). However, a large amount of the literature data was reported decades ago and has not been re-evaluated for internal consistency (**Kang *et al.***, 2010). The absence of systematic validation may cause uncertainty in process simulations and can lead to significant inefficiencies in industrial applications including distillation, solvent recovery, and wastewater treatment (**Marcilla *et al.***, 2024). Therefore, identifying and rectifying inconsistencies in published VLE data is a fundamental advance towards improving both the scientific reliability and the applied utility of thermodynamic models.

The chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3) system is one of the most complicated case studies. Each binary pair has strong non-idealities that correspond to different kinds of molecular interactions: hydrogen bonding in methanol, dipole interactions in chloroform, and dispersive interactions in benzene (**Marcilla *et al.***, 2024). These competing forces then lead to a complex phase behavior with both positive and negative deviations from Raoult's law that may explain the potential azeotropic phenomena (**Wisniak & Tamir**, 1978). These mixtures are relevant from an industrial viewpoint: chloroform(1) + methanol(2) is involved in protein purification, chloroform(1) + benzene(2) is found in pesticide mixtures, and methanol(1) + benzene(2) mixtures appear in industrial effluents (**Kijevčanin *et al.***, 2007; **Rajamohan *et al.***, 2021; **Sahayaraj & Jeeva**, 2011; **Thanekar *et al.***, 2021; **Vertommen *et al.***, 2010). However, many available VLE data for these systems are patchy and usually not accurate. For this reason, the current work strives to establish the thermodynamic consistency of binary and ternary VLE data for the chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3) system and correlate them with three broadly used models of excess Gibbs free energy, namely, Wilson, NRTL, and UNIQUAC models. Our study used well-known consistency checking (the Wisniak-modified Herington area test for binary systems and the Wisniak point test for ternary ones) to justify the reliability of the chosen data. The interaction coefficients resulting from harmonized binary data were then used to model the behavior of ternary mixtures and, hence, ensure reliable interdependency in terms of model performance. Our work contributes to filling the large gap in thermodynamic data on the chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3) system by combining systematic consistency analysis and a rigorous model correlation mechanism. Moreover, our results could be used as a standard for further studies, and some practical guidance is also proposed for process engineers and researchers working with non-ideal mixtures.

In addition to data validation, this work moves beyond conventional thermodynamic consistency analysis by proposing an integrated evaluation platform that combines consistency testing, dataset selection, parameter optimization, and multimodel validation into a unified methodology for assessing VLE datasets and quantifying their predictive performance. This approach enables a critical reassessment of legacy thermodynamic data and provides transferable criteria for evaluating multicomponent equilibrium systems. By integrating these steps into a structured workflow, the present study aims to identify reliable datasets and improve predictive capability in multicomponent systems.

## Materials and methods

### *Sources and evaluation of binary and ternary VLE data*

Experimental vapor–liquid equilibrium (VLE) data for the binary systems chloroform(1) + benzene(2), chloroform(1) + methanol(2), and methanol(1) + benzene(2), and for the ternary system chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3) the data were collected from the Dortmund Data Bank (DDB) and the Korea Thermophysical Properties Data Bank (KDB) at 101.3 kPa (**Tables S1 and S2,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3349/5363).

The consistency of the binary and ternary datasets was assessed using the Wisniak-modified Herington area test for binary systems and the Wisniak point test for ternary systems. Only the datasets that satisfied the thermodynamic consistency criteria described in the section "Thermodynamic consistency test of experimental data" (Results) were retained for parameter estimation and model validation.

### *Theoretical basis of thermodynamic correlation models*

The basic VLE relationship for the activity coefficients ($\gamma_i$) was calculated using the modified Raoult's law (Equation 1).

$$y_i \Phi_i P = x_i \gamma_i P^{sat} \quad (1),$$

where $y_i$, $x_i$, $P^{sat}$, $\Phi_i$, $\gamma_i$ and $P$ refer to the vapor phase composition, the liquid phase composition, the vapor pressure of pure components, the fugacity coefficient, the activity

coefficient, and the equilibrium pressure, respectively. Since the pressure of the collected experimental data is less than 1 bar, the gas phase can be assumed to exhibit ideal behavior; thus, $\Phi_i = 1$ (**Smith *et al.***, 2005; **Zhou *et al.,*** 2017).

The Antoine parameters, obtained from the DDB physical properties databank (DDB Online 2022), are shown in **Table S3,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3349/5363. The VLE data reported for the binary systems were correlated by the Wilson, NRTL, and UNIQUAC models. These models were defined as follows:

Wilson model equation:

$$ln(\gamma_1) = -ln(x_1 + \Lambda_{12}x_2) + x_2\left(\frac{\Lambda_{12}}{x_1+\Lambda_{12}x_2} - \frac{\Lambda_{21}}{x_2+\Lambda_{21}x_1}\right) \quad (2)$$

$$ln(\gamma_2) = -ln(x_2 + \Lambda_{21}x_1) + x_1\left(\frac{\Lambda_{21}}{x_2+\Lambda_{21}x_1} - \frac{\Lambda_{12}}{x_1+\Lambda_{12}x_2}\right) \quad (3)$$

Equations 2 and 3 correspond to the activity coefficients of components in the binary mixture, where $\Lambda_{ij}$ ($\Lambda_{12}$, $\Lambda_{21}$) is the adjustable parameter of the Wilson model.

The non-random two-liquid (NRTL) model equation:

$$ln\gamma_1 = x_2^2\left[\tau_{21}\left(\frac{G_{21}}{x_1+x_2G_{21}}\right)^2 + \frac{G_{12}\tau_{12}}{(x_2+x_1G_{12})^2}\right] \quad (4)$$

$$ln\gamma_2 = x_1^2\left[\tau_{12}\left(\frac{G_{12}}{x_2+x_1G_{12}}\right)^2 + \frac{G_{21}*\tau_{21}}{(x_1+x_2G_{21})^2}\right] \quad (5)$$

The equation for multicomponent systems:

$$ln(\gamma_1) = \frac{\sum_{j=1}^{n}\tau_{ji}G_{ji}x_j}{\sum_{k=1}^{n}G_{ki}x_k} + \sum_{j=1}^{n}\frac{x_jG_{ij}}{\sum_{k=1}^{n}G_{kj}x_k}\left(\tau_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^{n}x_i\tau_{ij}G_{ij}}{\sum_{k=1}^{n}G_{kj}x_k}\right) \quad (6)$$

The universal quasi-chemical theory (UNIQUAC) model equation:

$$ln\,\gamma_i = ln\,\gamma_{i,combinatorial} + ln\,\gamma_{i,residual} \quad (7)$$

$$ln\,\gamma_{i,combinatorial} = 1 - J_i + lnJ_i - 5q_i\left(1 - \frac{J_i}{L_i} + ln\frac{J_i}{L_i}\right) \quad (8)$$

$$ln\,\gamma_{i,residual} = q_i(1 - lns_i - \sum_j \frac{\theta_j\tau_{ki}}{s_j}) \quad (9)$$

$$\tau_{ji} = \exp\left(-\frac{u_{ji}-u_{ii}}{RT}\right) \quad (10)$$

$$J_i = \frac{r_i}{\sum_j^i r_jx_j} \quad (11)$$

$$L_i = \frac{q_i}{\sum_j^i q_jx_j} \quad (12)$$

$$s_i = \sum_k^i \theta_k\tau_{ki} \quad (13)$$

$$\theta_i = \frac{x_iq_i}{\sum_j^i q_jx_j} \quad (14)$$

$$r_i = \sum_k^i v_k^{(i)}R_k \quad (15)$$

$$q_i = \sum_k^i v_k^{(i)}Q_k \quad (16)$$

The parameters of equations 8 and 9 were defined from equations 10 to 16, where $r_i$ is a parameter representing a relative molecular volume and $q_i$ another one representing a relative molecular surface area, each of which is given by the sum of the $R_k$ and $Q_k$ functional group parameters comprising the component (**Table S4,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3349/5363).

### *Atomic and molecular properties of solvents*

The macroscopic thermodynamic behavior and deviations from ideality of the mixtures under study are governed by the molecular properties of the pure components. Intermolecular interactions play a key role in determining non-ideal vapor–liquid equilibrium (VLE) behavior (Li ***et al.***, 2026). **Table S5,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3349/5363 summarizes the physicochemical properties of methanol, chloroform, and benzene. These properties explain the deviations from ideality. The relationship between permanent and induced dipoles governs intermolecular forces in these mixtures.

The dipole moment ($\mu$) represents a permanent charge separation, dictating strong electrostatic interactions and hydrogen bonding. Methanol is the most polar component, with a dipole moment ($\mu$) of 1.71 D, which allows it to form extensive self-associated networks via hydrogen bonding. Chloroform, with a dipole moment ($\mu$) of 1.01 D, acts as a significant hydrogen bond donor due to its acidic proton. Conversely, polarizability measures the extent to which a molecule's electron cloud can be distorted to form an induced dipole (Atkins, 1998). Benzene is non-polar but presents a high polarizability (α) due to its electron cloud, allowing it to engage in dipole-induced dipole interactions when exposed to the permanent electric fields of methanol or chloroform (**Figure 1**).

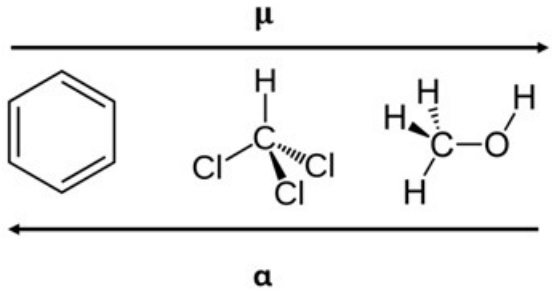



**Figure 1.** Trend of μ and α in the benzene, chloroform, and methanol, respectively

## Results and discussion

### *Thermodynamic consistency test of experimental data*

The consistency of experimental vapor-liquid equilibrium (VLE) data for binary systems can be evaluated by correlating it with appropriate mathematical models, a process known as a thermodynamic consistency test. This implies that the values estimated by the test must agree with the experimental values within their uncertainty range (**Jackson & Wilsak**, 1995). T, P, and x variables, and even the activity coefficient of a system, are linked by the phase rule of thermodynamics (**Fedele *et al.***, 2005; **Marrufo *et al.***, 2009). Consequently, the fundamental equation of thermodynamics, the Gibbs-Duhem equation for activity coefficients, is used to check the reliability of experimental data (**Li *et al.***, 2018; **Martínez-Baños *et al.***, 2015). We performed a thermodynamic consistency test to verify this reliability. For the binary system, the Herington approach was applied (Equation 17).

$$D = 100\left|\frac{S_+ - S_-}{S_+ + S_-}\right| = \frac{\left|\int_{x_1=0}^{x_1=1} ln\frac{\gamma_1}{\gamma_2} dx_1\right|}{\int_{x_1=0}^{x_1=1}\left|ln\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right| dx_1} \quad (17)$$

$$J_{modified} = 34\, X \left|\frac{\Delta H_m}{\Delta G_m^E}\right| X \left|\frac{T_1^\circ - T_2^\circ}{T_i}\right| \quad (18)$$

The variables $S_+$ and S- are the areas in positive and negative ordinates of the Redlich-Kister plots only for the binary data of mixtures (**Das *et al.***, 2021). The boiling points of the pure components (1) and (2) are represented by $T_1^\circ$ and $T_2^\circ$, respectively. $T_i$ is the lowest

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):837-850, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3349

point (Equation 18). (**Liu *et al***., 2017). The ratio $\frac{\Delta H_m}{\Delta G_m^E}$ could vary between 0 and 28.640, as calculated in Equation 19.

$$\Delta H_m(Jmol^{-1}) = -237.02 + 1.3863\ X\ \Delta G_m^E(Jmol^{-1}) \quad (19)$$

A maximum was obtained by simple derivation of Equation 20.

$$\Delta G^E = RT \sum x_i\ ln\ \gamma_i \quad (20).$$

According to Wisniak's modified Herington area test, VLE data can be thermodynamically consistent if |D-Jmodified |<10. The thermodynamic consistency of the experimental VLE data for the ternary system chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3), retrieved from the DDB (data sets 2578, 6481, and 18035), was assessed using the Wisniak point test. The Wisniak point test (L-W test) method has been widely used in the thermodynamic consistency test of binary and multicomponent VLE data (**Duran *et al.***, 2013; **Parsana *et al.***, 2020; **Shen *et al.***, 2018). The L-W test is described by the following equations:

$$F_k = 100\ X\ \frac{|L_k - W_k|}{L_k + W_k} \quad (21)$$

$$L_k = \frac{\sum T_i^{\circ} x_i \Delta s_i^0}{\Delta s} - T = \frac{G^E}{\Delta s} - \frac{RTw}{\Delta s} = W_k \quad (22)$$

$$\Delta s = \sum x_i \Delta s_i^{\circ} \quad (23)$$

$$w = \sum x_i\ \ln\left(\frac{\gamma_i}{x_i}\right) \quad (24)$$

The VLE data can be considered to be thermodynamically consistent if the average and maximum values of Fk< 5. Therefore, the VLE experimental data for the binary mixtures with best results were ID 4500, ID 4121, and ID 2724 for chloroform(1) + benzene(2), chloroform(1) + methanol(2), and methanol(1) + benzene(2) systems, respectively, and data set 18035 for ternary system (**Tables 1, 2, 3, 4**).

**Table 1.** Results of the modified Herington for chloroform(1) + benzene(2)

| Parameters | Data set 408 | Data set 410 | ID 3565 | ID 4500 |
|---|---|---|---|---|
| D | 27.6770 | 23.3813 | 2.6344 | 5.1554 |
| $J_{corrected}$ | 3.4363 | 5.3548 | 5.1769 | 5.1613 |
| Result | 24.2407 failed | 18.0265 failed | 2.5425 passed | 0.0059 passed |

**Table 2.** Results of the modified Herington for chloroform(1) + methanol(2)

| Parameters | ID 3114 | ID 4121 |
|---|---|---|
| D | 2.7429 | 0.2716 |
| $J_{corrected}$ | 0.4041 | 0.4003 |
| Result | 2.3389 passed | 0.1288 passed |

**Table 3.** Results of the modified Herington for methanol(1) + benzene(2)

| Parameters | Data set 39 | ID 2724 | ID 2749 | ID 3711 |
|---|---|---|---|---|
| D | 0.02787 | 0.9524 | 0.4784 | 2.8765 |
| $J_{corrected}$ | 1.8733 | 1.8733 | 1.8698 | 1.0306 |
| Result | 1.8455 passed | 0.9209 passed | 1.3914 passed | 1.8459 passed |

**Table 4.** Results of L-W test for chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3)

| Parameters | Data set 2578 | Data set 6481 | Data set 18035 |
|---|---|---|---|
| $(F_K)_{average}$ | 1.3891 | 1.1533 | 1.0798 |
| $(F_K)_{maximum}$ | 2.0496 | 3.7333 | 2.0088 |
| Result | passed | passed | passed |

The VLE data for the ternary system of chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3) data from the DDB were predicted by chloroform(1) + benzene(2) (DDB), chloroform(1) + methanol(2) (KDB), and methanol(1) + benzene(2) (KDB), and correlated parameters from UNIQUAC, Wilson, and NRTL.

***Correlation of VLE data***

To optimize the interaction parameters (obtaining the minimum value) (**Rodrigues *et al.***, 2023; **Timmermann & Muzzio**, 2017) for each model, calculations were developed using the GRG nonlinear solver in Microsoft Excel (**Fernández *et al.***, 2021). The binary parameters were estimated based on the objective function (OF) (Equation 25) in terms of the calculated (Wilson, NRTL, UNIQUAC) and experimental (Equation 1) activity coefficient. These parameters are used for the prediction of the activity coefficient of ternary systems.

$$OF = \sum_{i=i}^{N} \sum_{j=1}^{2} \left| \left( \frac{\gamma_j^{exp} - \gamma_j^{cal}}{\gamma_j^{exp}} \right) \right|^2 \quad (25),$$

where i represents the amount of data from 1 to N and j denotes the number of components in the system. Binary interaction parameters of Wilson, NRTL, and UNIQUAC models with the objective function (OF) are listed in **Table 5**.

Average absolute deviations of the boiling temperature (AADT) between experimental and calculated data should be as minimal as possible to obtain the optimal interaction parameters for each model (**Table 6**).

The comparison between experimental data and the thermodynamic model predictions (Wilson, NRTL, and UNIQUAC models) for the binary mixtures of chloroform(1) + benzene(2), chloroform(1) + methanol(2), and methanol(1) + benzene(2) is presented in **Figures 2, 3,** and **4** for each binary system, respectively.

**Table 5.** Results of binary parameters using the objective function

| Model | $A$ij (J/mol) | $A$ji (J/mol) | αij |
|---|---|---|---|
| Chloroform(1) + Benzene(2) | | | |
| Wilson | 1.1294 | 1.1103 | 0.3 |
| NRTL | -326.4422 | -326.4993 | |
| UNIQUAC | -13.9129 | -53.7918 | |
| Chloroform(1) + Methanol(2) | | | |
| Wilson | 0.8668 | 0.1311 | 0.3 |
| NRTL | 551.1252 | 389.0909 | |
| UNIQUAC | 976.3349 | -155.6458 | |
| Methanol(1) + Benzene(2) | | | |
| Wilson | 0.1512 | 0.3742 | 0.3 |
| NRTL | 852.0765 | 771.4252 | |
| UNIQUAC | -79.4477 | 997.1310 | |

**Table 6.** Average deviation for chloroform(1) + benzene(2), chloroform(1) + methanol(2), and methanol(1) + benzene(2)

| Model | AADT |
|---|---|
| Chloroform(1) + Benzene(2) | |
| Wilson | 0.1389 |
| NRTL | 0.3335 |
| UNIQUAC | 0.1361 |
| Chloroform(1) + Methanol(2) | |
| Wilson | 0.1927 |
| NRTL | 1.0022 |
| UNIQUAC | 0.1911 |
| Methanol(1) + Benzene(2) | |
| Wilson | 0.1427 |
| NRTL | 0.7420 |
| UNIQUAC | 0.3467 |

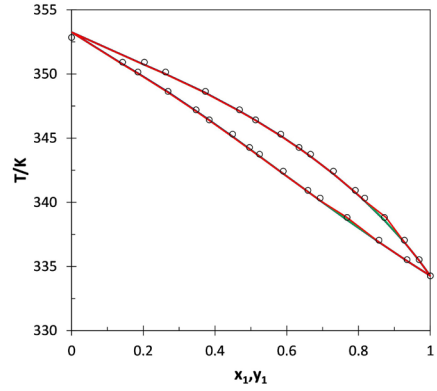



**Figure 2.** Temperature-composition diagram for chloroform(1) + benzene(2) at atmospheric pressure. The point (○) represents the experimental data; the solid red line (–) is the Wilson model; the solid cool green line (–) is the NRTL model, and the midnight blue line (–) is the UNIQUAC model (solid lines may overlap).

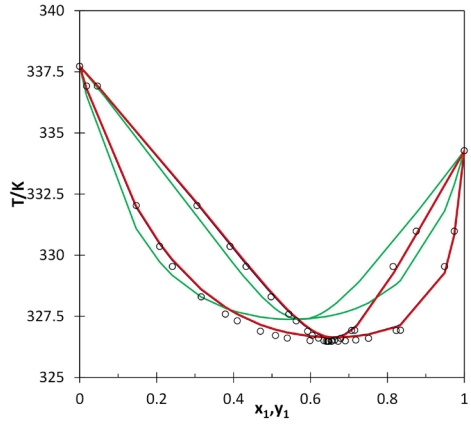



**Figure 3.** Temperature-composition diagram for chloroform(1) + methanol(2) at atmospheric pressure. The point (○) represents the experimental data; the solid red line (–) is the Wilson model; the solid cool green line (–) is the NRTL model, and the midnight blue line is (–) the UNIQUAC model (solid lines may overlap).

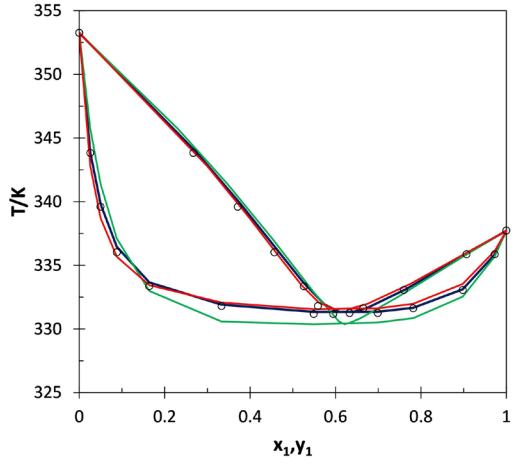



**Figure 4.** Temperature–composition diagram for the methanol(1) + benzene(2) system at atmospheric pressure. The point (○) represents the experimental data; the solid red line (–) is the Wilson model; the solid cool green line (–) is the NRTL model, and the midnight blue line (–) is the UNIQUAC model (solid lines may overlap).

**Kurihara *et al.*** (1998) measured the VLE data for the chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3) ternary system at 101.3 kPa and recommended the Wilson model for its prediction. Our results confirmed this conclusion. The Wilson model demonstrated the best fit, as evidenced qualitatively by the data correlation in **Figure 5** and quantitatively by the lowest average deviation in dew point temperature (AADT = 0.5849) (**Table 7**).

### *Chemical discussion*

From a molecular perspective, the deviations from ideality observed can be rationalized based on the intrinsic physicochemical properties of the components. Methanol is a small polar molecule capable of acting as both hydrogen bond donor and acceptor, leading to strong self-association through extensive hydrogen-bonding networks. Although moderately polar, chloroform primarily acts as a hydrogen-bond donor through its acidic hydrogen and exhibits significant dipole–induced dipole interactions. Benzene, in contrast, is a nonpolar molecule dominated by dispersion forces and characterized by a highly polarizable π-electron cloud. The interplay of these distinct intermolecular interactions governs the non-ideal behavior observed in both binary and ternary mixtures (**Israelachvili**, 2011; **Prausnitz *et al.***, 1999).

Our results for vapor-liquid equilibrium (VLE) samples from the chloroform(1) + benzene(2), chloroform(1) + methanol(2), and methanol(1) + benzene(2) binary systems, as well as the chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3) ternary system, showed that they were strongly representative of non-ideal behaviors. The Raoult's law deviations from ideality may be the result of different dispersion forces for different systems, with differences between the dipole and dipole interactions and the hydrogen bonds (**Israelachvili**, 2011).

We found negative deviations from ideality in the chloroform(1) + benzene(2) system, indicating stronger attractive interactions between unlike molecules. This behavior can be explained by the ability of chloroform (with a significant dipole moment) to induce polarization in the π-electron cloud of benzene, resulting in stabilizing dipole–induced dipole interactions. These interactions reduce the total vapor pressure characteristic of ideal predictions, a result that explains the marked correlations between Wilson and UNIQUAC models, and why they can be more related, and the reason for their energetic contribution related to non-ideal mixing and their association with this model (**Prausnitz *et al.***, 1999; **Orbey & Sandler**, 1998).

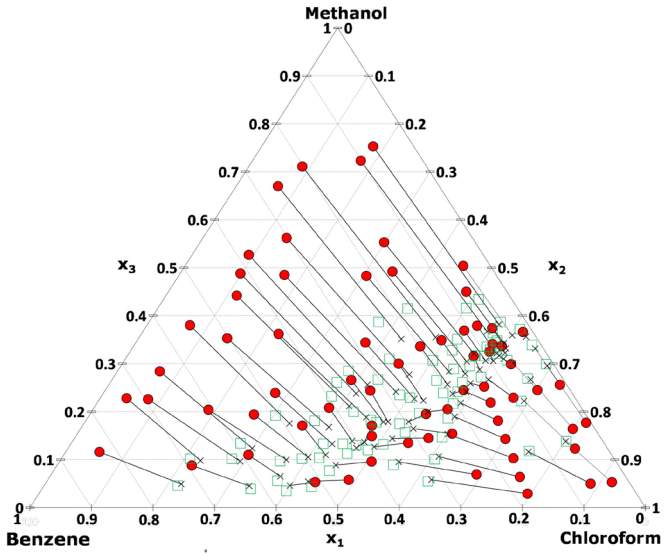



**Figure 5.** Diagram of the VLE for the chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3) ternary system at atmospheric pressure. The red points (•) represent the liquid-phase experimental data; the green open squares (□) represent the vapor-phase experimental data, and the green crosses (×) represent the data predicted by the Wilson model.

**Table 7.** Absolute average deviation for chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3).

| Model | AADT |
|---|---|
| Wilson | 0.5849 |
| NRTL | 0.9896 |
| UNIQUAC | 0.6141 |

$$AADT = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|T_{exp} - T_{calc}\right|$$

In contrast, the chloroform(1) + methanol(2) and methanol(1) + benzene(2) systems exhibited positive deviations from Raoult's law. These deviations derive from the disruption of the hydrogen-bonding network of methanol upon mixing. Although chloroform can act as a weak hydrogen-bond donor, it does not effectively replace methanol–methanol interactions. However, benzene is incapable of participating in hydrogen bonding. In consequence, the self-association of methanol is weakened, leading to reduced cohesion in the liquid phase and increased volatility. This behavior is reflected in activity coefficients over the unity ($\gamma > 1$), which indicates that unlike interactions are weaker than interactions (**Poling *et al.***, 2001; **Prausnitz *et al.***, 1999). Our results indicate that interactions in the pure components are more favorable than in the chloroform(1) + methanol(2) and methanol(1) + benzene(2) mixtures, as evidenced by their positive deviations from ideality. However, these mixtures are stabilized by non-covalent interactions, including O–H···π interactions between benzene and methanol and hydrogen bonding between chloroform and methanol, which contribute to their miscibility (**Di Mino *et al.***, 2023).

The performance of the thermodynamic models further supports this molecular interpretation. The Wilson model, which accounts for local composition and asymmetry in molecular interactions, yielded the lowest AADT values across the systems. The UNIQUAC model, incorporating both combinatorial (size and shape effects) and residual (energy interactions) contributions, also provided reliable predictions, particularly for

the chloroform(1) + benzene(2) system where molecular size and shape differences are significant (**Abrams & Prausnitz**, 1975; **Orbey & Sandler**, 1998). In contrast, the NRTL model showed larger deviations, especially for the chloroform + methanol system, suggesting that accurate parameterization is required when modeling mixtures dominated by specific interactions such as hydrogen bonding (**Renon & Prausnitz**, 1968).

Beyond numerical fitting, these results emphasize that intermolecular forces fundamentally determine macroscopic phase behavior. Stabilizing polarization and dispersion interactions in the chloroform(1) + benzene(2) system lead to negative excess Gibbs free energies, whereas disruption of hydrogen bonding in methanol-containing mixtures results in positive excess Gibbs free energies. These thermodynamic effects are reflected in activity coefficients significantly different from unity, confirming the limitations of ideal solution models in describing such systems (**Israelachvili**, 2011; **Prausnitz *et al.***, 1999).

From an applied perspective, understanding these deviations has practical implications for process design. The ternary chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3) system is relevant in solvent recovery, extraction, and separation processes. For example, chloroform–methanol mixtures are used in biochemical extraction processes and chloroform(1) + benzene(2) systems exist in industrial formulations. The prediction of azeotropic behavior and volatility trends is also necessary to build efficient distillation and separation unity composition systems (**Orbey & Sandler**, 1998).

Moreover, here, we found that not all experiments and observations feeding from thermodynamic databases such as DDB and KDB are very consistent, as illustrated by the Wisniak-modified Herington and L-W tests. This underscores the necessity of careful dataset selection and validation before parameter estimation. Reliable thermodynamic modeling, therefore, requires not only appropriate models but also rigorous consistency testing and data curation (**Wisniak**, 1987; **Herington**, 1951).

In summary, the deviations from Raoult's law observed in the systems under study arise from competing intermolecular forces, including dipole–induced dipole interactions in chloroform(1) + benzene(2), and hydrogen-bond disruption in methanol-containing mixtures. The better performance of Wilson and UNIQUAC models reflected their ability to capture these interaction effects more effectively than NRTL under the present conditions. Our findings reinforce the direct link between molecular-level interactions and macroscopic thermodynamic behavior, providing a physically grounded basis for the modeling and interpretation of non-ideal multicomponent systems.

## Conclusions

This study presents a comprehensive thermodynamic analysis of isobaric vapor–liquid equilibrium (VLE) data for the chloroform(1) + methanol(2) + benzene(3) ternary system at 101.3 kPa, using data compiled from the DDB and KDB databases. Binary interaction parameters for Wilson, NRTL, and UNIQUAC models were determined from experimental VLE data of the corresponding binary subsystems. Thermodynamic consistency was evaluated using the Herington test modified by Wisniak, allowing the selection of the most reliable datasets (ID 4500, 4121, and 2724) for parameter estimation.

The analysis of activity coefficients revealed distinct non-ideal behavior: positive deviations from ideality were observed for the chloroform(1) + methanol(2) and methanol(1) + benzene(2) systems, while negative deviations were found for the chloroform(1) + benzene(2) system. Among the evaluated models, Wilson provided the most consistent correlation of ternary VLE data (Data Set 18035), supported by the agreement between calculated and experimental values, as reflected in low AADT deviations.

Beyond individual model performance, our study demonstrated that reliable thermodynamic modeling requires the combined application of consistency testing, dataset selection, parameter optimization, and model validation. In this context, the study established an integrated evaluation framework enabling a critical reassessment of legacy thermodynamic data and improved predictive reliability in multicomponent systems.

Overall, our results highlighted that VLE modeling should not be treated as an isolated fitting procedure but as part of a structured thermodynamic evaluation process in which data quality, model selection, and predictive performance are intrinsically interconnected.

## Supplementary information

See the supplementary information in https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3349/5363

## Author contributions

L.S.R.F.: Data curation; J.C.R.V., E.A.G., L.S.R.F.: Formal analysis; E.A.G., J.C.R.V., L.S.R.F.: Investigation; L.S.R.F., E.A.-G.: Methodology; L.S.R.F. Software; E.A.G., J.C.R.V.: Supervision; L.S.R.F.: Writing of the original draft; J.C.R.V., E.A.G.: Writing, review, and editing. All authors read and agreed to the published version of the manuscript.

## Funding

This research received no external funding.

## Data availability statement

Dortmund Data Bank Software Package (DDBSP): http://www.ddbst. de. KDB (Korea Thermophysical Properties Data Bank): http://www.cheric.org/research/kdb.

## Conflicts of interest

The authors declare no conflict.

## References

**Atkins, P. W.** (1998). *Atkins' Physical Chemistry*. W. H. Freeman and Company.

**Belvèze, L. S., Brennecke, J. F., Stadtherr, M. A.** (2004). Modeling of Activity Coefficients of Aqueous Solutions of Quaternary Ammonium Salts with the Electrolyte-NRTL Equation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *43*(3), 815-825. https://doi.org/10.1021/ie0340701

**Chemical Engineering Materials Research Information Center (CHERIC).** (2022). *KDB*. (n.d.). Retrieved: November 23, 2022, from https://www.cheric.org/research/kdb/

**Di Mino, C., Seel, A. G., Clancy, A. J., Headen, T. F., Földes, T., Rosta, E., Sella, A., Skipper, N. T.** (2023). Strong structuring arising from weak cooperative O-H···π and C-H···O hydrogen bonding in benzene- methanol solution. *Nature Communications*, *14*(1), 5900. https://doi.org/10.1038/s41467-023-41451-y

**Dortmund Data Bank.** (2022). Vapor-Liquid Equilibrium Data. Retrieved June 7, 2022, from http://www.ddbst.com/ddb.html

**Durán, J. A., Córdoba, F. P., Gil, I. D., Rodríguez, G., Orjuela, A.** (2013). Vapor-liquid equilibrium of the ethanol+3-methyl-1-butanol system at 50.66, 101.33 and 151.99kPa. *Fluid Phase Equilibria*, *338*, 128-134. https://doi.org/10.1016/j.fluid.2012.11.004

**Fedele, L., Bobbo, S., De Stefani, V., Camporese, R., Stryjek, R.** (2005). Isothermal VLE Measurements for Difluoromethane + Dimethyl Ether and an Evaluation of Hydrogen Bonding. *Journal of Chemical & Engi neering Data, 50*. https://doi.org/10.1021/je049789

**Fernández, L. S. R., Amado-González, E., Hurtado, E. G. Y.** (2021). Study of Thermodynamic Modeling of Isothermal and Isobaric Binary Mixtures in Vapor-Liquid Equilibrium (VLE) of Tetrahydrofuran with Benzene (303.15 K) Cyclohexane (333.15 K), Methanol (103 kPa), and Ethanol (100 kPa). *Thermo*, *1*(3), 286-296. https://doi.org/10.3390/thermo1030019

**Fredenslund, A., Jones, R. L., Prausnitz, J. M.** (1975). Group-Contribution Estimation of Activity Coefficients in Nonideal Liquid Mixtures. *Journal AIChE*, *21,* 1086-1099. https://doi.org/10.1002/AIC.690210607

**Grant M., W.** (1964). Vapor-Liquid Equilibrium. XI. A New Expression for the Excess Free Energy of Mixing. *American Chemical Society, 86*(2), 127-130. https://doi.org/10.1021/ja01056a002

**Han, X., Wang, Y., Wang, Y., Zhao, H., Li, Q.** (2021). Vapor-Liquid Equilibrium Experiment and Process Simulation for Methanol and Ethyl Formate at 101.3 kPa. *Journal of Chemical and Engineering Data*, *66*(5), 1929-1938. https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00972

**Jackson, P. L. & Wilsak, R. A.** (1995). Thermodynamic consistency tests based on the Gibbs-Duhem Equation applied to isothermal, binary vapor-liquid equilibrium data: data evaluation and model testing. *Fluid Phase Equilibria*, *103*, 155-197. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-3812(94)02581-K

**Kang, J. W., Diky, V., Chirico, R. D., Magee, J. W., Muzny, C. D., Abdulagatov, I., Kazakov, A. F., Frenkel, M.** (2010). Quality assessment algorithm for vapor-liquid equilibrium data. *Journal of Chemical and Engineering Data*, *55*(9), 3631-3640. https://doi.org/10.1021/je1002169

**Kijevčanin, M. L., Djuriš, M. M., Radović, I. R., Djordjević, B. D., Šerbanović, S. P.** (2007). Volumetric properties of the binary methanol + Chloroform and Ternary Methanol + Chloroform + Benzene mixtures at (288.15, 293.15, 298.15, 303.15, 308.15, and 313.15) K. *Journal of Chemical and Engineering Data*, *52*(3), 1136-1140. https://doi.org/10.1021/je060441j

**Kurihara, K., Hori, H., Kojima, K.** (1998). Vapor-Liquid Equilibrium Data for Acetone + Methanol + Benzene, Chloroform + Methanol + Benzene, and Constituent Binary Systems at 101.3 KPa. *Journal of Chemical & Engineering Data*. https://doi.org/10.1021/je970231u

**Li, L., Wu, Q., Wu, K., Wang, H., Zheng, Y., Li, Q.** (2018). Experimental Isobaric Vapor Liquid Equilibrium for Binary Systems Diethylene Glycol Dibenzoate + Diethylene Glycol, Diethylene Glycol Dibenzoate + Octyl Benzoate, and Ternary System Diethylene Glycol Dibenzoate + Diethylene Glycol + Octyl Benzoate at 1.0152 kPa. *Journal of Chemical and Engineering Data*, *63*(10), 3823-3828. https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00460

**Li, W., Chen, S., Yang, M., Zhao, J., Wang, H., Guo, H., Fan, J., Zhang, T.** (2026). Isobaric Vapor–Liquid Equilibrium and Intermolecular Interactions in Benzene + Ethanol + Ionic Liquid Ternary Systems. *Journal of Chemical & Engineering Data*, *71*(4), 1695-1707. https://doi.org/10.1021/acs.jced.5c00433

**Liu, H., Cui, X., Zhang, Y., Feng, T., Zhang, K.** (2017). Isobaric Vapor-Liquid Equilibrium for the Binary and Ternary System with Isobutyl Alcohol, Isobutyl Acetate and Dimethyl Sulfoxide at 101.3 kPa. *Journal of Chemical and Engineering Data*, *62*(6), 1902-1909. https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00241

**Marcilla, A., Oliver, I., Moncur, L., Carbonell-Hermida, P., Olaya, M. del M.** (2024). Analysis of Vapor-Liquid Equilibrium in Ternary Systems for an Adequate Planning of Their Experimental Determination and Correlation. *Journal of Chemical and Engineering Data*, *69*(10), 3462-3471. https://doi.org/10.1021/acs.jced.3c00712

**Marrufo, B., Aucejo, A., Sanchotello, M., Loras, S.** (2009). Isobaric vapor-liquid equilibrium for binary mixtures of 1-hexene + n-hexane and cyclohexane + cyclohexene at 30, 60 and 101.3 kPa. *Fluid Phase Equilibria*, *279*(1), 11–16. https://doi.org/10.1016/j.fluid.2008.12.007

**Martínez-Baños, L., Embid, J. M., Otín, S., Artal, M.** (2015). Vapour-liquid equilibrium at T=308.15K for binary systems: Dibromomethane+n-heptane, bromotrichloromethane+n-heptane, bromotrichloromethane+dibromomethane, bromotrichloromethane+bromochlorom ethane and dibromomethane+bromochloromethane. Experimental data and modelling. *Fluid Phase Equilibria*, *395*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.fluid.2015.03.023

**Mathias, P. M.** (2017). Guidelines for the Analysis of Vapor-Liquid Equilibrium Data. *Journal of Chemical and Engineering Data, 62*(8), 2231-2233. https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00582

**McDermott, C. & Ellis, S. R. M.** (1965). A multicomponent consistency test. *Chemical Engineering Science*, *20*, 293-296. https://doi.org/10.1016/0009-2509(65)85018-7

**Parsana, V. M., Parekh, U., Dabke, S. P., Ziniya, K., Joshi, K., Vlugt, T. J. H., Ramdin, M**. (2020). Isobaric Vapor-Liquid Equilibrium Data of Binary Systems Containing 2-Ethoxyethanol, 2-Ethoxyethyl Acetate, and Toluene. *Journal of Chemical and Engineering Data*, *65*(10), 4798-4804. https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00291

**Poling, B. E., Prausnitz, J. M., O'Connell, J. P.** (2001). *Properties of Gases and Liquids.* McGraw-Hill Education.

**Rajamohan, N., Senthil Kumar, P., Rajasimman, M., Qasmi, F. Al.** (2021). Treatment of methanol industry effluent using algal biomass *Gelidium omanense* kinetic modeling. *Chemical Engineering Journal Advances*, *5*(15), 100068. https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100068

**Renon, H. & Prausnitz, J. M.** (1968). Local Compositions in Thermodynamic Excess Functions for Liquid Mixtures. *Journal AlChE*, *14*(1), 135-144. https://doi.org/10.1002/aic.690140124

**Rodrigues, C. T., de Lopes, G. F., de Souza, T. L., de Jorge, L. M. M., Paraíso, P. R.** (2023). Methanol and dimethyl ether steam reforming: a thermodynamic analysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, *40*(3), 885-899. https://doi.org/10.1007/s43153-022-00276-w

**Sahayaraj, K. & Jeeva, M.** (2011). Nymphicidal and ovipositional efficacy of seaweed *Sargassum tenerrimum* (J. Agardh) against *Dysdercus cingulatus* (Fab.) (Pyrrhocoridae). *Chilean Journal Of Agricultural Research, 72*(1), 152-156. https://doi.org/10.4067/S0718-58392012000100024

**Shen, D., Chen, T., Bai, P., Guo, X.** (2018). Isobaric Vapor-Liquid Equilibrium for Binary and Ternary Systems of 2-Methoxyethanol, Ethylbenzene, and Dimethyl Sulfoxide at 100.00 kPa. *Journal of Chemical and Engineering Data*, *63*(9), 3345-3352. https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00225

**Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M**. (2005). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics.* McGraw-Hill Chemical Engineering International.

**Thanekar, P., Gogate, P. R., Znak, Z., Sukhatskiy, Y., Mnykh, R**. (2021). Degradation of benzene present in wastewater using hydrodynamic cavitation in combination with air. *Ultrasonics Sonochemistry*, *70,* 105296. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105296

**Timmermann, E. O. & Muzzio, C. R.** (2017). Analysis and extension of the Furter Equation, and its application in the simulation of saline extractive distillation columns. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, *34*(2), 607-621. https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170342s20150102

**Vertommen, A., Panis, B., Swennen, R., Carpentier, S. C.** (2010). Evaluation of chloroform/methanol extraction to facilitate the study of membrane proteins of non-model plants. *Planta*, *231*(5), 1113-1125. https://doi.org/10.1007/s00425-010-1121-1

**Wisniak, J.** (1993). A New Test for the Thermodynamic Consistency of Vapor- Liquid Equilibrium. *American Chemical Society*, *32*, 1531-1533. https://doi.org/10.1021/ie00019a030

**Wisniak, J., Apelblat, A., Segura, H.** (1997). An assessment of thermodynamic consistency tests for vapor-liquid equilibrium data. *Physics and Chemistry of Liquids*, *35*(1), 1-58. https://doi.org/10.1080/00319109708030571

**Wisniak, J., Ortega, J., Fernández, L.** (2017). A fresh look at the thermody namic consistency of vapour-liquid equilibria data. *Journal of Chemical Thermodynamics, 105*, 385-395. https://doi.org/10.1016/j.jct.2016.10.038

**Wisniak, J. & Tamir, A.** (1978). Vapor-Liquid Equilibria of the Ternary System Chloroform-Methanol-Benzene. *Journal of Chemical and Engineering Data*, *23*(4), 287-292. https://doi.org/10.1021/je60079a014

**Zhou, F., Zhong, L., Chen, C., Li, Y., Xu, C.** (2017). Isobaric Vapor-Liquid Equilibrium for Binary and Ternary Systems of Isoamyl Alcohol + Isoamyl Acetate + Dimethyl Sulfoxide at 101.33 kPa. *Journal of Chemical and Engineering Data*, *62*(2), 691-697. https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b00733

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

**Matemáticas**

Artículo original

# Estudio de la estructura y el momento de inercia de los politropos newtonianos

## Study of the structure and moment of inertia of Newtonian polytropes

**Jeisson Armando Cruz-Amaya**

Facultad de Matemáticas e Ingeniería, Fundación Universitaria Konrad Lorenz, Bogotá, Colombia

## Resumen

Los politropos newtonianos son modelos fundamentales en astrofísica que pueden representar sistemas autogravitantes, como son las estrellas y ciertos objetos compactos. Sin embargo, llama la atención que, a pesar de su popularidad, muy poco se ha discutido en la literatura sobre su momento de inercia. Por ello, en este estudio nos propusimos analizar algunas propiedades integrales y de la estructura de los politropos newtonianos, prestando especial atención a su momento de inercia. Con ese fin estudiamos la ecuación de Lane-Emden y presentamos soluciones tanto analíticas como numéricas para diferentes valores del índice politrópico $n$. Asimismo, ofrecemos diagramas de masa-radio y calculamos el momento de inercia de varias configuraciones. Encontramos que el momento de inercia normalizado $I/MR^2$, en función del índice politrópico $n$, se ajusta a una función polinómica de cuarto orden.

**Palabras clave:** politropos newtonianos; momento de inercia; ecuación de Lane-Emden; diagramas masa-radio; índice politrópico.

## Abstract

Newtonian polytropes are fundamental models in astrophysics that can represent self-gravitating systems such as stars and certain compact objects. Despite their popularity, however, it is striking that very little has been discussed in the literature about their moment of inertia. In this context, here, we aimed to analyze some integral and structural properties of Newtonian polytropes, with special emphasis on their moment of inertia. For this purpose, we studied the Lane-Emden equation and present both analytical and numerical solutions for different values of the polytropic index $n$. We also provide mass-radius diagrams and calculate the moment of inertia for various configurations. We found that the normalized moment of inertia $I/MR^2$, as a function of the polytropic index $n$, follows a polynomial of the fourth order.

**Keywords:** Newtonian polytropes; moment of inertia; Lane-Emden equation; mass-radius diagrams; polytropic index.

## Introducción

El concepto de politropía tiene sus raíces en el estudio de la termodinámica de gases y fluidos, pero su aplicación en astrofísica se consolidó en el siglo XX con los trabajos de **Eddington** (1920) y **Chandrasekhar** (1964). **Eddington** (1920) utilizó estos modelos para analizar la estabilidad de las estrellas, mientras que **Chandrasekhar** (1964) los empleó en el estudio de enanas blancas, estableciendo el famoso límite que lleva su nombre, el cual determina la masa máxima que una enana blanca puede alcanzar antes de colapsar por efecto de su propia gravedad.

**Citación:** Cruz-Amaya JA. Estudio de la estructura y el momento de inercia de los politropos newtonianos. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

**Editor:** Jorge Cossio

**Correspondencia:**
Jeisson Armando Cruz-Amaya;
jasoncruz9014@gmail.com

**Recibido:** 24 de noviembre de 2025
**Aceptado:** 15 de junio de 2026
**Publicado en línea:** 21 de julio de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

El concepto de politropa introducido por **Lane** (1870) y complementado por **Emden** (1907) surge porque la ecuación de estado (EdE) politrópica que describe estos sistemas permite describir una gran variedad de estructuras, dependiendo del valor del índice politrópico. En otras palabras, como su nombre lo indica, estos sistemas autogravitantes pueden adoptar diferentes perfiles de densidad y presión, dependiendo de su índice politrópico.

La EdE brinda un modelo sencillo, que describe relativamente bien a una gran variedad de objetos compactos sin necesidad de recurrir a ecuaciones más complejas. En el marco de la gravedad Newtoniana, estos modelos son esenciales para entender la distribución de masa, presión y temperatura dentro de una estrella en equilibrio hidrostático (**Chandrasekhar**, 1967; **Shapiro** & **Teukolsky**, 1983; **Tooper**, 1964). Algunos autores han propuesto el modelo de politropas relativistas para modelar halos de materia oscura en galaxias (**Lopes** & **Panotopoulos**, 2019; **Stuchlík**, **Hledík**, & **Novotný**, 2016; **Stuchlík**, **Novotný**, & **Hladík**, 2025).

**Tooper** (1964) extendió el análisis de los modelos politrópicos al marco de la relatividad general, explorando su aplicabilidad en objetos extremadamente compactos, como estrellas de neutrones y precursores de agujeros negros. Estudios de la estabilidad radial de configuraciones politrópicas relativistas fue llevado a cabo por **Bludman** (1973), **Chandrasekhar** (1964), **Hladík**, **Posada** & **Stuchlík** (2020), **Horedt** (2013), and **Posada**, **Hladík** & **Stuchlík** (2020). La EdE también ha sido empleada en el modelamiento de objetos compactos covariantes anisotrópicos (**Beltracchi** & **Posada**, 2025; **Raposo *et al***., 2019)

A pesar de que el modelo politrópico es ampliamente utilizado en la literatura, llama la atención que se haya prestado poca atención al estudio de su momento de inercia en el límite Newtoniano. Aunque se han realizado investigaciones en sistemas relativistas autogravitantes (**Beltracchi** & **Posada**, 2024a, 2024b, 2025; **Breu** & **Rezzolla**, 2016; **Chandrasekhar** & **Miller**, 1974; **Hartle**, 1967; **Hartle** & **Thorne**, 1968; **Jiang** & **Yagi**, 2020), el análisis de cómo este momento de inercia varía con el índice politrópico, en el límite Newtoniano, sigue siendo un tema poco abordado. Este estudio es particularmente relevante, ya que los resultados para politropas Newtonianas proporcionan un banco de pruebas fundamental para validar los correspondientes cálculos en sistemas relativistas. Este trabajo, busca subsanar esta carencia mediante un estudio del momento de inercia de politropas Newtonianas.

## Materiales y métodos

### *Politropas Newtonianas*

En astrofísica estelar, uno de los problemas centrales es comprender cómo se mantiene en equilibrio una estrella frente a dos fuerzas opuestas, la presión térmica hacia el exterior, generada por procesos nucleares, y la atracción gravitatoria hacia el centro, debida a su propia masa. Este equilibrio, denominado equilibrio hidrostático, define no solo la estructura interna de las estrellas, sino también su estabilidad y evolución a lo largo del tiempo (**Araujo** & **Chirenti**, 2011; **Chandrasekhar**, 1967; **Kippenhahn**, **Weigert**, & **Weiss**, 2012; **Shapiro** & **Teukolsky**, 1983).

#### Ecuación de equilibrio hidrostático

El equilibrio hidrostático es una condición fundamental en la física estelar que establece que, en cada capa concéntrica de una estrella, la fuerza de presión que actúa hacia el exterior debe equilibrar exactamente la fuerza gravitacional que actúa hacia el centro (ver Fig. 1). Esta condición es esencial para que una estrella mantenga una estructura estable; si la presión fuera insuficiente, el objeto colapsaría; si fuera excesiva, se expandiría. En el marco de la gravitación Newtoniana, el equilibrio hidrostático se describe mediante la siguiente

ecuación

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm(r)\rho(r)}{r^2}, \tag{1}$$

donde, $P(r)$ representa la presión radial en una capa ubicada a una distancia radial $r$ desde el centro de la estrella, $\rho(r)$ es la densidad de masa en esa capa, $m(r)$ es la masa contenida dentro del radio $r$, y $G$ es la constante de gravitación universal. Esta ecuación muestra que el gradiente de presión es negativo, por lo tanto, la presión debe aumentar hacia el centro para contrarrestar la atracción gravitacional ejercida por las capas superiores.

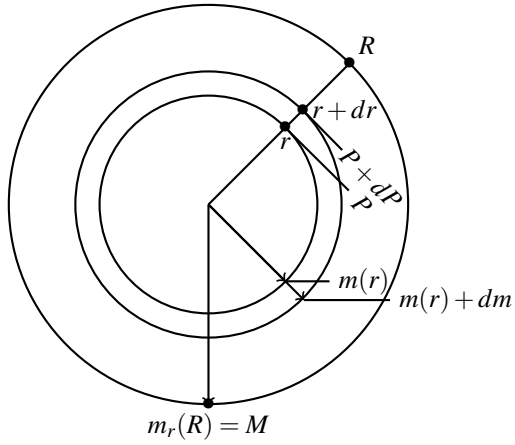



**Figura 1.** Representación esquemática de un sistema esférico con distribución radial de presión (**Chandrasekhar**, 1967, p. 62), (**Kippenhahn**, **Weigert**, & **Weiss**, 2012, p. 4)

Para resolver la ecuación (1), es necesario conocer cómo varía la masa acumulada $m(r)$ con el radio. Esto se establece mediante la ecuación de conservación de la masa en simetría esférica, la cual está dada por (**Chandrasekhar**, 1967, p. 62), (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, p. 57); (**Kippenhahn**, **Weigert**, & **Weiss**, 2012, p. 3).

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r), \tag{2a}$$

$$m(r) = \int_0^{r_1} 4\pi r^2 \rho(r) dr, \tag{2b}$$

donde, $m(r)$ comprende a la masa contenida en el radio $r$. La masa total $M = m_r(R)$, donde $R$ es el radio de la configuración.

Las ecuaciones (1) y (2) forman un sistema acoplado de ecuaciones diferenciales de primer orden que permite determinar la estructura interna de una estrella, es decir, cómo varían la presión, la densidad y la masa con el radio. Sin embargo, este sistema es incompleto hasta que se especifique una relación entre $P$ y $\rho$, conocida como la EdE, la cual refleja la naturaleza del material estelar y las condiciones termodinámicas del sistema (**Chandrasekhar**, 1967, p. 84); (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, p. 58).

### Ecuación de Estado Politrópica

La EdE politrópica está dada por

$$P = K\rho^{1+\frac{1}{n}}, \tag{3}$$

donde $K$ es una constante que depende de las propiedades del gas (como su composición química y temperatura) y $n$ se llama el índice politrópico, un parámetro adimensional que determina el tipo de estructura del sistema estelar (**Chandrasekhar**, 1967, p. 84).

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

**Sobre las unidades de $K$.** A lo largo del manuscrito empleamos el sistema cgs (centímetro, gramo, segundo) para todas las magnitudes físicas. La constante $K$ tiene unidades que dependen del índice politrópico $n$, pues su dimensión queda determinada por la ecuación de estado (3). Igualando dimensionalmente $[P] = [K]\,[\rho]^{1+1/n}$ y usando $[P] = \mathrm{g\,cm^{-1}\,s^{-2}}$ y $[\rho] = \mathrm{g\,cm^{-3}}$, se obtiene

$$[K] = \mathrm{g}^{-1/n}\,\mathrm{cm}^{2+3/n}\,\mathrm{s}^{-2}. \tag{4}$$

En particular, para los índices que aparecen más adelante en este trabajo:

- $n = 1$: $[K] = \mathrm{cm^5\,g^{-1}\,s^{-2}}$,
- $n = 3/2$: $[K] = \mathrm{cm^4\,g^{-2/3}\,s^{-2}}$,
- $n = 2$: $[K] = \mathrm{cm^{7/2}\,g^{-1/2}\,s^{-2}}$,
- $n = 3$: $[K] = \mathrm{cm^3\,g^{-1/3}\,s^{-2}}$.

Los exponentes fraccionarios en gramos y centímetros son una característica intrínseca del modelo politrópico y no deben interpretarse como anomalías; provienen directamente de la potencia no entera $1 + 1/n$ en la ecuación de estado. Cuando se reportan valores numéricos de $K$ en el resto del manuscrito, las unidades correspondientes se indican explícitamente para evitar ambigüedad.

La ecuación (3) idealiza el comportamiento del gas al suponer que la presión en un punto dado depende únicamente de la densidad local. Aunque no incluye efectos como el transporte de calor, la radiación o la rotación, resulta notablemente conveniente para capturar las propiedades esenciales de muchos sistemas astrofísicos reales **Kippenhahn**, **Weigert** & **Weiss** (2012, Cap. 3); (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, Cap. 3) .

Cabe resaltar que distintos valores de $n$ permiten modelar diferentes tipos de materia estelar. El caso $n = 3/2$ corresponde a un gas de electrones no relativistas degenerados, como en enanas blancas de baja masa, y el caso $n = 3$ corresponde a un gas de electrones relativistas degenerados, como en enanas blancas masivas cercanas al límite de **Chandrasekhar** (1964). El caso especial $n = 5$ corresponde al límite donde la masa total del sistema diverge, por lo tanto, la solución se vuelve físicamente inviable (**Chandrasekhar**, 1967, p. 94); (**Tooper**, 1964). Mención aparte merece el caso $n = 0$, que no debe interpretarse a través de la Ec. (3) de manera literal ya que el exponente $1 + 1/n$ diverge y la EdE politrópica deja de tener sentido como tal, sino como el *límite formal de incompresibilidad* del modelo, en el que la densidad se mantiene constante en todo el volumen, $\rho(r) = \rho_c$, y la presión se determina exclusivamente por la condición de equilibrio hidrostático (1); este límite es útil como modelo idealizado de baja densidad o como caso de validación analítica de la formulación general.

Cabe mencionar que el valor del índice $n$ también afecta la concentración de masa en la estrella; a menor $n$, la densidad es más uniforme; a mayor $n$, la masa tiende a concentrarse más hacia el centro (**Chandrasekhar**, 1967; **Shapiro** & **Teukolsky**, 1983; **Tooper**, 1964).

### La ecuación de Lane-Emden

La ecuación de Lane-Emden representa una reducción universal del problema de equilibrio hidrostático a una forma simplificada que encapsula los aspectos esenciales del sistema. A través de sus soluciones adimensionales, es posible reconstruir magnitudes físicas como la masa total, el radio físico, el perfil de presión, su distribución de densidad y de masa. Además, esta ecuación permite analizar cómo varía la estructura interna de un objeto compacto al modificar el índice $n$, facilitando la comparación entre distintos tipos de objetos astrofísicos (**Chandrasekhar**, 1967, p. 88); (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, p. 62).

**Nota terminológica.** A lo largo de este trabajo empleamos la palabra *adimensional* para referirnos a magnitudes cuya *dimensión física* en el sentido del análisis dimensional es la unidad. Esto incluye situaciones distintas que conviene no confundir: (i) parámetros puros como el índice politrópico $n$, que no tienen unidades por su propia definición; (ii) cantidades reescaladas mediante el cociente con una escala característica del problema, como la variable radial $\xi = r/a$ y la función $\theta(\xi)$, relacionada con la densidad local mediante $\rho = \rho_c \theta^n$; y (iii) ecuaciones reformuladas íntegramente en términos de las variables y funciones del tipo (i)–(ii), de manera que ninguna constante con unidades aparece explícitamente en ellas. Las cantidades del tipo (ii) y (iii) son las que más adelante se denominarán *adimensionales* en este texto, y en particular $\xi$ y $\theta(\xi)$ son funciones de variable real cuyo dominio y codominio son numéricos puros.

El sistema original está compuesto por las ecuaciones (1)-(3), al incorporar la relación politrópica para la presión en la ecuación (1). Esta transformación permite un análisis más general y la comparación directa de las soluciones, facilitando la resolución del sistema y proporcionando una interpretación más clara de los resultados. Para simplificar aún más el análisis, se introduce el siguiente cambio a variables adimensionales,

$$\rho(r) = \rho_c \theta^n(\xi), \tag{5a}$$

$$r = a\xi, \tag{5b}$$

$$a^2 = \frac{(n+1)K\rho_c^{1/n-1}}{4\pi G}, \tag{5c}$$

donde $\rho_c$ es la densidad central, $\theta(\xi)$ es una función adimensional que representa la razón entre la densidad local y la densidad central, $\xi$ es la variable radial adimensional y $a$ es una escala de longitud que depende de la densidad de masa central y del índice politrópico $n$. Este cambio de variables fue introducido por **Emden** (1907) y permite obtener una forma universal de la ecuación para distintos valores de $n$.

La derivación de la ecuación de Lane-Emden a partir de las ecuaciones de conservación de masa (2) y la EdE (3) permite simplificar el sistema a una única ecuación diferencial adimensional. Esta ecuación encapsula la estructura del objeto estelar para un índice $n$ dado. El proceso de cambio de variables y reescalamiento [Ecs. (5)] involucrado en esta derivación ha sido ampliamente discutido en la literatura (**Chandrasekhar**, 1967, p. 87); (**Kippenhahn**, **Weigert**, & **Weiss**, 2012, p. 215); (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, p. 62); como resultado de este procedimiento, se obtiene la muy conocida ecuación,

$$\frac{1}{\xi^2}\frac{d}{d\xi}\left(\xi^2\frac{d\theta}{d\xi}\right) + \theta^n = 0. \tag{6}$$

La ecuación (6) se conoce como la ecuación de Lane-Emden de índice $n$. Esta es una ecuación diferencial ordinaria no lineal que describe el perfil de densidad adimensional de una estrella politrópica.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

La ecuación (6) está sujeta a las siguientes condiciones iniciales,

$$\theta(0) = 1, \quad \frac{d\theta}{d\xi}(0) = 0, \tag{7}$$

las cuales aseguran que la densidad es máxima en el centro ($\theta = 1 \Rightarrow \rho = \rho_c$) y que no hay dirección preferente en el origen, ya que el gradiente de densidad es nulo allí. El radio de la configuración está dado por la condición, $\theta(\xi_1) = 0$, considerando que la presión es nula en el exterior.

La existencia de soluciones analíticas para ciertos valores de $n$ ha sido discutida en (**Chandrasekhar**, 1967; **Emden**, 1907; **Schaffner-Bielich**, 2020). Estos valores corresponden a casos específicos donde la ecuación se puede resolver de manera exacta y cerrada, los cuales están dados por:

- En el caso $n = 0$, la solución analítica es $\theta_0(\xi) = 1 - \xi^2/6$, lo que describe un modelo con densidad constante. El radio en este caso se encuentra en $\xi_1 = \sqrt{6}$, lo que indica una distribución de masa homogénea a lo largo de la esfera. Este modelo es una aproximación útil en situaciones de baja densidad o para gases ideales donde no se esperan grandes variaciones en la presión.
- La solución para el caso $n = 1$ está dada por la función $\theta_1(\xi) = \sin(\xi)/\xi$, la cual corresponde a una estrella en equilibrio donde la presión es proporcional al cuadrado de la densidad. En este caso, el radio es $\xi_1 = \pi$. Este modelo es ampliamente utilizado para representar estrellas en su fase estable.
- Para el caso $n = 5$, la solución analítica es $\theta_5(\xi) = 1/(\sqrt{1 + \xi^2/3})$. Esta solución da lugar a una configuración con un radio infinito $\xi_1 = \infty$, pero con una masa finita. Este comportamiento indica que la densidad decae rápidamente con la distancia radial, mientras que el radio crece sin límite. Este modelo, aunque matemáticamente válido, se considera un caso límite, ya que para $n > 5$, la masa sigue aumentando sin restricción conforme el radio crece.

Sin embargo, para la mayoría de los valores astrofísicamente relevantes como $n = 3/2$ y $n = 3$, es necesario recurrir a métodos numéricos para obtener la función $\theta(\xi)$.

**Relación Masa - Radio**

En el estudio de objetos compactos, como las enanas blancas, la relación entre la masa total y el radio físico es una de las propiedades más importantes para entender su estructura y evolución; por ejemplo, se puede hacer análisis de estabilidad a partir del diagrama Masa-Radio $M(R)$ (**Chandrasekhar**, 1967, Cap. IV), (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, Cap. 3). En el marco de la teoría de politropas, es posible obtener expresiones explícitas para el radio físico $R$ a partir de la Ec. (5b) y la masa total $M$ a partir de la Ec. (2b) para una estrella en equilibrio hidroestático, en función del índice politrópico $n$ la densidad central $\rho_c$ y la constante $K$.

De la Ecs. (5a), (5b) y (5c) se obtiene que el radio máximo está dado por,

$$R = a\xi_1 = \left[\frac{(n+1)K}{4\pi G}\right]^{1/2} \rho_c^{(1-n)/2n} \xi_1, \tag{8}$$

donde $\xi_1$ es la primera raíz positiva de $\theta$. Un caso crítico ocurre para $n = 1$, donde se cumple que $\xi_1 = \pi$, y la expresión del radio se simplifica, dando lugar a la expresión

$$R = \left(\frac{K}{2G}\right)^{1/2}. \tag{9}$$

Este resultado es notable porque muestra que el radio no depende de la densidad central, lo cual es importante dentro de la familia de soluciones politrópicas. En este caso, el tamaño del objeto está determinado únicamente por la constante $K$, es decir, por la temperatura politrópica del sistema (**Chandrasekhar**, 1967, p. 97).

Por otro lado, la masa interior contenida en una esfera de radio físico $r$ se obtiene a partir de la ecuación de conservación de la masa (2), sustituyendo en ella las relaciones adimensionales del modelo politrópico. En primer lugar, el cambio de variable $r = a\xi$ [Ec. (5b)] implica $dr = a\,d\xi$ y $r^2 = a^2\xi^2$; en segundo lugar, la densidad se reemplaza por $\rho(r) = \rho_c\theta^n(\xi)$ [Ec. (5a)]. Sustituyendo ambas relaciones en la Ec. (2b) se obtiene

$$m(\xi) = 4\pi a^3\rho_c \int_0^{\xi_0} \xi^2\theta^n d\xi, \tag{10}$$

y usando Ec. (6) se llega a,

$$m(\xi) = 4\pi a^3\rho_c \left(-\xi^2\frac{d\theta}{d\xi}\right).$$

La masa total $M$ de la estrella se obtiene evaluando la expresión cerrada para $m(\xi)$ en $\xi = \xi_1$, donde $\xi_1$ es la primera raíz de $\theta(\xi)$:

$$M = m(\xi_1) = 4\pi a^3\rho_c \left(-\xi^2\frac{d\theta}{d\xi}\right)_{\xi=\xi_1}. \tag{11}$$

Para escribir $M$ explícitamente en función de $K$, $G$, $n$ y $\rho_c$, basta con sustituir la definición de $a$ dada por la Ec. (5c). De $a^2 = (n+1)K\rho_c^{1/n-1}/(4\pi G)$ se obtiene

$$a^3 = \left[\frac{(n+1)K}{4\pi G}\right]^{3/2} \rho_c^{3(1-n)/(2n)}. \tag{12}$$

Sustituyendo la Ec. (12) en la Ec. (11), y la expresión cerrada para la masa total queda entonces

$$M = 4\pi\left[\frac{(n+1)K}{4\pi G}\right]^{3/2} \rho_c^{(3-n)/(2n)} \left(-\xi^2\frac{d\theta}{d\xi}\right)_{\xi=\xi_1}, \tag{13}$$

donde la constante $\left(-\xi^2\,d\theta/d\xi\right)_{\xi=\xi_1}$ se obtiene tras resolver la Ec. (6).

Otro caso interesante ocurre para $n = 3$, el cual es particularmente importante en el estudio de las enanas blancas relativistas (**Beltracchi** & **Posada**, 2024a; **Posada**, **Hladík**, & **Stuchlík**, 2020; **Tooper**, 1964). La expresión para la masa total, Ec. (13), se simplifica y se vuelve independiente de la densidad central,

$$M = 4\pi\left[\frac{K}{\pi G}\right]^{3/2} \left(-\xi^2\frac{d\theta}{d\xi}\right)_{\xi=\xi_1}. \tag{14}$$

A partir de las expresiones analíticas para la masa total $M$ [Ec. (13)] y el radio $R$ [Ec. (8)] de una estrella, que dependen de la densidad central $\rho_c$, es posible eliminar esta variable algebraicamente para obtener una relación directa entre $M$ y $R$. Combinando ambas ecuaciones, se llega a la siguiente expresión general (**Chandrasekhar**, 1967, p. 97), (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, p. 62)

$$GM^{(n-1)/n}R^{(3-n)/n} = \frac{(n+1)K}{(4\pi)^{1/n}}\left[-\xi^{\frac{n+1}{n-1}}\frac{d\theta_n}{d\xi}\right]_{\xi=\xi_1}^{(n-1)/n}, \tag{15}$$

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

ó

$$M = 4\pi R^{(3-n)/(1-n)} \left[\frac{(n+1)K}{4\pi G}\right]^{n/(n-1)} \omega_n, \tag{16}$$

donde,

$$\omega_n = \left[-\xi^{\frac{n+1}{n-1}} \frac{d\theta_n}{d\xi}\right]_{\xi=\xi_1},$$

es una constante adimensional que depende exclusivamente del índice politrópico. Aquí $\theta_n \equiv \theta(\xi;n)$ denota explícitamente la solución de la ecuación de Lane-Emden (6) para un valor dado del índice $n$; el subíndice se introduce únicamente para enfatizar la dependencia funcional con $n$ en aquellas expresiones, como las Ecs. (15)–(16), en que conviven cantidades evaluadas en distintos índices. Los valores numéricos de $\omega_n$ para varios índices se reportan en la Tabla 1.

Esta formulación, Ecs. (15) ó (16), es particularmente útil porque establece una relación universal que no requiere conocer la densidad central para describir la configuración de una estrella. La Ec. (16) puede reescribirse compactamente como

$$M = \lambda\ R^{\frac{3-n}{1-n}}, \tag{17}$$

donde $\lambda$ es la constante de proporcionalidad que conecta la masa total $M$ con el radio físico $R$ en una configuración politrópica de índice $n$. Identificándola en la Ec. (16), su forma explícita es

$$\lambda = 4\pi \left[\frac{(n+1)K}{4\pi G}\right]^{n/(n-1)} \omega_n, \tag{18}$$

de modo que $\lambda$ depende de el índice politrópico $n$ y, a través de la solución de la Ec. (6), el valor numérico de $\omega_n$, la constante politrópica $K$ y la constante de gravitación universal $G$.

Por otro lado, la estabilidad de una configuración estelar descrita por un modelo politrópico está gobernada por el valor del índice $n$, a través de su relación con el exponente adiabático efectivo, $\Gamma = 1 + \frac{1}{n}$. La condición para la estabilidad es $\Gamma > \frac{4}{3}$, que se cumple para $n < 3$; fuera de este rango, la estructura se vuelve inestable (**Schaffner-Bielich**, 2020); (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, p. 61). Para $n > 3$ ($\Gamma < \frac{4}{3}$), la EdE proporciona una respuesta de presión insuficiente ante un aumento de densidad. Esto resulta en la incapacidad del sistema para restaurar el equilibrio hidrostático tras una compresión, conduciendo a una inestabilidad por colapso gravitatorio (**Schaffner-Bielich**, 2020); (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, p. 61).

### Constante $K$ a partir de la Masa y el Radio

En modelos estelares, la constante $K$ es un parámetro clave que depende de las propiedades internas y termodinámicas del material que forma el objeto, tales como la temperatura, la composición química y la naturaleza de las partículas que contribuyen a la presión interna (**Chandrasekhar**, 1967, Cap. IV); (**Kippenhahn**, **Weigert**, & **Weiss**, 2012); (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, Cap. 3) . Sin embargo, es posible reexpresar $K$ en términos de la masa $M$ y el radio $R$ de la estrella, proporcionando una forma más práctica de encontrar este parámetro, así, $K$ se obtiene a partir de las ecuaciones (15) ó (16) dando lugar a la expresión

$$K = N_n G M^{\frac{n-1}{n}} R^{\frac{3-n}{n}}, \tag{19}$$

donde $N_n$ es un coeficiente numérico dependiente únicamente del índice $n$ y de las características de la función $\theta$, el cual está dado por

$$N_n = \frac{1}{n+1}\left[\frac{4\pi}{\omega_n^{n-1}}\right]^{1/n}.$$

En la práctica, $K$ puede obtenerse a partir de modelos físicos más detallados que incluyan, por ejemplo, la teoría del gas ideal, la degeneración cuántica de electrones y otros efectos relevantes para la estructura estelar, en la forma general (**Chandrasekhar**, 1967, Cap. IV); (**Kippenhahn**, **Weigert**, & **Weiss**, 2012); (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, Cap. 3).

$$K = \frac{k_B T}{\mu m_H}, \tag{20}$$

donde $k_B$ es la constante de Boltzmann, $T$ es la temperatura efectiva del gas, $\mu$ es el peso molecular medio y $m_H$ es la masa del hidrógeno.

Mientras que el cálculo teórico de $K$ depende directamente de las propiedades físicas y termodinámicas del gas, la expresión (19) derivada a partir de la relación masa-radio permite obtener un valor de $K$ en función de las propiedades observables o calculadas de la estrella. Este enfoque es particularmente útil cuando no se cuenta con información detallada sobre la composición o temperatura interna, pero sí con datos observacionales, o simulaciones, de masa y radio.

## *Métodos*

Para estudiar la estructura interna de las politropas Newtonianas, se resolvió numéricamente la ecuación de Lane-Emden mediante el método Runge-Kutta de cuarto orden, implementado en una rutina en Python (**Python Software Foundation**, 2021). Este método de integración permite ajustar dinámicamente el tamaño del paso en función de la precisión requerida, garantizando así la confiabilidad de las soluciones (**Epperson**, 2013; **Kiusalaas**, 2013).

La integración se realizó en el intervalo $\xi \in [0, 173]$, utilizando una tolerancia relativa de $10^{-12}$ y una tolerancia absoluta de $10^{-14}$, con un millón de puntos de evaluación distribuidos uniformemente. Para determinar el borde de la configuración estelar, se implementó un evento de parada que detiene la integración cuando la función $\theta(\xi)$ se hace no positiva, definiendo así el radio adimensional $\xi_1$.

Las soluciones numéricas se obtuvieron para algunos índices politrópicos $n \in [0, 5]$, incluyendo los casos especiales $n = 0,\ 1,\ 5$, que poseen soluciones analíticas conocidas. La validación de los resultados mostró una excelente concordancia entre las soluciones numéricas y las analíticas en estos casos particulares, confirmando la precisión del método implementado.

Se realizó un análisis estadístico de la constante de proporción $K$ entre la masa y el radio para hallar la constante politrópica $K$ para diferentes índices $n$, examinando su dependencia funcional con los parámetros estructurales de las configuraciones. A partir de las relaciones masa-radio derivadas del modelo de Lane-Emden, se determinaron los valores de $K$ para cada índice politrópico mediante un procedimiento de ajuste que considera las condiciones físicas de las enanas blancas.

Por otro lado, se calculó numéricamente el momento de inercia para todo el rango de índices politrópicos mediante evaluación de la integral correspondiente. Los valores obtenidos se representaron gráficamente en función del índice $n$, observándose una curva suave y continua que coincide exactamente con los valores calculados analíticamente para $n = 0,\ 1,\ 5$.

Para obtener una expresión analítica aproximada del momento de inercia en función de $n$, se realizó un ajuste de curvas mediante varios métodos de aproximación. Se probaron modelos logarítmicos y polinomios de grados 2, 3 y 4, encontrándose que un polinomio de grado 4 proporciona el mejor ajuste a los resultados numéricos. Este modelo permite calcular el momento de inercia para cualquier índice politrópico dentro del rango estudiado

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

sin recurrir a métodos numéricos, manteniendo una precisión comparable con los resultados de integración directa.

# Resultados

## *Soluciones de la ecuación de Lane-Emden*

Los perfiles de densidad, obtenidos mediante la solución numérica de la ecuación de Lane-Emden para distintos índices politrópicos $n$, se presentan en la Fig. 2. La gráfica incluye tanto los casos con soluciones analíticas conocidas ($n = 0$, 1 y 5) como aquellos para los que solo es posible obtener soluciones numéricas. La ecuación (6) se puede expresar como un sistema de dos ecuaciones diferenciales de primer orden acopladas, definiendo la variable auxiliar $\phi = d\theta/d\xi$, lo que lleva a,

$$\frac{d\theta}{d\xi} = \phi, \tag{21a}$$

$$\frac{d\phi}{d\xi} = -\frac{2}{\xi}\phi - \theta^n, \tag{21b}$$

con las condiciones iniciales en las Ecs. (7).

### Singularidad en el origen

El término $-2\phi/\xi$ en la Ec. (21b) introduce una singularidad de tipo regular en $\xi = 0$ que impide iniciar la integración numérica directamente desde el origen. Para evitar este obstáculo, se construye una solución en serie de potencias en un entorno del origen que sirva como condición de arranque del esquema de Runge-Kutta a partir de un $\xi_{\text{inicial}}$ suficientemente pequeño. Ahora bien, antes de determinar los coeficientes de dicha serie conviene establecer una propiedad estructural de $\theta(\xi)$ que reduce sustancialmente el número de coeficientes independientes, la función $\theta$ es par alrededor del origen, de modo que su desarrollo de Taylor contiene exclusivamente potencias pares de $\xi$. El argumento se apoya en tres elementos.

En primer lugar, aunque la variable radial reescalada $\xi = r/a$ está definida sobre $\xi \geq 0$ por construcción, la simetría esférica del problema permite extender $\theta$ de forma natural a todo el eje real. En efecto, la densidad $\rho(r)$ en una configuración esféricamente simétrica depende únicamente de la magnitud de la coordenada radial, lo que motiva imponer $\theta(-\xi) = \theta(\xi)$ como definición de la extensión. En segundo lugar, esta paridad es compatible con la dinámica, la Ec. (6) es invariante bajo la reflexión $\xi \to -\xi$, pues el operador diferencial $\xi^{-2}\, d(\xi^2\, d/d\xi)/d\xi$ involucra dos derivadas y el factor $\xi^2$, de modo que los signos se compensan, y el término no lineal $\theta^n$ no depende explícitamente de $\xi$. Como consecuencia, si $\theta(\xi)$ es solución de la ecuación, la función reflejada $\theta(-\xi)$ también lo es. En tercer lugar, ambas soluciones satisfacen idénticas condiciones iniciales en el origen, $\theta(0) = 1$ y $\theta'(0) = 0$ [Ecs. (7)], de manera que el teorema de existencia y unicidad para problemas de valor inicial garantiza su coincidencia, $\theta(-\xi) = \theta(\xi)$ en todo el dominio de definición.

Establecida la paridad de $\theta$, se sigue por diferenciación término a término que las derivadas de orden impar se anulan en el origen, $\theta^{(2k+1)}(0) = 0$ para todo $k \in \mathbb{N}_0$. El desarrollo de Taylor de $\theta$ alrededor de $\xi = 0$ adopta entonces la forma

$$\theta(\xi) = 1 + \frac{\theta''(0)}{2}\,\xi^2 + \frac{\theta^{(4)}(0)}{24}\,\xi^4 + O(\xi^6),$$

en la que el término constante coincide con la condición de centralidad $\theta(0) = 1$ y los coeficientes restantes serán determinados a continuación mediante la sustitución de la serie en la propia ecuación de Lane-Emden.

$$\theta(\xi) = 1 + \frac{\theta''(0)}{2}\xi^2 + \frac{\theta^{(4)}(0)}{24}\xi^4 + O(\xi^6). \tag{22}$$

Para determinar los coeficientes, esta expansión se sustituye en la ecuación de Lane-Emden (6). El desarrollo de $\theta^n$ se obtiene mediante la expansión binomial,

$$\theta^n = (1+u)^n = 1 + nu + \frac{n(n-1)}{2}u^2 + O(u^3), \tag{23}$$

donde $u = \frac{\theta''(0)}{2}\xi^2 + \frac{\theta^{(4)}(0)}{24}\xi^4 + \cdots$. Igualando, orden por orden en $\xi$, los coeficientes de las series (22) y (23) tras sustituirlas en (6), se encuentra

$$\theta''(0) = -\frac{1}{3}, \qquad \theta^{(4)}(0) = \frac{n}{5}.$$

Por lo tanto, la expansión resultante es,

$$\theta(\xi) = 1 - \frac{1}{6}\xi^2 + \frac{n}{120}\xi^4 + O(\xi^6).$$

Así, el sistema de ecuaciones (21) en la región cerca al origen toma la forma

$$\frac{d\theta}{d\xi} = \phi, \tag{24a}$$

$$\frac{d\phi}{d\xi} = -\frac{1}{3} + \frac{n}{10}\xi^2 + O(\xi^4), \tag{24b}$$

lo que permite iniciar la integración numérica de manera estable evitando la singularidad.

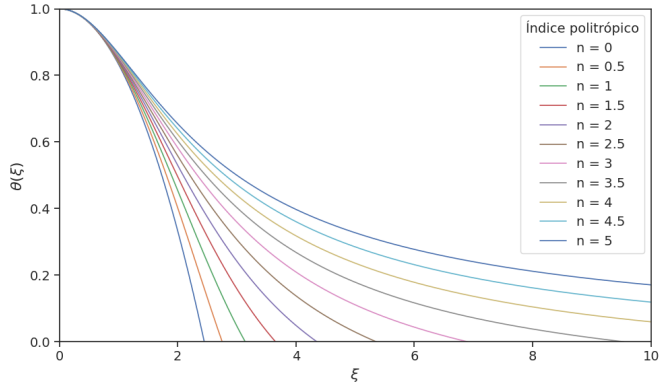



**Figura 2.** Perfiles de densidad derivados de la solución numérica de la ecuación de Lane-Emden para diferentes índices politrópicos $n$. Se incluyen tanto soluciones numéricas como analíticas donde están disponibles.

La Figura 2 presenta los perfiles de densidad adimensionales $\theta(\xi)$ obtenidos mediante la solución numérica de la ecuación de Lane-Emden para distintos índices politrópicos $n$. Los resultados muestran el comportamiento de la función $\theta(\xi)$ desde el origen hasta la superficie de la configuración, donde $\theta(\xi_1) = 0$. Se observa que todos los perfiles comparten características comunes, presentan su valor máximo en el centro $[\theta(0) = 1]$ y decrecen monótonamente hacia la superficie. Sin embargo, la forma específica de cada perfil muestra una dependencia con el índice politrópico $n$. Para valores bajos de $n$, la densidad disminuye gradualmente, resultando en configuraciones con una distribución de masa más extendida.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

En contraste, para valores mayores de $n$, los perfiles muestran una disminución más pronunciada cerca del centro, seguida de una cola extendida, lo que indica una mayor concentración de masa en las regiones centrales. Las soluciones también fueron comparadas con los resultados reportados en (**Chandrasekhar**, 1967, p. 96), lo que valida la precisión del método usado para los valores de $n$.

**Tabla 1.** Valores de constantes derivadas de las soluciones de la ecuación de Lane-Emden. El símbolo ..... indica que la cantidad correspondiente no está definida en ese índice porque su expresión analítica involucra un exponente singular de la forma $q/0$

| $n$ | $\xi_1$ | $-\xi^2(\frac{d\theta}{d\xi})$ | $\omega_n$ | $N_n$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 2.4493 | 4.8981 | 0.3333 | ..... |
| 0,5 | 2.7526 | 3.7886 | 0.0240 | 2.5240 |
| 1 | 3.1415 | 3.1416 | ..... | 0.6367 |
| 1,5 | 3.6536 | 2.7141 | 132.23666 | 0.4242 |
| 2 | 4.3529 | 2.4110 | 10.4949 | 0.3647 |
| 2.5 | 5.3552 | 2.1872 | 3.8266 | 0.3515 |
| 3 | 6.8968 | 2.0182 | 2.0182 | 0.3639 |
| 3.5 | 9.5358 | 1.8906 | 1.2044 | 0.4010 |
| 4 | 14.9714 | 1.7972 | 0.7292 | 0.4772 |
| 4.5 | 31.8364 | 1.7378 | 0.3944 | 0.6580 |
| 5 | $\infty$ | 1.7318 | 0 | $\infty$ |

## *Determinación inversa de la constante $K$ a partir de la relación masa–radio*

Como se mostró en la [Ec. (20)], la constante $K$ está fijada por la microfísica del fluido. Para enanas blancas, los dos casos canónicos son el régimen degenerado no relativista, asociado al índice $n = 3/2$,

$$K_{\rm nr} = \frac{(3\pi^2)^{2/3}}{5}\,\frac{\hbar^2}{m_e(\mu_e m_H)^{5/3}} \approx 3.16\times10^{12}\left(\frac{\mu_e}{2}\right)^{-5/3}\ {\rm cm}^4\,{\rm g}^{-2/3}\,{\rm s}^{-2}, \tag{25}$$

y el régimen degenerado ultra-relativista, asociado al índice $n = 3$,

$$K_{\rm ur} = \frac{(3\pi^2)^{1/3}}{4}\,\frac{\hbar c}{(\mu_e m_H)^{4/3}} \approx 4.94\times10^{14}\left(\frac{\mu_e}{2}\right)^{-4/3}\ {\rm cm}^3\,{\rm g}^{-1/3}\,{\rm s}^{-2}, \tag{26}$$

donde $\mu_e$ es el peso molecular medio por electrón (**Chandrasekhar**, 1967, p. 421). Una vez fijados $n$ y $K$, el modelo politrópico es una familia uniparamétrica en la densidad central $\rho_c$, cada $\rho_c$ genera un único par $(M,R)$ a través de las Ecs. (8) y (13), y la trayectoria $M(R)$ es la curva unidimensional dada por la Ec. (17). La pregunta complementaria que se aborda en esta subsección es la inversa; Dada una nube observacional $(M,R)$ típica de enanas blancas, ¿qué valores de $K$ resultan compatibles con un modelo politrópico de índice $n$? Esta inversión, definida punto a punto por la Ec. (19), ofrece un análisis de consistencia entre el modelo politrópico y los rangos observacionales y permite contrastar el resultado con los valores microfísicos canónicos $K_{\rm nr}$ y $K_{\rm ur}$.

Por otro lado, el estudio de la relación masa-radio en enanas blancas, bajo el marco de modelos politrópicos Newtonianos, permite explorar a partir de datos simulados y soluciones numéricas, la caracterización de la constante de proporcionalidad que conecta la masa total $M$ [Ec. (13)] y el radio $R$ [Ec. (8)], por lo que se generaron conjuntos de datos que abarcan el rango físico realista para enanas blancas, considerando masas entre 0.08 $M_\odot$ y 1.44 $M_\odot$

(el límite de Chandrasekhar) (**Chandrasekhar**, 1967; **Kippenhahn**, **Weigert**, & **Weiss**, 2012; **Shapiro** & **Teukolsky**, 1983), y radios entre 0.008 $R_\odot$ y 0.01 $R_\odot$, donde, $M_\odot$ es la masa solar y $R_\odot$ es el radio solar, valores que reflejan observaciones astronómicas y simulaciones previas (**Araujo** & **Chirenti**, 2011; **Chandrasekhar**, 1967; **Kippenhahn**, **Weigert**, & **Weiss**, 2012; **Shapiro** & **Teukolsky**, 1983).

Al calcular la constante de proporcionalidad $\lambda = M/R^{\frac{3-n}{1-n}}$, para cada combinación masa radio dentro del rango característico de una enana blanca, se obtuvieron resultados para distintos índices politrópicos. Sin embargo, es evidente a partir de la Ec. (16) que la constante $\lambda$ puede expresarse como Ec. (17).

Conviene precisar que la naturaleza de este muestreo es na secuencia politrópica con $(n,K)$ fijos traza la curva unidimensional $M \propto R^{(3-n)/(1-n)}$ y no una región rectangular en el plano $(M,R)$, de modo que el muestreo cartesiano cubre parejas que, en general, no corresponden a una secuencia de equilibrios politrópicos con un único $K$. La distribución resultante de $\lambda$ debe entonces interpretarse como la distribución marginal de $\lambda$ bajo medidas uniformes en los intervalos observacionales de $M$ y $R$, equivalentemente, como un análisis de sensibilidad de $K$ sobre la nube observacional, no como una probabilidad física sobre $K$.

Por ejemplo, para $n = 3$ es posible determinar el rango de valores de $K$ entre $7.131 \times 10^{13}$ cm$^3$ g$^{-1/3}$ s$^{-2}$, y $4.807 \times 10^{14}$ cm$^3$ g$^{-1/3}$ s$^{-2}$, calculado directamente a partir de la Ec. (14) para la configuración analizada, orden de magnitud similar a los usados por **Araujo** & **Chirenti** (2011), sin necesidad de recurrir a un tratamiento estadístico de la constante de proporcionalidad $\lambda$. De manera análoga, para el caso $n = 1$, se puede obtener un valor de $K$ entre $4.135 \times 10^{10}$ cm$^5$ g$^{-1}$ s$^{-2}$ y $6.461 \times 10^{10}$ cm$^5$ g$^{-1}$ s$^{-2}$ a partir de la Ec. (9); sin embargo, en estos dos límites, la masa y el radio permanecen constantes respectivamente.

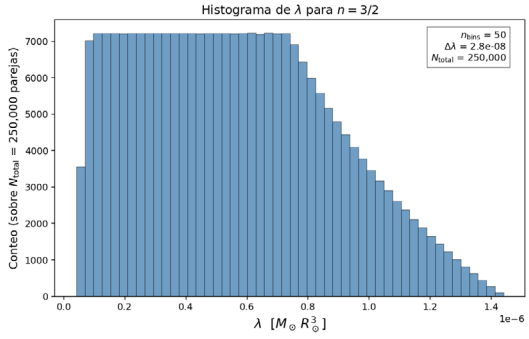



**Figura 3.** Histograma de la constante de proporcionalidad $\lambda = M/R^{(3-n)/(1-n)}$ calculada para $n = 3/2$ sobre las $N_{\text{total}} = 2{,}5 \times 10^5$ parejas $(M,R)$ generadas mediante el muestreo cartesiano descrito en el texto, con $M \in [0{,}08;\, 1{,}44]\, M_\odot$ y $R \in [0{,}008;\, 0{,}01]\, R_\odot$. El eje horizontal reporta los valores de $\lambda$ en unidades de $M_\odot R_\odot^3$ (las que corresponden a $n = 3/2$); el eje vertical reporta el conteo absoluto de parejas en cada barra.

Para el índice politrópico $n = 3/2$, la distribución de la constante de proporcionalidad $\lambda$ (Figura 3) presenta una forma asimétrica con un máximo pronunciado entre $0.1 \times 10^{-6}$ y $0.7 \times 10^{-6}$. Esta meseta indica los valores de $\lambda$ más frecuentes, los cuales están relacionados con la constante politrópica $K$ mediante la expresión (17).

Tomando los valores de $\lambda$ correspondientes a las frecuencias máximas del histograma, es posible determinar un rango representativo de $K$ entre $1.15 \times 10^{12}$ cm$^4$ g$^{-2/3}$ s$^{-2}$, y $2.20 \times 10^{12}$ cm$^4$ g$^{-2/3}$ s$^{-2}$, que caracteriza las configuraciones politrópicas más probables para este índice. Este rango concentra la mayor densidad de ocurrencias, lo que sugiere que los valores de $K$ obtenidos corresponden a combinaciones que dan valores de masa y radio dentro de los rangos observacionales aceptados para dichas configuraciones. La

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

forma decreciente del histograma hacia valores mayores de $\lambda$, y por tanto de $K$, indica que configuraciones con constantes más altas son menos probables o menos representativas del equilibrio hidrostático para los valores de masa y radio usados para enanas blancas.

Es importante aclarar, en consonancia con la observación anterior, que dicho rango no debe leerse como la distribución de probabilidad de $K$, sino como el conjunto de valores que un modelo politrópico de índice $n = 3/2$ requeriría para reproducir las parejas $(M,R)$ más densas del rectángulo observacional bajo medida uniforme.

Una vez estimados los valores de la constante $K$ a partir de la constante de proporcionalidad $\lambda$, se emplearon las ecuaciones para la masa total $M$ [Ec. (13)] y el radio $R$ [Ec. (8)] derivadas de la ecuación de Lane–Emden para el índice politrópico $n = 3/2$ la masa y el radio dependientes de $\rho_c$ tomando valores entre $10^5$ y $2.35 \times 10^7$ g cm$^{-3}$ (**Shapiro** & **Teukolsky**, 1983, p. 150).

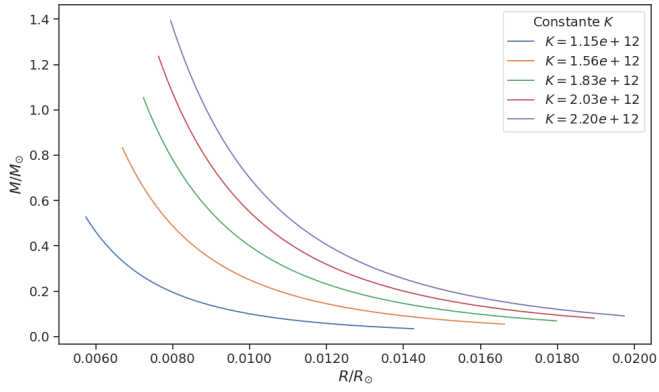



**Figura 4.** Relación masa–radio para $n = 3/2$ construida a partir de los valores de $K$ compatibles con la moda de la Figura 3. Las curvas se obtienen variando $\rho_c$ con $K$ fijo, lo que sí define una secuencia politrópica auténtica.

La Figura 4 muestra el comportamiento inverso entre masa y radio característico de las enanas blancas modeladas como politropas no relativistas. La masa está medida en unidades de la masa solar, y el radio en unidades del radio solar. Observe que a medida que el radio disminuye, la masa aumenta. El desplazamiento de las curvas hacia masas mayores con el incremento de $K$ indica que una constante politrópica más alta corresponde a una EdE más rígida, es decir, una mayor presión para una misma densidad central, dando lugar a representaciones y configuraciones similares a las expuestas por (**Shojai *et al.***, 2015).

Para el índice politrópico $n = 2$, la distribución de la constante de proporcionalidad $\lambda$, mostrada en la Figura 5, muestra un comportamiento notablemente diferente al caso $n = 3/2$. a diferencia del indice 3/2 acá se observa una distribución más amplia con máxima frecuencia en la región de $\lambda \approx 0.001 - 0.011$. Esta mayor dispersión en los valores de $\lambda$ sugiere que para $n = 2$ existe un rango más amplio de constantes $K$ comprendido entre $7.24 \times 10^{12}$ cm$^{7/2}$ g$^{-1/2}$ s$^{-2}$, y $3.09 \times 10^{13}$ cm$^{7/2}$ g$^{-1/2}$ s$^{-2}$, que pueden dar lugar a configuraciones consistentes con los valores aceptados de masa y radio. La presencia de múltiples valores de $\lambda$ con frecuencias significativas indica que, a diferencia del caso $n = 3/2$ donde existía una configuración claramente preferente, para $n = 2$ hay varias combinaciones Masa-Radio que son igualmente probables. Finalmente, la Figura 5 sugiere que configuraciones con constantes $K$ más altas son relativamente más frecuentes que en el caso $n = 3/2$.

La relación entre la masa y el radio para el índice politrópico $n = 2$, presentada en la Figura 6, muestra que a medida que el radio de la configuración disminuye, la masa total aumenta. Por otro lado, las distintas curvas correspondientes a valores de la constante politrópica

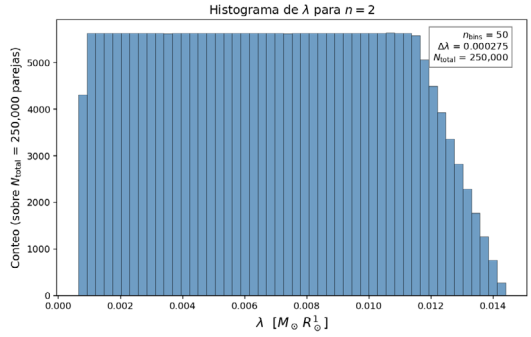



**Figura 5.** Histograma de $\lambda = M/R^{(3-n)/(1-n)}$ para $n = 2$, construido bajo el mismo muestreo que la Figura 3 ($N_{\text{total}} = 2{,}5 \times 10^5$ parejas $(M,R)$ en el mismo rectángulo observacional). El eje horizontal reporta los valores de $\lambda$ en unidades de $M_\odot R_\odot$ (las que corresponden a $n = 2$); el eje vertical reporta el conteo absoluto de parejas en cada barra. La mayor dispersión respecto al caso $n = 3/2$ refleja la dependencia funcional de $\lambda(M,R)$ propia de este índice (los exponentes hacen que $\lambda$ varíe sobre un rango más amplio al barrer el rectángulo).

$K$ en el rango de $10^{13}$ en unidades cgs, muestran cómo este parámetro escala la relación fundamental Masa–Radio. Valores mayores de $K$ permiten configuraciones con mayor masa para un radio dado.

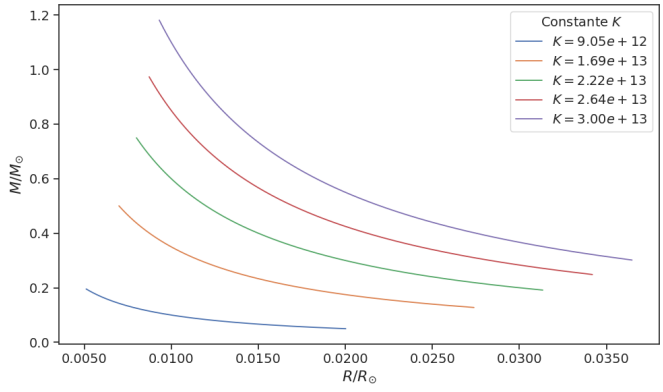



**Figura 6.** Relación masa–radio obtenida para el índice politrópico $n = 2$ utilizando los valores de $K$ calculados a partir de la constante de proporcionalidad $\lambda$.

Los rangos de $K$ obtenidos por inversión pueden contrastarse cuantitativamente con los valores microfísicos canónicos $K_{\text{nr}}$ y $K_{\text{ur}}$ introducidos al inicio de esta subsección. Para $n = 3$, el rango $K \in [0.71, 4.81] \times 10^{14}$ cgs calculado vía la Ec. (14) se aproxima al valor canónico $K_{\text{ur}} \approx 4.94 \times 10^{14}\,(\mu_e/2)^{-4/3}$ cgs, lo que confirma la consistencia del modelo politrópico ultra-relativista con los rangos observacionales adoptados. Para $n = 3/2$, el rango $K \in [1.15, 2.20] \times 10^{12}$ cgs extraído de la moda del histograma muestra el mismo orden de magnitud de $K_{\text{nr}}$.

Por último, las incertidumbres sobre $K$ inducidas por las incertidumbres observacionales $\sigma_M$ y $\sigma_R$ se obtienen por propagación estándar a partir de la Ec. (19),

$$\frac{\sigma_K}{K} = \sqrt{\left(\frac{n-1}{n}\right)^2 \left(\frac{\sigma_M}{M}\right)^2 + \left(\frac{3-n}{n}\right)^2 \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2}. \tag{27}$$

La Ec. (27) muestra que la sensibilidad de $K$ a las incertidumbres observacionales depende

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

del índice politrópico: para $n \to 1$, $K$ se vuelve insensible a $\sigma_M$; para $n \to 3$, insensible a $\sigma_R$. Por ejemplo, incertidumbres relativas del 10% en $M$ y 5% en $R$ producen $\sigma_K/K \approx 6\%$ para $n = 3/2$ y $\sigma_K/K \approx 7\%$.

## *Momento de Inercia en Modelos Politrópicos*

El momento de inercia $I$ es una cantidad fundamental que caracteriza la distribución de masa en un cuerpo en rotación. Para estrellas compactas como las enanas blancas, su cálculo permite modelar la evolución rotacional y estimar la energía cinética almacenada (**Hartle**, 1967; **Horedt**, 2004; **Ravenhall** & **Pethick**, 1994; **Shapiro** & **Teukolsky**, 1983).

Para una configuración esféricamente simétrica, el momento de inercia se define como:

$$I = \frac{8\pi}{3} \int_0^R \rho(r) r^4 dr, \tag{28}$$

donde $R$ es el radio total y $\rho(r)$ es el perfil de densidad.

En el marco del modelo politrópico, donde la estructura interna está determinada por la solución $\theta(\xi)$ de la ecuación de Lane-Emden (6), es posible expresar el momento de inercia en forma adimensional. Sustituyendo las relaciones de escala del modelo [Ec. (5)] en la ecuación (28), se obtiene:

$$I = \frac{8\pi}{3} \rho_c a^5 \int_0^{\xi_1} \theta^n \xi^4 d\xi. \tag{29}$$

Combinando esta expresión con las ecuaciones para la masa total $M$ [Ec. (13)] y el radio $R$ [Ec. (8)] de la politropa, se deduce que el momento de inercia puede escribirse en la forma normalizada mediante manipulaciones algebraicas de las ecuaciones y puede expresarse en términos de la solución de Lane-Emden como,

$$\tilde{I} \equiv \frac{I}{MR^2} = \frac{2}{3} \frac{\int_0^{\xi_1} \xi^4 \theta^n d\xi}{\xi_1^2 \left( -\xi^2 \frac{d\theta}{d\xi} \right)_{\xi=\xi_1}}. \tag{30}$$

Esta expresión final permite calcular el momento de inercia, directamente a partir de las soluciones numéricas de la ecuación de Lane-Emden [Ec. (6)]. Sin embargo, es importante destacar que para la Eqc. (30) existen soluciones analíticas exactas para tres casos particulares del índice politrópico, a saber, $n = 0, 1, 5$, para los cuales disponemos de expresiones analíticas cerradas que facilitan la validación de los resultados numéricos.

El valor $n = 0$ corresponde a una configuración de densidad constante, cuyo momento de inercia da el valor bien conocido $\tilde{I} = 2/5$. Para $n = 1$, el momento de inercia normalizado se calcula como $\tilde{I} = 2(\pi^2 - 6)/3\pi^2 \approx 0.261$, lo cual coincide con el resultado reportado por **Beltracchi** & **Posada** (2025). En el límite $n = 5$, caracterizado por la solución $\theta_5(\xi) = (1 + \xi^2/3)^{-1/2}$ con radio infinito, también es posible calcular el momento de inercia normalizado. Sin embargo, este caso requiere un tratamiento particular debido a la naturaleza asintótica de la configuración. En este contexto, la integral relevante resulta ser,

$$\tilde{I} = \lim_{\xi_1 \to \infty} \frac{\int_0^{\xi_1} \xi^4 \left[ (1 + \xi^2/3)^{-5/2} \right] d\xi}{\xi_1^2 \sqrt{3}}. \tag{31}$$

Resolviendo (31), se obtiene,

$$\tilde{I} = \lim_{\xi_1 \to \infty} \frac{9\sqrt{3} \left( \ln \left| \sqrt{3 + \xi_1^2} + \xi_1 \right| - \frac{1}{2} \ln(3) - \frac{4}{3} \right)}{\xi_1^2 \sqrt{3}}. \tag{32}$$

Observe que la ecuación (32) tiende a cero, lo que muestra que en configuraciones cuando el indice politrópico $n \to 5$, la contribución al momento de inercia disminuye, lo cual es coherente con la solución asintótica, donde el radio tiende a infinito.

Para valores del índice politrópico diferentes a $n = 0, 1, 5$, la evaluación debe realizarse mediante métodos numéricos, resolviendo primero la ecuación de Lane-Emden (6) y posteriormente integrando numéricamente la expresión (30).

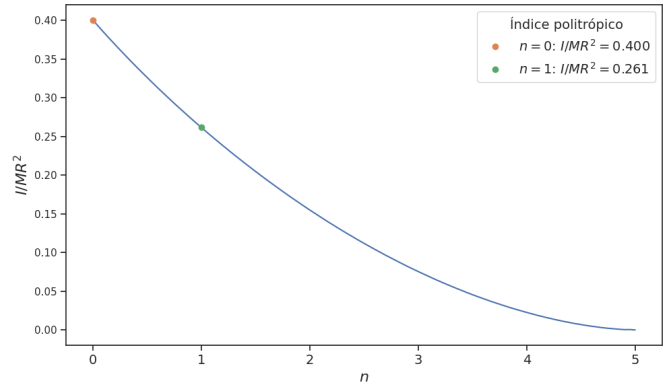



**Figura 7.** Momento de inercia normalizado $\tilde{I}$, en función del índice politrópico $n$, para configuraciones politrópicas Newtonianas. Los puntos marcados en color indican los casos $n = 0, 1$ con solución analítica conocida.

La Figura 7 muestra la variación del momento de inercia normalizado $\tilde{I}$ en función del índice politrópico $n$. La curva muestra los resultados obtenidos numéricamente, además, los puntos indicados en color, corresponden a los casos $n = 0, 1$ los cuales tienen solución analítica. Observe que el momento de inercia se aproxima a 0 cuando $n \to 5$.

Para complementar los resultados obtenidos mediante la resolución numérica de la ecuación de Lane-Emden (6), se utilizó un método de ajuste de curvas para encontrar una relación analítica que determine el momento de inercia en función del índice politrópico $n$. La figura 8 muestra la comparación entre la solución numérica para el momento de inercia normalizado $\tilde{I}$ y varias aproximaciones utilizando regresiones. En el gráfico principal, se presentan diferentes modelos de regresión; logarítmica (línea punteada roja), polinómica de grado 2 (línea verde a rayas), polinómica de grado 3 (línea azul punteada) y polinómica de grado 4 (línea morada punteada). Los círculos azules indican los puntos calculados por la solución analítica. El error absoluto de cada aproximación se muestra en el gráfico inferior, donde se observa que las regresiones de grado 3 y grado 4 presentan el menor error en comparación con la regresión logarítmica y la de grado 2. Esto indica que las aproximaciones polinómicas de mayor grado son más precisas, particularmente para valores más altos de $n$.

Esta aproximación permite estimar $\tilde{I}$ sin necesidad de resolver numéricamente las Ecs. (6) y (30) para cada índice $n$ y permite disponer de expresiones para aproximar $\tilde{I}$. Considerando que el polinomio de grado 4 brinda el menor error absoluto, aquí sugerimos que el momento de inercia normalizado, en función del índice politrópico $n$, de politropas Newtonianas puede aproximarse analíticamente a través de la expresión

$$\tilde{I} \approx 0.0001776n^4 - 0.0019n^3 + 0.0203n^2 - 0.1570n + 0.3997. \tag{33}$$

La expresión polinómica propuesta reproduce bastante bien los casos analíticos conocidos, por ejemplo, para $n = 0$ devuelve $\tilde{I} = 0.3997$, lo cual es cercano a $2/5$; para $n = 1$, ec. (33) arroja $\tilde{I} = 0.261$, el cual se aproxima muy bien al valor exacto $2(\pi^2 - 6)/3\pi^2$.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

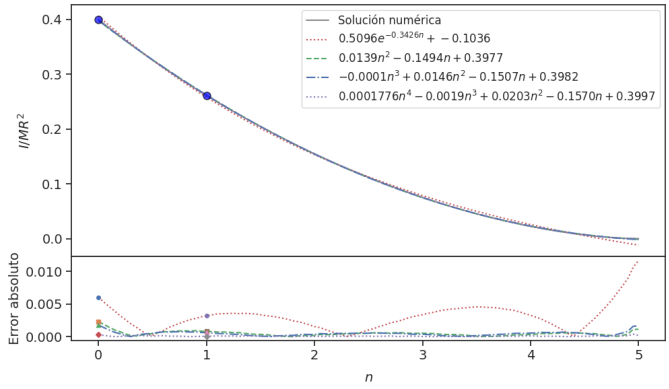



**Figura 8.** Comparación entre la solución numérica y las regresiones logarítmica y polinómicas (de grado 2, 3 y 4) para el momento de inercia normalizado, en función del índice politrópico $n$.

**Bondad del ajuste y validación cuantitativa.**

Para evaluar de manera rigurosa la calidad del ajuste polinómico de la Ec. (33), se reportan a continuación los detalles metodológicos del procedimiento numérico y las métricas de error asociadas. La malla de evaluación en el índice politrópico está conformada por

$$n_k = 0, 0.05, 0.10, \ldots, 5.00, \qquad k = 0, 1, \ldots, 100, \tag{34}$$

es decir, $N = 101$ puntos uniformemente espaciados con paso $\Delta n = 0.05$ en el intervalo $n \in [0, 5]$. Para cada $n_k$ se resolvió la Ec. (6) mediante el esquema descrito en la sección de Métodos y se evaluó $\tilde{I}(n_k)$ por integración numérica de la Ec. (30). La regresión polinómica se realizó por mínimos cuadrados ordinarios, equivalente a la minimización del residuo en norma $L^2$,

$$\min_{\{a_j\}} \sum_{k=0}^{N-1} \left( \tilde{I}(n_k) - \sum_{j=0}^{d} a_j n_k^j \right)^2, \tag{35}$$

para grados $d = 2, 3, 4$. Una alternativa habría sido el ajuste minimax (norma $L^\infty$), que minimiza el error máximo absoluto en lugar del cuadrático medio; sin embargo, dado que el objetivo es disponer de una expresión analítica de uso general en $n \in [0, 5)$, el ajuste $L^2$ resulta más representativo del comportamiento global de $\tilde{I}(n)$ y es el procedimiento implementado por la rutina `numpy.polyfit` (**Python Software Foundation**, 2021).

Para cuantificar la calidad de los distintos ajustes se adopta las siguientes métricas, todas evaluadas sobre la malla (34): el coeficiente de determinación $R^2$; el error cuadrático medio $\mathrm{RMSE} = \left( N^{-1} \sum_k r_k^2 \right)^{1/2}$, donde $r_k = \tilde{I}(n_k) - \sum_j a_j n_k^j$; el error absoluto medio $\mathrm{MAE} = N^{-1} \sum_k |r_k|$; y el error absoluto máximo $\|r\|_\infty = \max_k |r_k|$. Los resultados se resumen en la Tabla 3.

**Tabla 2.** Métricas de bondad del ajuste polinómico de $\tilde{I}(n)$ por mínimos cuadrados (norma $L^2$) sobre la malla de $N = 101$ puntos definida por la Ec. (34). Los errores relativos se reportan en la región $\tilde{I} > 0.01$, donde la división por valores cercanos a cero no infla artificialmente la métrica.

| Modelo | $R^2$ | RMSE | MAE | $\|r\|_\infty$ |
|---|---|---|---|---|
| Polinomio grado 2 | 0.99997 | $6.0 \times 10^{-4}$ | $4.8 \times 10^{-4}$ | $2.3 \times 10^{-3}$ |
| Polinomio grado 3 | 0.99998 | $5.6 \times 10^{-4}$ | $4.6 \times 10^{-4}$ | $1.8 \times 10^{-3}$ |
| Polinomio grado 4 (Ec. (33)) | 0.99982 | $1.6 \times 10^{-3}$ | $1.1 \times 10^{-3}$ | $4.4 \times 10^{-3}$ |
| Polinomio grado 4 (sin redondeo) | 0.999999 | $9.7 \times 10^{-5}$ | $7.9 \times 10^{-5}$ | $3.8 \times 10^{-4}$ |

La Figura 9 muestra los residuos $r_k$ en términos absolutos (panel izquierdo) y en términos relativos $|r_k/\tilde{I}(n_k)|$ (panel derecho, escala logarítmica). Dos comportamientos son notables. Primero, los residuos absolutos del polinomio en la Ec. (33) se mantienen por debajo de $\sim 5\times10^{-4}$ en $n\in[0,2]$, pero crecen monótonamente hasta $\sim 4\times10^{-3}$ cerca de $n=5$. Este crecimiento es consecuencia exclusiva del redondeo de los coeficientes a cuatro cifras, el polinomio de grado 4 con coeficientes sin redondear (curva verde) mantiene el residuo absoluto por debajo de $\sim 1\times10^{-4}$ en todo el rango y segundo, el error relativo del polinomio Ec. (33) se mantiene por debajo del 1% en $n\in[0,3]$ y por debajo del 2.5% en $n\in[0,4]$, valores que cubren con holgura los regímenes de mayor relevancia astrofísica ($n=3/2$ y $n=3$).

**Tabla 3.** Errores relativos del ajuste polinómico de $\tilde{I}(n)$ por mínimos cuadrados (norma $L^2$) sobre la malla de $N=101$ puntos definida por la Ec. (34). Los errores relativos se reportan en la región $\tilde{I}>0.01$ (es decir, $n\leq 4.35$), donde la división por valores cercanos a cero no infla artificialmente la métrica.

| Modelo | Error rel. medio (%) | Error rel. máx. (%) |
|---|---|---|
| Polinomio grado 2 | 0.61 | 5.08 |
| Polinomio grado 3 | 0.71 | 5.70 |
| Polinomio grado 4 (Ec. (33)) | 2.46 | 25.24 |
| Polinomio grado 4 (sin redondeo) | 0.09 | 0.54 |

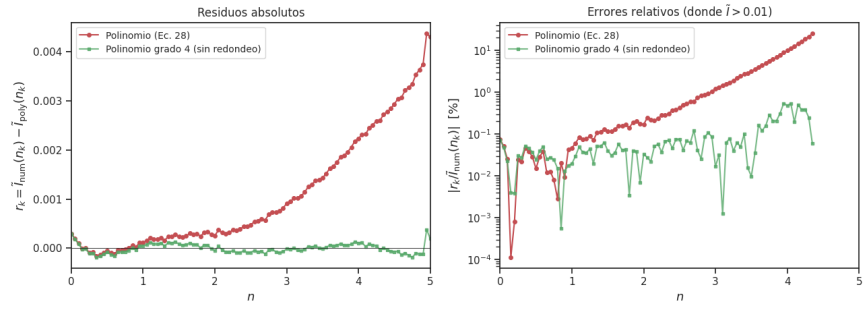



**Figura 9.** Residuos del ajuste polinómico de $\tilde{I}(n)$: panel izquierdo, residuos absolutos $r_k = \tilde{I}_{\rm num}(n_k) - \tilde{I}_{\rm poly}(n_k)$; panel derecho, errores relativos $|r_k/\tilde{I}_{\rm num}(n_k)|$ en escala logarítmica, evaluados solo en la región donde $\tilde{I}>0.01$. Se comparan el polinomio publicado en la Ec. (33) (rojo) y el ajuste de grado 4 sin redondear (verde).

La Figura 10 muestra los residuos absolutos de los polinomios de grados 2, 3 y 4 (sin redondeo de coeficientes) en escala logarítmica, junto con el polinomio Ec. (33) de grado 4 como referencia. Se observa con claridad que los polinomios de grado 2 y 3 producen residuos típicamente entre $10^{-4}$ y $10^{-3}$ sobre todo el intervalo, mientras que los polinomios de grado 4 alcanzan residuos un orden de magnitud menor (típicamente $10^{-5}$ a $10^{-4}$). Esto justifica la elección del polinomio de grado 4 como expresión final para $\tilde{I}(n)$.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):851-872, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3578

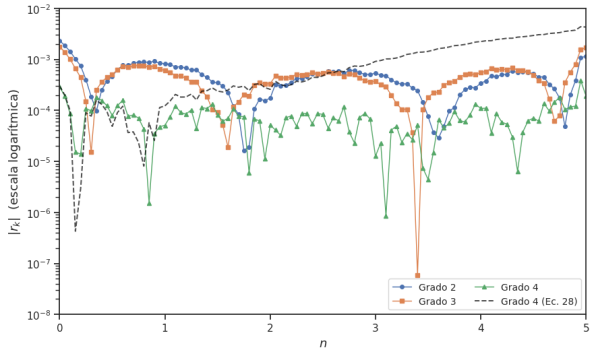



**Figura 10.** Residuos absolutos $|r_k|$ de los ajustes polinómicos de grado 2, 3, 4 y 5 (todos sin redondeo de coeficientes), junto con el polinomio publicado de grado 4 (línea discontinua negra), en escala logarítmica. Se aprecia la mejora de un orden de magnitud al pasar de grado 3 a grado 4, y el carácter marginal del salto a grado 5.

Finalmente, si se desea optimizar la precisión del ajuste sin renunciar a la forma polinómica de grado 4, basta con utilizar los coeficientes con mayor número de cifras significativas:

$$\begin{aligned}\tilde{I}(n) \approx\ & 1.7782\times10^{-4}\,n^4 - 1.8681\times10^{-3}\,n^3 + 2.0291\times10^{-2}\,n^2 \\ & - 1.5696\times10^{-1}\,n + 3.9971\times10^{-1},\end{aligned} \tag{36}$$

con cuyo uso el error absoluto máximo en la malla (34) se reduce a $3.8\times10^{-4}$ y el error relativo máximo en $\tilde{I} > 0.01$ es inferior al 0.6%. Esta expresión se recomienda en aplicaciones que requieran precisión por debajo del 1% en todo el rango $n \in [0, 4.9]$.

## Discusión

Este trabajo ha proporcionado un análisis de algunas de las propiedades estructurales e integrales de las politropas Newtonianas, enfocándose en la resolución numérica de la ecuación de Lane-Emden y el estudio de propiedades clave como la relación masa-radio y el momento de inercia. A lo largo del estudio, los resultados obtenidos se validaron mediante la comparación con soluciones analíticas conocidas, lo que corroboró la precisión del método implementado.

Uno de los aspectos más relevantes de este trabajo fue el cálculo de la constante politrópica $K$, que conecta la masa y el radio de las estrellas. Este parámetro, dependiente de las características físicas del sistema, fue determinado mediante un ajuste estadístico basado en las condiciones observacionales de las enanas blancas. La relación masa-radio resultó ser fundamental para comprender cómo las configuraciones estelares varían según el índice politrópico $n$ y cómo la constante $K$ influye en la distribución de masa y presión dentro de las estrellas.

El análisis del momento de inercia en el modelo politrópico, utilizando regresiones, permitió desarrollar una aproximación analítica que evita la necesidad de cálculos numéricos extensivos. La regresión polinómica de grado 4 resultó ser una excelente aproximación para modelar el momento de inercia normalizado en función de $n$, proporcionando una expresión para este parámetro, lo que simplifica el cálculo sin sacrificar la exactitud.

En este trabajo, nos centramos en configuraciones politrópicas Newtonianas isotrópicas, pero se reconoce que este enfoque puede extenderse a modelos más complejos que incluyan anisotropía, como los estudiados por **Beltracchi** & **Posada** (2024a) y **Beltracchi** & **Posada**

(2025) en el caso relativista. La inclusión de anisotropía podría tener un impacto significativo en las propiedades obtenidas, lo que abre la puerta a futuras investigaciones.

## Agradecimientos

Al profesor Camilo Posada Ph.D., por su constante apoyo, disposición y acompañamiento durante todo el desarrollo de este trabajo. Su guía ha sido fundamental en cada etapa, y su paciencia y dedicación me han permitido avanzar y mejorar en mi investigación. Aprecio profundamente todo el tiempo que me ha brindado y su invaluable ayuda.

## Contribución de los autores

JC: Escritura del documento, participación en reuniones de discusión y análisis, redacción del artículo, investigación.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

## References

**Araujo, F. M., & Chirenti, C. B. M. H.** (2011) Newtonian and relativistic polytropes. *4th School on Cosmic Rays and Astrophysics*.

**Beltracchi, P., & Posada, C.** (2024a) Slowly rotating anisotropic relativistic stars. *Phys. Rev. D*, *110*(2). https://doi.org/10.1103/physrevd.110.024052

**Beltracchi, P., & Posada, C.** (2024b) Slowly rotating ultra-compact Schwarzschild star in the gravastar limit. *Class. Quantum Grav.*, *41*(4), 045001. https://doi.org/10.1088/1361-6382/ad1a52

**Beltracchi, P., & Posada, C.** (2025) Slowly rotating covariant anisotropic objects. *Phys. Rev. D*, *112*(8), 084046. https://doi.org/10.1103/71cv-lnzk

**Bludman, S. A.** (1973) Stability of general-relativistic polytropes. *Astrophys. J*, *183*, 637–648. https://doi.org/10.1086/152253

**Breu, C., & Rezzolla, L.** (2016) Maximum mass, moment of inertia and compactness of relativistic stars. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, *459*(1), 646–656. https://doi.org/10.1093/mnras/stw575

**Chandrasekhar, S.** (1964) Dynamical Instability of Gaseous Masses Approaching the Schwarzschild Limit in General Relativity. *Phys. Rev. Lett.*, *12*, 114–116. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.12.114

**Chandrasekhar, S., & Miller, J. C.** (1974) On slowly rotating homogeneous masses in general relativity. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, *167*, 63–80. https://doi.org/10.1093/mnras/167.1.63

**Chandrasekhar, S.** (1967) *An introduction to the study of stellar structure*. Dover Publications.

**Eddington, A. S.** (1920) The internal constitution of the stars. *The Scientific Monthly*, *11*(4), 297–303. Retrieved May 4, 2025, from http://www.jstor.org/stable/6491

**Emden, R.** (1907) *Gaskugeln: Anwendungen der mechanischen wärmetheorie auf kosmologische und meteorologische probleme (gas spheres: Applications of the mechanical theory of heat to cosmological and meteorological problems)*. B.G. Teubner.

**Epperson, J. F.** (2013) *An introduction to numerical methods and analysis* (2nd ed.). Wiley.

**Hartle, J. B.** (1967) Slowly rotating relativistic stars. 1. Equations of structure. *Astrophys. J.*, *150*, 1005–1029. https://doi.org/10.1086/149400

**Hartle, J. B., & Thorne, K. S.** (1968) Slowly Rotating Relativistic Stars. II. Models for Neutron Stars and Supermassive Stars. *Astrophys. J.*, *153*, 807. https://doi.org/10.1086/149707

**Hladík, J., Posada, C., & Stuchlík, Z.** (2020) Radial instability of trapping polytropic spheres. *Int. J. Mod. Phys. D*, *29*(05), 2050030. https://doi.org/10.1142/s0218271820500303

**Horedt, G. P.** (2004) *Polytropes : Applications in astrophysics and related fields*. Kluwer Academic Publishers.

**Horedt, G. P.** (2013) Early Evolution of Prestellar Cores. *Astrophys. J*, *773*(2), Article 131, 131. https://doi.org/10.1088/0004-637X/773/2/131

**Jiang, N., & Yagi, K.** (2020) Analytic I-Love-C relations for realistic neutron stars. *Phys. Rev. D*, *101*(12), 124006. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.124006

**Kippenhahn, R., Weigert, A., & Weiss, A.** (2012) *Stellar structure and evolution*. Springer.

**Kiusalaas, J.** (2013) *Numerical methods in engineering with python 3* (3rd ed.). Cambridge University Press.

**Lane, H. J.** (1870) On the theoretical temperature of the sun, under the hypothesis of a gaseous mass maintaining its volume by its internal heat, and depending on the laws of gases as known to terrestrial experiment. *American Journal of Science and Arts*, *s2-50*, 57–74. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131102972

**Lopes, I., & Panotopoulos, G.** (2019) Mass-to-radius profiles of newtonian polytropic spheres: Low-mass main-sequence stars in palatini gravity versus dark-matter-admixed low-mass stars in general relativity. *Phys. Rev. D*, *99*, 103013. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.103013

**Posada, C., Hladík, J., & Stuchlík, Z.** (2020) Dynamical instability of polytropic spheres in spacetimes with a cosmological constant. *Phys. Rev. D*, *102*, 024056. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.024056

**Python Software Foundation**. (2021) Python (versión 3.x). Retrieved November 11, 2025, from https://www.python.org/

**Raposo, G., Pani, P., Bezares, M., Palenzuela, C., & Cardoso, V.** (2019) Anisotropic stars as ultracompact objects in General Relativity. *Phys. Rev. D*, *99*(10), 104072. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.104072

**Ravenhall, D. G., & Pethick, C. J.** (1994) Neutron Star Moments of Inertia. *Astrophys. J.*, *424*, 846. https://doi.org/10.1086/173935

**Schaffner-Bielich, J.** (2020) *Compact star physics*. Cambridge University Press.

**Shapiro, S. L., & Teukolsky, S. A.** (1983) *Black holes, white dwarfs and neutron stars. The physics of compact objects*. Wiley, VCH. https://doi.org/10.1002/9783527617661

**Shojai, F., Fazel, M. R., Stepanian, A., & Kohandel, M.** (2015) On the Newtonian Anisotropic Configurations. *Eur. Phys. J. C*, *75*(6), 250. https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3478-6

**Stuchlík, Z., Hledík, S., & Novotný, J.** (2016) General relativistic polytropes with a repulsive cosmological constant. *Phys. Rev. D*, *94*(10), 103513. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.103513

**Stuchlík, Z., Novotný, J., & Hladík, J.** (2025) Dark matter halos modeled by polytropic spheres influenced by the relict cosmological constant and trapping polytropes forming supermassive black holes. *Astron. Astrophys.*, *702*, A2. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202554520

**Tooper, R. F.** (1964) General relativistic polytropic fluid spheres. *Astrophys. J*, *140*, 434. https://doi.org/10.1086/147938

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

**Matemáticas**

Artículo original

# Transformada doble de Laplace *non-conformable* generalizada

## Generalized *non-conformable* double Laplace transform

**Simón Cedeño-Mendoza[1], Harold David Jarrín[1], Janneth Velasco-Velasco[1,*], Miguel Vivas-Cortez[2]**

[1] Departamento de Ciencias Exactas, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Pichincha, Ecuador
[2] Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Ambientales, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Laboratorio FRACTAL (Fractional Research Analysis, Convexity and Their Applications Laboratory), Quito, Pichincha, Ecuador

## Resumen

En este trabajo se introduce una nueva transformada de Laplace fraccionaria denominada transformada doble de Laplace *non-conformable* generalizada. Esta propuesta extiende las transformadas dobles de Laplace *non-conformable* mediante la inclusión de funciones moduladoras generalizadas $\phi(u)$ y $\psi(v)$. Se establecen las propiedades básicas de la transformada, incluida la linealidad, las condiciones de existencia, las propiedades derivativas y los teoremas de convolución. Por último, la transformada doble de Laplace *non-conformable* generalizada (*Generalized Non-Conformable Double Laplace Transform - NCGDT*) se aplica a la resolución de diferentes tipos de ecuaciones diferenciales parciales fraccionarias *non-conformables*.

**Palabras clave:** Ttransformada doble de Laplace *non-conformable*; derivada *non-conformable*.

## Abstract

In this work, a new fractional Laplace transform called the generalized non-conformable double Laplace transform is introduced. This proposal extends the non-conformable double Laplace transforms by including generalized modulating functions $\phi(u)$ and $\psi(v)$. The basic properties of the transform are established, including linearity, existence conditions, derivative properties, and convolution theorems. Finally, the generalized non-conformable double Laplace transform (NCGDT) is applied to the solution of different types of non-conformable fractional partial differential equations.

**Keywords:** Non-conformable double Laplace transform; non-conformable derivative.

**Citación:** Cedeño-Mendoza S, et al. Transformada doble de Laplace *non-conformable* generalizada. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

**Editor:** Francisco Marcellan

***Correspondencia:**
Janneth Velasco Velasco;
javelasco3@espe.edu.ec

**Recibido:** 5 de mayo de 2026
**Aceptado:** 20 de mayo de 2026
**Publicado en línea:** 2 de julio de 2026

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

## 1. Introducción

En los últimos años, el cálculo fraccionario ha desempeñado un papel esencial en la modelización de sistemas complejos en ingeniería, física, biología y otras ciencias aplicadas. Las ecuaciones diferenciales parciales fraccionarias han surgido como herramientas eficaces para describir fenómenos del mundo real con efectos de memoria o comportamiento no local, siendo útiles en biología matemática, dinámica de fluidos, óptica, circuitos eléctricos y física cuántica [Kilbas et al., 2006], [Diethelm, 2010], [Avci et al., 2017]. Diversas definiciones de derivadas e integrales fraccionarias, entre ellas las propuestas por Riesz, Weyl, Riemann-Liouville, Caputo y Hadamard, han sido ampliamente estudiadas en la literatura matemática [Ross et al., 1994], [Anastassiou, 2011], [Yang et al., 2013].

Muchas de estas definiciones presentan ciertas limitaciones, como el incumplimiento de reglas básicas, por ejemplo, las del producto o del cociente, lo que dificulta su aplicación en áreas como la ingeniería y la física. En este contexto, [Khalil et al., 2014] propusieron la derivada fraccionaria local conformable. Este tipo de derivadas ha despertado un interés creciente debido a su capacidad para conservar propiedades fundamentales de la derivada clásica, al tiempo que incorporan características de memoria y localidad adecuadas para describir fenómenos anómalos. Para profundizar en el estudio

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

de las derivadas conformables y generalizadas, se pueden consultar [Abdeljawad, 2015], [Atangana and Baleanu, 2015], [Hashemi, 2018], [Gozutok and Gozutok, 2018] y [Vivas-Cortez et al., 2025].

En este contexto, la derivada fraccionaria non-conformable, definida por [Guzmán et al., 2018] como

$$N_1^{\alpha} f(u) = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{f(u + \varepsilon e^{u^{-r}}) - f(u)}{\varepsilon} = e^{u^{-r}} f'(u),$$

ha despertado particular interés, ya que mantiene la linealidad y la regla del producto, introduciendo a su vez una escala exponencial no uniforme que refleja un comportamiento local non-conformable. Esta propiedad la hace especialmente apropiada para describir procesos no lineales de crecimiento, difusión y relajación en sistemas biológicos, físicos y químicos, se puede estudiar más acerca de la derivada non-conformable en [Nápoles Valdes et al., 2018], [González et al., 2020], [Martínez et al., 2022], [Injrou and Hatem, 2022].

A partir de este concepto se desarrollaron la transformada de Laplace non-conformable [Vivas-Cortez et al., 2021] y su versión doble [Jarrín et al., 2026], las cuales son herramientas eficaces para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales fraccionarias locales. Diversos resultados sobre la transformada de Laplace se recogen en [Watugala, 1993], [Doetsch, 2012], [Alawad et al., 2013], [Sedeeg, 2016], [Özkan and Kurt, 2018], [Alfaeih and Misirli, 2021], [Alfaeih et al., 2021], [Honggang and Yanmin, 2022], [Deresse, 2022], [Al-Rab'a et al., 2022], [Abdeljawad et al., 2023], [Mohamed et al., 2023]. Sin embargo, muchos fenómenos reales presentan heterogeneidad estructural y dependencia paramétrica que no pueden ser descritas adecuadamente mediante la transformada non-conformable estándar. Esto motiva la formulación de una Transformada Doble de Laplace Non-Conformable Generalizada (NCGDT), la que se construyó tomando como referencia [Meddahi et al., 2021] y [Sedeeg and Alhamad, 2025], es capaz de generar diversas transformadas conocidas como casos particulares mediante la variación de sus funciones núcleo.

En este trabajo se introduce una nueva definición denominada Transformada Doble de Laplace Non-Conformable Generalizada, denotada por

$$\mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right] = \mu_{D_{r,t}}(m,n)$$

.

La transformada propuesta extiende las versión non-conformable de la transformada doble de Laplace, incorporando núcleos exponenciales locales del tipo $e^{-x^{-r}}$ y $e^{-t^{-t}}$, junto con funciones generadoras generalizadas $\varphi(m)$ y $\omega(n)$. Mediante la elección adecuada de dichas funciones, la nueva transformada puede reproducir como casos particulares las versiones non-conformable de la transformada doble de Laplace.

## Notación

Resumimos a continuación la notación principal utilizada en este trabajo.

| Símbolo | Descripción |
|---|---|
| $x, y$ | Variables independientes reales. |
| $r, t \in (0,1)$ | Órdenes de las derivadas parciales fraccionarias non-conformables. |
| $h(x,y)$ | Función real o compleja de dos variables. |
| $\varphi(m),\ \omega(n)$ | Funciones transformadoras asociadas a $x$ y $y$. |
| $\eta(m),\ \rho(n)$ | Funciones de normalización asociadas a la transformada doble de Laplace generalizada non-conformable. |

**Cuadro 1.** Notación utilizada a lo largo del manuscrito.

## 2. Definiciones básicas

En esta sección, establecemos las definiciones y propiedades de la doble transformada de Laplace generalizada.

**Definición 2.1.** *[Meddahi et al., 2021]*

*Sea $g(x,y)$ una función integrable de dos variables, con $x,y>0$. Entonces, la doble transformada de Laplace generalizada, denotada por $\Psi_D(u,v)$, se define como*

$$\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y[g(x,y);m,n]=\Psi_D(m,n)=\eta(m)\rho(n)\int_0^\infty\int_0^\infty g(x,y)e^{-(\varphi(m)x+\omega(n)y)}\,dx\,dy \tag{2.1}$$

*donde $\varphi(m)$ y $\omega(n)$ representan las funciones transformadoras asociadas a x y y, respectivamente.*

*Asimismo,*

$$(\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y)^{-1}[\Psi_D(m,n)]=g(x,y)=\frac{1}{2\pi i}\int_{a-i\infty}^{a+i\infty}\frac{e^{\varphi(m)x}}{\eta(m)}dm\cdot\frac{1}{2\pi i}\int_{b-i\infty}^{b+i\infty}\frac{e^{\omega(n)y}}{\rho(n)}dn \tag{2.2}$$

**Definición 2.2.** *[Meddahi et al., 2021]*

*Sea $g(x,y)$ una función definida en $[0,X]\times[0,Y]$ que satisface la condición*

$$|g(x,y)|\le Ke^{\alpha x+\delta y}\qquad \exists K>0,\quad \forall x>X\ y\ \forall y>Y.$$

*En tal caso, se dice que $g(x,y)$ es una función de órdenes exponenciales $\alpha$ y $\delta$ cuando $x,y\to\infty$.*

**Teorema 2.1.** *[Meddahi et al., 2021]*

*La condición de existencia de la doble transformada de Laplace generalizada de la función continua $g(x,y)$ definida en $[0,X]\times[0,Y]$ debe ser de órdenes exponenciales $\alpha$ y $\delta$, para $\mathrm{Re}[\varphi(m)]>\alpha$ y $\mathrm{Re}[w(n)]>\delta$ y además se tiene*

$$|\Psi_D(m,n)|\le\frac{\eta(m)\rho(n)K}{(\varphi(m)-\alpha)(\omega(n)-\delta)}.$$

En el siguiente teorema, anotamos algunas propiedades básicas de la transformada doble de Laplace generalizada

**Teorema 2.2.** *[Meddahi et al., 2021]*

*Sean $g(x,y)$ y $h(x,y)$ funciones de órdenes exponenciales. Si*

$$\Psi_D(m,n)=\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y[g(x,y)],\qquad \mu_D(m,n)=\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y[h(x,y)],$$

*y $a,b\in\mathbb{R}$, entonces:*

1. $$\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y\left[a\,g(x,y)+b\,h(x,y)\right]=a\,\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y[g(x,y)]+b\,\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y[h(x,y)] \tag{2.4}$$

2. $$(\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y)^{-1}\left[a\Psi_D(m,n)+b\,\mu_D(m,n)\right]=a\,(\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y)^{-1}\left[\Psi_D(m,n)\right]+b\,(\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y)^{-1}\left[\mu_D(m,n)\right] \tag{2.5}$$

3. $$\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y\left[x^ay^b\right]=\eta(m)\rho(n)\,\frac{\Gamma(a+1)\,\Gamma(b+1)}{\varphi(m)^{a+1}\,\omega(n)^{b+1}},\qquad a,b\ge 0. \tag{2.6}$$

4. $$\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y\left[e^{ax+by}\right]=\frac{\eta(m)\rho(n)}{(\varphi(m)-a)\,(\omega(n)-b)},\qquad \Re[\varphi(m)]>a,\ \Re[\omega(n)]>b. \tag{2.7}$$

5. $$\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y[\cos(ax)\cos(by)]=\frac{\eta(m)\,\varphi(m)}{\varphi^2(m)+a^2}\cdot\frac{\rho(n)\,w(n)}{w^2(n)+b^2},\qquad a,b\in\mathbb{R}. \tag{2.8}$$

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

*6.*

$$\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y[\sin(ax)\sin(by)] = \frac{a\,\eta(m)}{\varphi^2(m)+a^2}\cdot\frac{b\,\rho(n)}{w^2(n)+b^2}, \qquad a,b\in\mathbb{R}. \tag{2.9}$$

*7.*

$$\mathscr{L}_x\mathscr{L}_y\left[\frac{\partial^n h(x,y)}{\partial x^n}\right] = \varphi^n(u)\,\mu_D(u,v) - \eta(u)\sum_{s=1}^{n-1}\varphi^{n-1-s}(u)\frac{d^s\mathscr{L}_I(0,v)}{dx^s}, \qquad n\in\mathbb{N}. \tag{2.10}$$

*donde $\mathscr{L}_I(0,v)$ es la transformada integral generalizada de $h(0,y)$, definida como*

$$\mathscr{L}_I(0,v) = \eta(u)\rho(v)\int_0^\infty h(0,y)e^{-w(v)y}\,dy.$$

## 3. Derivada fraccionaria non-conformable

En esta sección introducimos las definiciones de derivadas parciales fraccionarias non-conformables.

**Definición 3.1.**

*Sea*

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\ \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) : \mathbb{R}\times(0,\infty)\to\mathbb{R},$$

*entonces:*

I) *La derivada parcial fraccionaria espacial non-conformable de*

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\ \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)$$

*de orden r está definida como*

$${}_xN_1^r h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\ \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) = \lim_{\beta\to0}\frac{h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\beta e^{x^{-r}},\ \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)}{\beta} - \frac{h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\ \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)}{\beta}. \tag{3.1}$$

II) *La derivada parcial fraccionaria espacial non-conformable de*

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\ \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)$$

*de orden t está definida como*

$${}_yN_1^t h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\ \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) = \lim_{\varepsilon\to0}\frac{h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\ \int_0^y e^{-v^{-t}}dv+\varepsilon e^{y^{-t}}\right)}{\varepsilon} - \frac{h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\ \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)}{\varepsilon}. \tag{3.2}$$

*donde*

$$\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\quad \int_0^y e^{-v^{-t}}dv>0, \qquad 0<r,t\le1.$$

## Derivadas parciales fraccionarias non-conformables de algunas funciones

En lo que sigue, daremos las derivadas parciales fraccionarias non-conformables de algunas funciones.

1) Sea

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=\int_0^x e^{-u^{-r}}du\cdot\int_0^y e^{-v^{-t}}dv,$$

entonces, al aplicar los operadores correspondientes, se obtiene:

$$ {}_xN_1^r\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\cdot\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=\int_0^y e^{-v^{-t}}dv,$$
$$ {}_yN_1^t\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\cdot\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=\int_0^x e^{-u^{-r}}du.$$

2) Sea

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)^n,$$

entonces, se tiene que:

$$ {}_xN_1^r\left(\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)^n\right)=n\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)^{n-1},$$
$$ {}_yN_1^t\left(\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)^n\right)=0.$$

3) Sea

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)^j\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)^i,$$

entonces, se obtiene:

$$ {}_xN_1^r\left(\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)^j\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)^i\right)=j\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)^{j-1}\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)^i,$$
$$ {}_yN_1^t\left(\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)^j\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)^i\right)=i\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)^j\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)^{i-1}.$$

4) Sea

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=\sin\left(\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)\sin\left(\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right),$$

entonces, se tiene:

$$ {}_xN_1^r\left(\sin\left(\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)\sin\left(\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right)=\lambda\cos\left(\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)\sin\left(\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right),$$
$$ {}_yN_1^t\left(\sin\left(\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)\sin\left(\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right)=\beta\sin\left(\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)\cos\left(\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right).$$

5) Sea

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=e^{\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv},$$

entonces, se obtiene:

$$ {}_xN_1^r\left(e^{\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}\right)=\lambda e^{\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv},$$
$$ {}_yN_1^t\left(e^{\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}\right)=\beta e^{\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}.$$

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

**Teorema 3.1.**

*Sean $r,t \in (0,1]$ y sea $h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)$ una función diferenciable de orden $r$ y $t$ en los puntos $x,y>0$, respectivamente. Entonces, se cumple que:*

$$ {}_xN_1^r h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) = e^{x^{-r}}\frac{\partial}{\partial x}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right), $$

$$ {}_yN_1^t h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) = e^{y^{-t}}\frac{\partial}{\partial y}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right). $$

*Demostración.*

Para demostrar el resultado, hacemos el cambio $j = \beta e^{x^{-r}}$ y, utilizando la definición 3.1, se obtiene:

$$ {}_xN_1^r h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) = \lim_{j\to 0}\frac{h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du + j, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)}{je^{-x^{-r}}} \tag{1} $$

$$ - \frac{h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)}{je^{-x^{-r}}} \tag{2} $$

$$ = \lim_{j\to 0}\frac{e^{x^{-r}}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du + j, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)}{j} \tag{3} $$

$$ - \frac{e^{x^{-r}}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)}{j}. \tag{4} $$

De donde se deduce que

$$ {}_xN_1^r h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) = e^{x^{-r}}\frac{\partial}{\partial x}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right). $$

De manera análoga, se obtiene que:

$$ {}_yN_1^t h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) = e^{y^{-t}}\frac{\partial}{\partial y}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right). $$

□

**Observación.**

Cuando la función $h$ no es diferenciable en el sentido clásico, las derivadas parciales ordinarias pueden no existir. En consecuencia, las igualdades del Teorema 3.1 dejan de estar bien definidas en el marco clásico y el teorema no puede aplicarse directamente.

## 4. Transformada doble de Laplace generalizada non-conformable

En esta sección, definimos la transformada doble de Laplace generalizada non-conformable y probaremos algunos teoremas.

**Definición 4.1.**

*Sea $h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)$ una función continua por partes en $(0,\infty)\times(0,\infty)$. Se dice que es de orden exponencial generalizado si existen constantes $M,a,b \in \mathbb{R}$ tales que*

$$ \left|h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right| \leq Me^{a\int_0^x e^{-u^{-r}}du + b\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}. $$

*Esta condición permite describir el crecimiento de la función mediante una cota de tipo exponencial en las variables transformadas.*

**Definición 4.2.**

*Sean* $r,t \in (0,1]$ *y sea* $h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)$ *una función continua por partes en el intervalo* $[0,\infty)\times[0,\infty)$ *de orden exponencial generalizado.*

*Entonces, la transformada doble de Laplace generalizada non-conformable está dada por*

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right] = \mu_{D_{r,t}}(m,n)$$
$$\eta(m)\rho(n)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}\,dx\,dy,$$

*donde* $m,n \in \mathbb{C}$ *y las integrales se efectúan en el sentido fraccionario non-conformable con respecto a* $\int_0^x e^{-u^{-r}}du$ *y* $\int_0^y e^{-v^{-t}}dv$.

**Corolario 4.1**

Si $\eta(m)=\rho(n)=1$ y $\varphi(m)=m$, $\omega(n)=n$, entonces se obtiene la transformada doble de Laplace non-conformable:

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$$
$$=\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-m\int_0^x e^{-u^{-r}}du-n\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}\,dx\,dy.$$

**Definición 4.3.**

*Sea* $h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)$ *una función continua por tramos definida en* $(0,\infty)\times(0,\infty)$ *y de orden exponencial generalizado.*

*Consideremos la transformada de Laplace generalizada non-conformable con respecto a x, definida por*

$$\mathscr{L}_x^r\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$$
$$=\eta(m)\int_0^\infty e^{-x^{-r}}e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)dx.$$

*Esta integral corresponde a la transformada de Laplace generalizada non-conformable de* $h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)$ *con respecto a la variable x.*

*De forma similar, la transformada de Laplace generalizada non-conformable con respecto a la variable y está dada por*

$$\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$$
$$=\rho(n)\int_0^\infty e^{-y^{-t}}e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)dy.$$

*En este caso, la expresión integral anterior representa la transformada de Laplace generalizada non-conformable respecto a la variable y.*

**Teorema 4.1.**

*Sean* $r,t>0$, $\varphi(m)$, $\omega(n)$, $\eta(m)$, $\rho(n)\in\mathbb{C}$ *tales que* $\Re(\varphi(m))>0$, $\Re(\omega(n))>0$.

*Si la función h puede escribirse como:*

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) = f\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)g\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right),$$

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

*donde* $f,g:[0,\infty)\to\mathbb{C}$ *son continuas por partes y de orden exponencial, entonces*

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[f\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)g\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]=\mathscr{L}_p\mathscr{L}_q[f(p)g(q)],$$

*donde* $p=\int_0^x e^{-u^{-r}}du$ *y* $q=\int_0^y e^{-v^{-t}}dv$.

*Demostración.*

Utilizando la definición de NCGDT, se tiene:

$$\begin{aligned}&\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[f\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)g\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\&=\eta(m)\rho(n)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}f\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}d\mu\right)g\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\\&e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}dxdy.\end{aligned}$$

Cuando se sustituye:

$$p=\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\quad q=\int_0^y e^{-v^{-t}}dv,\quad dp=e^{-x^{-r}}dx,\quad dq=e^{-y^{-t}}dy,$$

se logra obtener

$$\begin{aligned}&\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[f\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)g\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\&=\eta(m)\rho(n)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\varphi(m)p-\omega(n)q}f(p)g(q)\,dp\,dq\\&=\mathscr{L}_p\mathscr{L}_q[f(p)g(q)],\end{aligned}$$

donde $\mathscr{L}_p\mathscr{L}_q$ es la transformada doble de Laplace generalizada de $f(p)g(q)$.

□

**Teorema 4.2.**

*Sean* $r,t>0$, $\varphi(m)$, $\omega(n)$, $\eta(m)$, $\rho(n)\in\mathbb{C}$ *tales que* $\Re(\varphi(m))>0$, $\Re(\omega(n))>0$, *se tiene que:*

1. *Si*

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=1,$$

*entonces*

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t[1]=\frac{\eta(m)\rho(n)}{\varphi(m)\omega(n)}.$$

2. *Si*

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)^i\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)^j,$$

*entonces*

$$\begin{aligned}\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)^i\left(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)^j\right]&=\mathscr{L}_p\mathscr{L}_q[p^iq^j]\\&=\frac{\eta(m)\rho(n)\Gamma(i+1)\Gamma(j+1)}{\varphi(m)^{i+1}\omega(n)^{j+1}}.\end{aligned}$$

3. *Si*

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=e^{\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv},$$

*entonces*

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[e^{\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}\right]=\frac{\eta(m)\rho(n)}{(\varphi(m)-\lambda)(\omega(n)-\beta)}.$$

4. *Si*

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) = \sin\left(\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)\sin\left(\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right),$$

*entonces*

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[\sin\left(\lambda\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)\sin\left(\beta\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right] = \frac{\eta(m)\rho(n)\lambda\beta}{(\varphi(m)^2+\lambda^2)(\omega(n)^2+\beta^2)}.$$

*Demostración.*

Los ítems 1, 2, 3 y 4 se obtienen directamente del Teorema 4.1 y la ecuación 2.6. □

**Teorema 4.3.**

*Si* $h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)$ *es una función continua por partes en la región* $(0,X)\times(0,T)$*, de órdenes exponenciales a y b, entonces la transformada doble de Laplace generalizada non-conformable de* $h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)$ *existe para todo* $\Re[\varphi(m)] > a$ *y* $\Re[\omega(n)] > b$*, además*

$$|\mu_{D_{r,t}}(m,n)| \leq M\,\frac{\eta(m)\rho(n)}{(\varphi(m)-a)(\omega(n)-b)},$$

*con* $M\in\mathbb{R}^+$, $M>0$.

*Demostración.*

Utilizando la definición de NCGDT. de

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right),$$

se tiene:

$$\begin{aligned}
&|\mu_{D_{r,t}}(m,n)|\\
&= \left|\eta(m)\rho(n)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}\,h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right.\\
&\quad \left. e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}\,dxdy\right|\\
&\leq \eta(m)\rho(n)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}\left|h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right|\\
&\quad e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}\,dxdy\\
&\leq M\,\eta(m)\rho(n)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-(\varphi(m)-a)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-(\omega(n)-b)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}\,dxdy\\
&= M\frac{\eta(m)\rho(n)}{(\varphi(m)-a)(\omega(n)-b)}.
\end{aligned}$$

□

**Teorema 4.4.**

*Si* $\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\ \int_0^y e^{-v^{-t}}dv)\right]$ *existe, entonces la transformada doble de Laplace generalizada non-conformable de las funciones puede representarse como sigue:*

1.

$$\begin{aligned}
&\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\
&= -\frac{\eta(m)}{\varphi'(m)}\,\frac{\partial}{\partial m}\left[\frac{1}{\eta(m)}\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\right].
\end{aligned}$$

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

*2.*

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\Big[\Big(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\Big]$$
$$=-\frac{\rho(n)}{\omega'(n)}\,\frac{\partial}{\partial n}\left[\frac{1}{\rho(n)}\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\Big[h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\Big]\right].$$

*Demostración.*

Utilizando la definición de NCGDT de $h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)$ y derivando con respecto a *m*, en los dos lados de la ecuación, se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial m}\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\right]$$
$$=\rho(n)\eta'(m)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)$$
$$.e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}dxdy$$
$$+\rho(n)\eta(m)\,\frac{\partial}{\partial m}\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)$$
$$.e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}dxdy$$
$$=\rho(n)\eta'(m)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)$$
$$.e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}dxdy$$
$$-\rho(n)\eta'(m)\,\varphi'(m)\int_0^\infty\int_0^\infty\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\Big)e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}$$
$$h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}dxdy.$$
$$=\frac{\eta'(m)}{\eta(m)}\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\right]$$
$$-\varphi'(m)\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\Big)h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\right]$$

Luego,

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\Big)h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\right]$$
$$=\frac{\eta'(m)}{\eta(m)\,\varphi'(m)}\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\right]$$
$$-\frac{1}{\varphi'(m)}\,\frac{\partial}{\partial m}\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\right].$$
$$=-\frac{\eta(m)}{\varphi'(m)}\,\frac{\partial}{\partial m}\left(\frac{1}{\eta(m)}\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\right]\right).$$

De manera similar se puede demostrar $\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\Big[\Big(\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\Big]$ de similar forma.

□

Podemos ampliar los resultados anteriores de la siguiente manera:

$$\mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ \left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du \right)^i h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$$
$$= (-1)^i \frac{\eta(m)}{[\varphi'(m)]^i} \frac{\partial^i}{\partial m^i} \left[ \frac{1}{\eta(m)} \mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right] \right]$$

$$\mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ \left( \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right)^i h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$$
$$= (-1)^i \frac{\rho(n)}{[\omega'(n)]^i} \frac{\partial^i}{\partial n^i} \left[ \frac{1}{\rho(n)} \mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right] \right].$$

**Teorema 4.5.**

*Si* $\mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$ *existe, entonces la transformada doble de Laplace generalizada non-conformable de las derivadas fraccionarias de orden r y t, para* $r,t \in (0,1)$ *se pueden representar como sigue:*

1) $$\mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ {}_xN_1^r h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$$
$$= \varphi(m) \mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$$
$$- \eta(m)\rho(n) \int_0^\infty e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}} dv}, e^{-y^{-t}} h\left( 0, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) dy.$$
$$= \varphi(m) \mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$$
$$- \eta(m) \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( 0, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$$

2) $$\mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ {}_xN_1^{2r} h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$$
$$= \varphi(m)^2 \mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$$
$$- \eta(m)\varphi(m) \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( 0, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$$
$$- \eta(m) \mathscr{L}_y^t \left[ {}_xN_1^r h\left( 0, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right].$$

3) $$\mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ {}_yN_1^t h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$$
$$= \omega(n) \mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]$$
$$- \rho(n) \mathscr{L}_x^r \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, 0 \right) \right]$$

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

$$
\begin{aligned}
4)\quad & \mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ {}_yN_1^{2t} h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right] \\
& = \omega(n)^2 \mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right] \\
& - \rho(n)\omega(n) \mathscr{L}_x^r \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, 0 \right) \right] \\
& - \rho(n) \mathscr{L}_x^r \left[ {}_yN_1^t h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, 0 \right) \right]
\end{aligned}
$$

*donde* ${}_xN_1^r h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right)$ *y* ${}_yN_1^t h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right)$ *representan las derivadas parciales fraccionarias non-conformables de orden r-ésimo y t-ésimo respectivamente*

*Demostración.*

1) Utilizamos la definición de NCGDT en ${}_xN_1^r h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right)$, así se tiene

$$
\begin{aligned}
& \mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ {}_xN_1^r h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right] \\
& = \eta(m)\rho(n) \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}} du - \omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}} dv} \\
& {}_xN_1^r h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) e^{-x^{-r}} e^{-y^{-t}} dx dy \\
& = \rho(n) \int_0^\infty e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}} dv} e^{-y^{-t}} \eta(m) \int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}} du} \\
& e^{x^{-r}} \frac{\partial}{\partial x} h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) e^{-x^{-r}} dx dy \\
& = \rho(n) \int_0^\infty e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}} dv} e^{-y^{-t}} \eta(m) \left[ -h\left( 0, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right. \\
& \left. + \varphi(m) \int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}} du} h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) e^{-x^{-r}} dx \right] dy. \\
& = \varphi(m)\eta(m)\rho(n) \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}} du - \omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}} dv} h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \\
& e^{-x^{-r}} e^{-y^{-t}} dx dy - \eta(m)\rho(n) \int_0^\infty e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}} dv} e^{-y^{-t}} h\left( 0, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) dy. \\
& = \varphi(m) \mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right] \\
& - \eta(m)\rho(n) \int_0^\infty e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}} dv} e^{-y^{-t}} h\left( 0, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) dy. \\
& = \varphi(m) \mathscr{L}_x^r \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right] \\
& - \eta(m) \mathscr{L}_y^t \left[ h\left( 0, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right) \right]
\end{aligned}
$$

3) Al utilizar nuevamente la definición de NCGDT, pero en ${}_yN_1^t h\left( \int_0^x e^{-u^{-r}} du, \int_0^y e^{-v^{-t}} dv \right)$, obtenemos

$$
\begin{aligned}
&\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_yN_1^t h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\
&=\eta(m)\rho(n)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}\\
&{}_yN_1^t h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}\,dx\,dy\\
&=\eta(m)\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du}e^{-x^{-r}}\,\rho(n)\int_0^\infty e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}\\
&e^{y^{-t}}\frac{\partial}{\partial y}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)e^{-y^{-t}}\,dy\,dx\\
&=\eta(m)\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du}e^{-x^{-r}}\,\rho(n)\left[-h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\right)\right.\\
&\left.+\omega(n)\int_0^\infty e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)e^{-y^{-t}}dy\right]dx.\\
&=\omega(n)\,\eta(m)\rho(n)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\\
&e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}\,dx\,dy-\eta(m)\rho(n)\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du}e^{-x^{-r}}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\right)dx.\\
&=\omega(n)\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\
&-\eta(m)\rho(n)\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du}e^{-x^{-r}}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\right)dx.\\
&=\omega(n)\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\
&-\rho(n)\mathscr{L}_x^r\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\right)\right]
\end{aligned}
$$

De similar manera se puede obtener,
$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_xN_1^{2r}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$ y $\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_yN_1^{2t}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$

Observamos que los resultados anteriores pueden extenderse de la siguiente manera:

$$
\begin{aligned}
&\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_xN_1^{ir}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\
&=\varphi(m)^i\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\
&-\eta(m)\rho(n)\sum_{k=0}^{i-1}\varphi(m)^{i-1-k}\int_0^\infty e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}e^{-y^{-t}}\,{}_xN_1^{kr}h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)dy.\\
&=\varphi(m)^i\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\
&-\eta(m)\sum_{k=0}^{i-1}\varphi(m)^{i-1-k}\,\mathscr{L}_y^t\left[{}_xN_1^{kr}h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]
\end{aligned}
$$

□

**Teorema 4.6.**
*Si* $\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\ \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$ *existe, entonces:*

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

*1.*

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[\int_0^x e^{-u^{-r}}du\,{}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$$
$$=-\frac{\eta(m)\,\omega(n)}{\varphi'(m)}\,\frac{\partial}{\partial m}\left(\frac{1}{\eta(m)}\left[\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\right]\right)$$
$$+\frac{\eta(m)\,\rho(n)}{\varphi'(m)}\,\frac{d}{dm}\left(\mathscr{L}_x^r\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\right)\right]\right).$$

*2.*

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\,{}_xN_1^rh\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$$
$$=-\frac{\rho(n)\,\varphi(m)}{\omega'(n)}\,\frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{1}{\rho(n)}\left[\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\right]\right)$$
$$+\frac{\eta(m)\,\rho(n)}{\omega'(n)}\,\frac{d}{dn}\left(\mathscr{L}_y^t\left[h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\right).$$

*Demostración.*

Utilizando la definición de NCGDT de ${}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)$, se tiene:

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$$
$$=\int_0^\infty\int_0^\infty\eta(m)\rho(n)e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}$$
$$\left({}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right)e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}dxdy.$$

Derivando a los dos lados de la expresión con respecto a $m$, se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial m}\left(\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\right)$$
$$=\rho(n)\int_0^\infty e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}e^{-y^{-t}}\left({}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right)$$
$$\left[\int_0^\infty\frac{\partial}{\partial m}(\eta(m)e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du}e^{-x^{-r}})dx\right]dy.$$

Puesto que,

$$\int_0^\infty\frac{\partial}{\partial m}(\eta(m)e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du}e^{-x^{-r}})dx$$
$$=\eta'(m)\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du}e^{-x^{-r}}dx+\eta(m)\int_0^\infty\frac{d}{dm}\left(e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du}\right)e^{-x^{-r}}dx$$
$$=\eta'(m)\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du}e^{-x^{-r}}dx$$
$$-\eta(m)\varphi'(m)\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du}\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)e^{-x^{-r}}dx.$$

Ahora se tiene.

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial m}\left(\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\right)\\
&=\rho(n)\eta'(m)\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}\\
&\left({}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right)e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}dxdy\\
&-\rho(n)\eta(m)\varphi'(m)\int_0^\infty\int_0^\infty\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right)e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}\\
&{}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)e^{-x^{-r}}e^{-y^{-t}}dxdy,
\end{aligned}$$

de donde

$$\begin{aligned}
&\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du\right){}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\
&=-\frac{1}{\varphi'(m)}\left[\frac{\partial}{\partial m}\left(\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\right)\right]\\
&\quad+\frac{\eta'(m)}{\varphi'(m)\eta(m)}\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\
&=-\frac{\eta(m)}{\varphi'(m)}\frac{\partial}{\partial m}\left(\frac{1}{\eta(m)}\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_yN_1^th\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\right).
\end{aligned}$$

Utilizando el Teorema 4.5, se tiene que:

$$\begin{aligned}
&\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[\int_0^x e^{-u^{-r}}du\,{}_yN_1^th\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\right]\\
&=-\frac{\eta(m)}{\varphi'(m)}\frac{\partial}{\partial m}\Big(\frac{1}{\eta(m)}\Big\{\omega(n)\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\Big[h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\Big]\\
&\quad-\rho(n)\eta(m)\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du},h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\Big)e^{-x^{-r}}dx\Big\}\Big).\\
&=-\frac{\eta(m)\omega(n)}{\varphi'(m)}\frac{\partial}{\partial m}\left(\frac{1}{\eta(m)}\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\Big[h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\Big)\Big]\right)\\
&\quad+\frac{\eta(m)\rho(n)}{\varphi'(m)}\frac{d}{dm}\left(\int_0^\infty e^{-\varphi(m)\int_0^x e^{-u^{-r}}du},h\Big(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\Big)e^{-x^{-r}}dx\right)\\
&=-\frac{\eta(m)\,\omega(n)}{\varphi'(m)}\frac{\partial}{\partial m}\left(\frac{1}{\eta(m)}\Big[\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\Big[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\Big]\Big]\right)\\
&\quad+\frac{\eta(m)\rho(n)}{\varphi'(m)}\frac{d}{dm}\left(\mathscr{L}_x^r\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\right)\right]\right).
\end{aligned}$$

□

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

# 5. Aplicaciones

## 5.1. Ejemplo 5.1

Considere la siguiente ecuación fraccional non-conformable homogénea, de la forma

$$ {}_xN_1^{2r}\left(h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right)={}_yN_1^{t}\left(h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right). \tag{5.1}$$

con condiciones iniciales

$$ h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\right)=e^{\int_0^x e^{-u^{-r}}du}, \tag{5.2}$$

$$ h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=e^{\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}, \tag{5.3}$$

$$ {}_xN_1^{r}h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=e^{\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}. \tag{5.4}$$

**Solución.**

Aplicamos la transformada doble de Laplace non-conformable generalizada a los dos lados de la ecuación (5.1), obteniendo

$$ \mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_xN_1^{2r}\left(h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right)\right]=\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[{}_yN_1^{t}\left(h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right)\right]. \tag{5.5}$$

Por las propiedades de las derivadas parciales de NCGDT, se tiene.

$$\begin{aligned}
&\varphi^2(m)\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]-\eta(m)\varphi(m)\mathscr{L}_y^t\left[h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\
&\quad-\eta(m)\mathscr{L}_y^t\left[{}_xN_1^{r}h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\
&\quad=\omega(n)\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]-\rho(n)\mathscr{L}_x^r\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\right)\right]
\end{aligned} \tag{5.6}$$

Se tiene que

$$\begin{aligned}
\mathscr{L}_y^t\left[h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]&=\rho(n)\int_0^\infty e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}e^{\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}e^{-y^{-t}}dy\\
&=\rho(n)\int_0^\infty e^{-(\omega(n)-1)u}du\\
&=\frac{\rho(n)}{\omega(n)-1}
\end{aligned} \tag{5.7}$$

De similar manera se obtienen

$$ \mathscr{L}_y^t\left[{}_xN_1^{r}h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]=\frac{\rho(n)}{\omega(n)-1} \tag{5.8}$$

$$ \mathscr{L}_x^r\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}d\mu,0\right)\right]=\frac{\eta(m)}{\varphi(m)-1} \tag{5.9}$$

Reemplazando (5.7), (5.8), (5.9) en (5.6) se obtiene

$$(\varphi(m))^2-\omega(n))\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$$
$$=\frac{\rho(n)\eta(m)\varphi(m)+\rho(n)\eta(m)}{\omega(n)-1}-\frac{\rho(n)\eta(m)}{\varphi(m)-1}.$$

factorizamos $\rho(n)\eta(m)$ en el lado derecho, obteniendo

$$\left((\varphi(m))^2-\omega(n)\right)\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$$
$$=\rho(n)\eta(m)\left[\frac{\varphi(m)+1}{\omega(n)-1}-\frac{1}{\varphi(m)-1}\right]$$
$$=\rho(n)\eta(m)\left[\frac{(\varphi(m)+1)(\varphi(m)-1)-(\omega(n)-1)}{(\omega(n)-1)(\varphi(m)-1)}\right]$$
$$=\rho(n)\eta(m)\left[\frac{(\varphi(m))^2-1-\omega(n)+1}{(\omega(n)-1)(\varphi(m)-1)}\right]$$
$$=\rho(n)\eta(m)\left[\frac{(\varphi(m))^2-\omega(n)}{(\omega(n)-1)(\varphi(m)-1)}\right]$$

Finalmente, cancelando el factor $\left((\varphi(m))^2-\omega(n)\right)$ en ambos lados, resulta

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]=\frac{\eta(m)\rho(n)}{(\varphi(m)-1)\,(\omega(n)-1)}.$$

Luego, la solución es

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=C\,e^{\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}. \tag{5.10}$$

Si $r=t=0$, entonces se tiene

$$h\left(\frac{x}{e},\frac{y}{e}\right)=e^{\frac{x}{e}+\frac{y}{e}}.$$

Esta expresión coincide con la solución clásica de tipo exponencial asociada a la ecuación diferencial homogénea correspondiente, lo cual confirma que el modelo non-conformable generalizado recupera adecuadamente los resultados clásicos como caso particular.

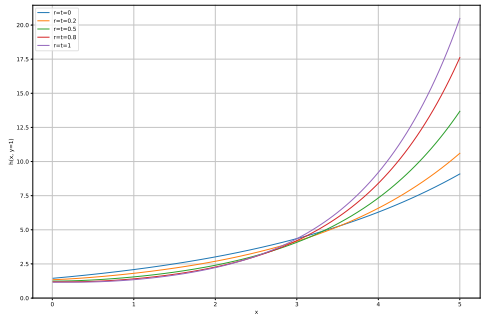



**Figura 1.** Representación gráfica de la transformación $s(x)=\int_0^x e^{-u^{-r}}du$ para diferentes valores del parámetro $r$, con $y=1$

La figura muestra el comportamiento de la función

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^1 e^{-v^{-t}}dv\right)=C\,e^{\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\int_0^1 e^{-v^{-t}}dv},$$

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

para distintos valores de $r = t$, con $y = 1$.

Se observa que todas las curvas presentan crecimiento exponencial; sin embargo, este depende de la transformación

$$s(x) = \int_0^x e^{-u^{-r}}\, du.$$

Se puede ver que si el valor de $r$ aumenta, la función crece más lento en las cercanías del origen y más rápido para valores elevados de $x$.

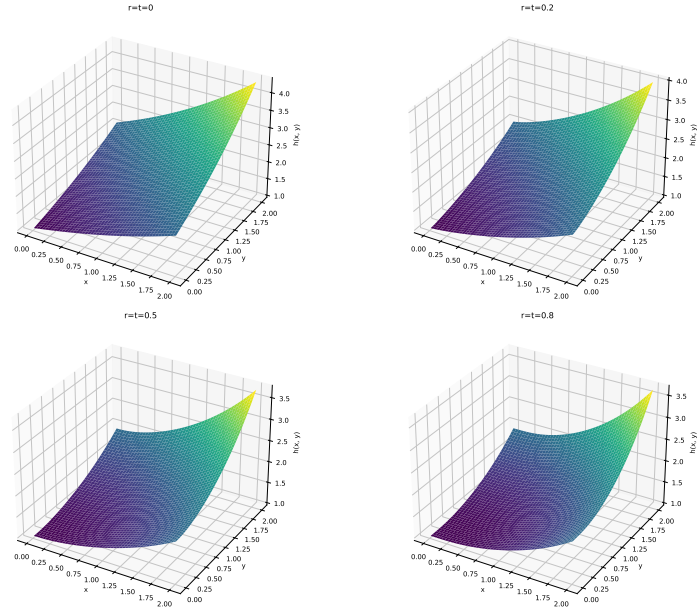



**Figura 2.** Superficie de la solución $h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}\, du, \int_0^y e^{-v^{-t}}\, dv\right) = e^{\int_0^x e^{-u^{-r}}\, du + \int_0^y e^{-v^{-t}}\, dv}$ para diferentes valores de $r = t$. El caso $r = t = 0$ corresponde a una escala lineal del dominio, que produce $h(x, y) = e^{(x+y)/e}$, para $r, t > 0$ se observa una deformación no lineal.

En la figura se muestran las superficies de

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}\, du, \int_0^y e^{-v^{-t}}\, dv\right) = C\, e^{\int_0^x e^{-u^{-r}}\, du + \int_0^y e^{-v^{-t}}\, dv},$$

para distintos valores de $r = t$. La función mantiene su estructura exponencial, pero depende de las variables transformadas

$$s(x) = \int_0^x e^{-u^{-r}}\, du, \quad w(y) = \int_0^y e^{-v^{-t}}\, dv.$$

Si $r = t = 0$, el crecimiento es uniforme y suave. Al medida que $r$ y $t$ aumentan, la superficie tiende a aplanarse en las proximidades del origen, debido a que $s(x)$ y $w(y)$ presentan un crecimiento más lento en dicha región, retomando un comportamiento más acelerado al alejarse de ella.

### *5.2. Ejemplo 5.2*

Considere la ecuación de advección-difusión de la forma

$$\begin{aligned} {}_yN_1^t h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}\, du, \int_0^y e^{-v^{-t}}\, dv\right) - {}_xN_1^{2r} h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}\, du, \int_0^y e^{-v^{-t}}\, dv\right) \\ + {}_xN_1^r h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}\, du, \int_0^y e^{-v^{-t}}\, dv\right) = 0 \end{aligned} \tag{5.11}$$

con condiciones iniciales,

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\right)=e^{\int_0^x e^{-u^{-r}}du}-\int_0^x e^{-u^{-r}}du \tag{5.12}$$

$$h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=1+\int_0^y e^{-v^{-t}}dv \tag{5.13}$$

$${}_xN_1^r h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=0 \tag{5.14}$$

Solución

Aplicamos la transformada doble de Laplace generalizada non-conformable y se obtiene

$$\begin{aligned}\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\Big[{}_yN_1^t h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)-{}_xN_1^{2r}h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\\ +{}_xN_1^r h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\Big]=0\end{aligned} \tag{5.15}$$

Por las propiedades de las derivadas parciales de NCGDT, se tiene.

$$\begin{aligned}&\omega(n)\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]-\rho(n)\mathscr{L}_x^r\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,0\right)\right]\\ &-\varphi^2(m)\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]+\varphi(m)\eta(m)\mathscr{L}_y^t\left[h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\ &+\eta(m)\mathscr{L}_y^t\left[{}_xN_1^r h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]+\varphi(m)\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}d\mu,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]\\ &-\eta(m)\mathscr{L}_y^t\left[h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]=0\end{aligned} \tag{5.16}$$

Realizando el cambio de variable $u=\int_0^y e^{-v^{-t}}dv$, $\quad du=e^{-y^{-t}}dy$, se tiene que

$$\begin{aligned}\mathscr{L}_y^t\left[h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]&=\rho(n)\int_0^\infty e^{-y^{-t}}e^{-\omega(n)\int_0^y e^{-v^{-t}}dv}\left(1+\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)dy\\ &=\rho(n)\int_0^\infty e^{-\omega(n)u}(1+u)\,du\\ &=\rho(n)\left(\frac{1}{\omega(n)}+\frac{1}{\omega^2(n)}\right)\end{aligned} \tag{5.17}$$

De similar manera se obtiene.

$$\mathscr{L}_y^t\left[{}_xN_1^r h\left(0,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]=0 \tag{5.18}$$

$$\mathscr{L}_x^r\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}d\mu,0\right)\right]=\eta(m)\left(\frac{1}{\varphi(m)-1}-\frac{1}{\varphi^2(m)}\right) \tag{5.19}$$

Reemplazando 5.17, 5.18, 5.19 en 5.16 se tiene

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):873-895, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4097

Reemplazando 5.17, 5.18, 5.19 en 5.16 se tiene

$$[\omega(n)-\varphi^2(m)+\varphi(m)]\,\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}d\mu,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$$
$$=\rho(n)\,\eta(m)\left(\frac{1}{\varphi(m)-1}-\frac{1}{\varphi^2(m)}\right)-\varphi(m)\,\eta(m)\,\rho(n)\left(\frac{1}{\omega(n)}+\frac{1}{\omega^2(n)}\right)$$
$$+\,\eta(m)\,\rho(n)\left(\frac{1}{\omega(n)}+\frac{1}{\omega^2(n)}\right)$$

De donde se obtiene.

$$\mathscr{L}_x^r\mathscr{L}_y^t\left[h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}d\mu,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)\right]$$
$$=\frac{\eta(m)\,\rho(n)}{\omega(n)\,(\varphi(m)-1)}-\frac{\eta(m)\,\rho(n)}{\varphi^2(m)\,\omega(n)}+\frac{\eta(m)\,\rho(n)}{\varphi(m)\,\omega^2(n)}$$

Luego, la solución es.

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}d\mu,\int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right)=e^{\int_0^x e^{-u^{-r}}du}-\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\int_0^y e^{-v^{-t}}dv. \tag{5.20}$$

si r = t = 0, se tiene.$h\left(\frac{x}{e},\frac{y}{e}\right)=e^{\frac{x}{e}}-\frac{x}{e}+\frac{y}{e}$.

Esta solución recupera la forma característica del modelo clásico correspondiente, lo cual evidencia que el enfoque non-conformable preserva los resultados tradicionales como un caso particular.

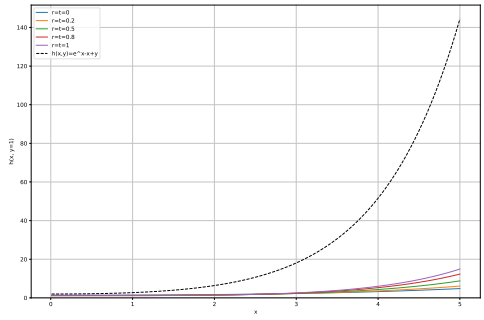



**Figura 3.** Comparación de la función
$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^1 e^{-v^{-t}}dv\right)=e^{\int_0^x e^{-u^{-r}}du}-\int_0^x e^{-u^{-r}}du+\int_0^1 e^{-v^{-t}}dv$ para diferentes valores de $r=t$, con $y=1$. La línea discontinua negra corresponde a $h(x,y)=e^x-x+y$.

En la gráfica de

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}du,\int_0^1 e^{-v^{-t}}dv\right)$$

al fijar $y=1$ se pone de manifiesto el efecto de la transformación integral sobre la variable $x$ y su incidencia en el crecimiento de la función. Cuando $r=t$ toman valores mayores, el crecimiento se vuelve más pronunciado; en cambio, para valores pequeños, este se atenúa.

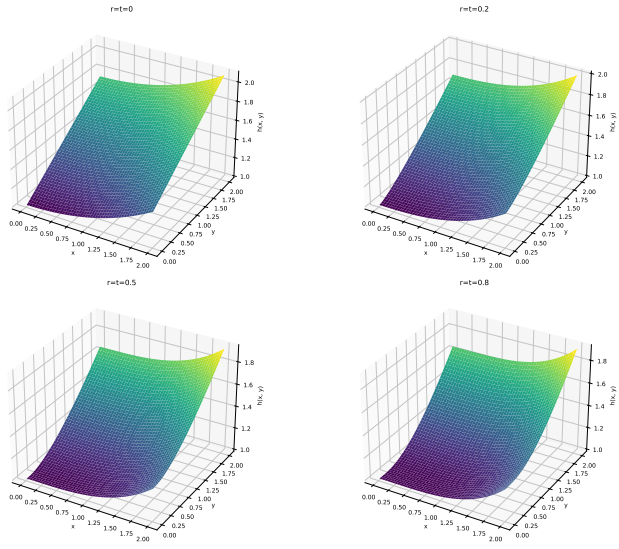



**Figura 4.** Superficies correspondientes a la función $h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}d\mu, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) = e^{\int_0^x e^{-u^{-r}}du} - \int_0^x e^{-u^{-r}}du + \int_0^y e^{-v^{-t}}dv$ para diferentes valores de $r = t$.

Las superficies asociadas a la función

$$h\left(\int_0^x e^{-u^{-r}}d\mu, \int_0^y e^{-v^{-t}}dv\right) = e^{\int_0^x e^{-u^{-r}}du} - \int_0^x e^{-u^{-r}}du + \int_0^y e^{-v^{-t}}dv,$$

permiten observa que el parámetro $r = t$ influye de manera notable en la forma de la función. Cuando $r = t$ toma valores pequeños, el crecimiento respecto a $x$ y $y$ es casi lineal. En cambio, al aumentar $r = t$, el crecimiento en la variable $x$ resulta más gradual cerca del origen y se acelera para valores mayores, mientras que la dependencia en $y$ se mantiene aproximadamente lineal.

## 6. Conclusión

En este trabajo se introduce la Transformada Doble de Laplace Non-Conformable Generalizada, que puede entenderse como una extensión natural de la transformada doble clásica y de sus versiones fraccionarias locales, al incorporar núcleos exponenciales no uniformes junto con funciones generadoras más generales. Este planteamiento permite reunir distintos tipos de transformadas dentro de un mismo marco, recuperándolas como casos particulares.

Además, se examinaron algunas de sus propiedades más importantes, entre ellas las condiciones de existencia y ciertas relaciones derivativas, lo que permite verificar su coherencia teórica y su compatibilidad con las derivadas fraccionarias no conformables. Además, los ejemplos considerados muestran que el método resulta adecuado para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales, facilitando la obtención sistemática de soluciones analíticas.

En conjunto, la transformada propuesta ofrece una herramienta flexible para el estudio de este tipo de problemas. Como trabajo futuro, se pretende extender la aplicación de la NCGDT al análisis de ecuaciones diferenciales parciales fraccionarias non-conformables no lineales, como modelos de reacción-difusión.

## Agradecimientos

Agradecen a la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) y a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE) por el apoyo brindado y por facilitar las condiciones necesarias para la realización

de este trabajo, los autores Simón Adrián Cedeño Mendoza, Harold David Jarrín, Janneth Velasco Velasco y Miguel Vivas Cortez.

## Contribuciones de los autores

Los autores Simón Adrián Cedeño Mendoza, Harold David Jarrín, Janneth Velasco Velasco y Miguel Vivas Cortez participaron conjuntamente en la concepción y desarrollo del proyecto, así como en la redacción y revisión del manuscrito.

## Conflicto de intereses

Los autores Simón Adrián Cedeño Mendoza, Harold David Jarrín, Janneth Velasco Velasco y Miguel Vivas Cortez declaran no tener conflictos de interés. Las instituciones vinculadas no influyeron en el diseño, desarrollo, análisis ni en la publicación de los resultados de este estudio.

## Referencias

Abdeljawad, T. (2015). On conformable fractional calculus. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 279:57–66. https://doi.org/10.1016/j.cam.2014.10.016.

Abdeljawad, T., Younus, A., Alqudah, M. A., and Atta, U. (2023). On fuzzy conformable double laplace transform with applications to partial differential equations. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 134:2163–2191. https://doi.org/10.32604/cmes.2022.020915.

Al-Rab'a, A., Al-Sharif, S., and Al-Khaleel, M. (2022). Double conformable sumudu transform. *Symmetry*, 14:2249. https://doi.org/10.3390/sym14112249.

Alawad, F. A., Yousif, E. A., and Arbab, A. I. (2013). A new technique of laplace variational iteration method for solving space time fractional telegraph equations. *International Journal of Differential Equations*, pages 256593–256603. https://doi.org/10.1155/2013/256593.

Alfaeih, S., Bakcioglu, G., and Misirli, E. (2021). Conformable double sumudu transform with applications. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 7(2):578–586. https://doi.org/10.22055/JACM.2020.35315.2625.

Alfaeih, S. and Misirli, E. (2021). Conformable double laplace transform method for solving conformable fractional partial differential equations. *Computational Methods for Differential Equations*, 9(3):908–918. https://doi.org/10.22034/cmde.2020.38135.1678.

Anastassiou, G. A. (2011). *Advances on Fractional Inequalities*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0703-4.

Atangana, A. and Baleanu, D. (2015). New properties of conformable derivatives. *Open Mathematics*, 13:889–898. https://doi.org/10.1515/math-2015-0081.

Avci, J. D., Iskender, E., and Ozdemir, N. (2017). Conformable heat equation on a radial symmetric plate. *Thermal Science*, 21:819–826. https://doi.org/10.2298/TSCI160427302A.

Deresse, A. T. (2022). Analytical solutions to two-dimensional nonlinear telegraph equations using the conformable triple laplace transform iterative method. *Advances in Mathematical Physics*, 1:4552179. https://doi.org/10.1155/2022/4552179.

Diethelm, K. (2010). *The Analysis of Fractional Differential Equations*. Springer. `https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-14574-2`.

Doetsch, G. (2012). *Introduction to the Theory and Application of the Laplace Transformation*. Springer Science and Business Media. `https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-65690-3`.

González, F., Mohammed, P. O., and Nápoles Valdes, J. (2020). Nonconformable fractional laplace transform. *Kragujevac Journal of Mathematics*, 46:341–354. https://doi.org/10.46793/KgJMat2203.341M.

Gozutok, N. Y. and Gozutok, U. (2018). Multivariable conformable fractional calculus. *Filomat*, 32(1):45–55. https://doi.org/10.2298/FIL1801045G.

Guzmán, P., Langton, G., Lugo Motta Bittencurt, L., Medina, J., and Nápoles Valdes, J. (2018). A new definition of a fractional derivative of local type. *Journal of Mathematical Analysis*, 9(2):88–98. `http://www.ilirias.com/jma/repository/docs/JMA9-2-9.pdf`.

Hashemi, M. S. (2018). Invariant subspaces admitted by fractional differential equations with conformable derivatives. *Chaos, Solitons & Fractals*, 107:161–169. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.01.002.

Honggang, J. and Yanmin, Z. (2022). Conformable double laplace–sumudu transform decomposition method for fractional partial differential equations. *Complexity*, 1:7602254. https://doi.org/10.1155/2022/7602254.

Injrou, S. and Hatem, I. (2022). Solving some partial differential equations by using double laplace transform in the sense of nonconformable fractional calculus. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022:1–10. https://doi.org/10.1155/2022/5326132.

Jarrín, H. D., Marcillo-Parra, J. L., Velasco-Velasco, J., and Vivas-Cortez, M. (2026). Una variación de la transformada doble de laplace non-conformable. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 50(194):213–233. https://doi.org/10.18257/raccefyn.3288.

Khalil, R., Al Horani, M., Yousef, A., and Sababheh, M. (2014). A new definition of fractional derivative. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 264:65–70. https://doi.org/10.1016/j.cam.2014.01.002.

Kilbas, A. A., Srivastava, H. M., and Trujillo, J. J. (2006). *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*. Elsevier. https://shop.elsevier.com/books/theory-and-applications-of-fractional-differential-equations/kilbas/978-0-444-51832-3.

Martínez, F., Mohammed, P. O., and Nápoles Valdes, J. E. (2022). Nonconformable fractional laplace transform. *Kragujevac Journal of Mathematics*, 46(3):341–354. https://doi.org/10.46793/KgJMat2203.341M.

Meddahi, M., Jafari, H., and Yang, X.-J. (2021). Towards new general double integral transform and its applications to differential equations. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. https://doi.org/10.1002/mma.7898.

Mohamed, M. Z., Hamza, A. E., and Sedeeg, A. K. H. (2023). Conformable double sumudu transformations and efficient approximate solutions to the fractional coupled burger's equation. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(3):101879. https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101879.

Nápoles Valdes, J., Guzmán, P., and Lugo, L. (2018). Some new results on nonconformable fractional calculus. *Advances in Dynamical Systems and Applications*, 13(2):167–175. https://www.ripublication.com/adsa18/v13n2p5.pdf.

Ross, B., Samko, S., and Love, E. R. (1994). Functions that have no first order derivative might have fractional derivatives of all order less than one. *Real Analysis Exchange*, 20(2):140–157. https://es.scribd.com/document/698712785/44152475.

Sedeeg, A. H. (2016). The new integral transform "kamal transform". *Advances in Theoretical and Applied Mathematics*, 11:451–458. https://www.ripublication.com/atam16/atamv11n4_14.pdf.

Sedeeg, A. K. H. and Alhamad, A. (2025). Conformable general double transform and its applications for solving conformable partial differential equations. *Sohag Journal of Mathematics*, 12(2):1–17. http://dx.doi.org/10.18576/sjm/120201.

Vivas-Cortez, M., Nápoles, J. E. N., Hernández, J. E., Velasco, J., and Larreal, O. (2021). On nonconformable fractional laplace transform. *Applied Mathematics*, 15(4):403–409. https://doi.org/10.18576/amis/150401.

Vivas-Cortez, M., Velasco, J., and Jarrín, H. D. (2025). A new generalized local derivative of two parameters. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 19(3):713–723. https://doi.org/10.18576/amis/190319.

Watugala, G. K. (1993). Sumudu transform: A new integral transform to solve differential equations and control engineering problems. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 24:35–43. https://doi.org/10.1080/0020739930240105.

Yang, X.-J., Baleanu, D., and He, J.-H. (2013). Transport equations in fractal porous media within fractional complex transform method. *Proceedings of the Romanian Academy Series A*, 14(4):287–292. https://acad.ro/sectii2002/proceedings/doc2013-4/04-Baleanu.pdf.

Özkan, O. and Kurt, A. (2018). On conformable double laplace transform. *Optical and Quantum Electronics*, 50:1–9. https://doi.org/10.1007/s11082-018-1372-9.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):896-902, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.3583

**Ensayo/Assay**

# El renacer del jardín histórico del Observatorio Astronómico Nacional de Colombia

## The revival of the historic garden of the Colombian National Astronomical Observatory

## Resumen

El Observatorio Astronómico Nacional, el primer observatorio moderno de carácter fijo construido en América, fue fundado por José Celestino Mutis en 1803. Se levanta en el corazón histórico de Bogotá y ha sido testigo de más de dos siglos de historia científica y cultural. Relatamos aquí la reciente restauración de su jardín, fruto de una alianza entre el Observatorio y el Jardín Botánico de Bogotá. El proyecto, planificado en 2024 y materializado en 2025, recuperó el valor patrimonial y simbólico del entorno vegetal, inspirándose en las especies estudiadas por Mutis durante la Expedición Botánica. Más de 1.400 individuos, incluidos seis nuevos árboles, reconfiguraron el espacio, combinando ciencia, arte y naturaleza en un diseño paisajístico que honra a los grandes científicos Mutis, Humboldt y Garavito. La intervención no solo devolvió al Observatorio su antiguo esplendor, sino que reafirmó su papel como punto de encuentro entre la astronomía, la botánica y la educación ambiental.

**Palabras clave:** Observatorio Astronómico Nacional; Jardín Botánico de Bogotá, José Celestino Mutis; Patrimonio científico; Restauración; Biodiversidad urbana; Historia de la ciencia; Paisaje cultural; Árboles patrimoniales; Coberturas vegetales.

## Abstract

In the historic heart of Bogotá, the National Astronomical Observatory, founded by José Celestino Mutis in 1803 as the first permanent modern observatory built in the Americas, has witnessed more than two centuries of scientific and cultural history. Here, we recount the recent restoration of its garden jointly undertaken by the Observatory and Bogotá's Botanical Garden. The project, planned in 2024 and completed in 2025, recovered this heritage and the symbolic value of its plant environment, drawing inspiration from the species studied by Mutis during the Botanical Expedition. More than 1,400 plants and six new trees reshaped the space, combining science, art, and nature in a landscape design that honors the great scientists Mutis, Humboldt, and Garavito. The intervention not only restored the Observatory to its former splendor but also reaffirmed its role as a meeting point for astronomy, botany, and environmental education.

**Keywords:** National Astronomical Observatory; Bogotá's Botanical Garden José Celestino Mutis; Scientific heritage; Restoration; Urban biodiversity; History of science; Cultural landscape; Heritage trees; Iconic vegetation cover.

## Un legado de ciencia en el corazón de Bogotá

En el centro histórico de Bogotá, entre las calles empedradas de La Candelaria y los muros que vieron nacer la República, se levanta una edificación octogonal de muros blancos y cúpula gris, el Observatorio Astronómico Nacional de Colombia. Fundado en 1803 por José Celestino Mutis (1732-1808), es el primer observatorio astronómico construido en América y uno de los símbolos más notables del pensamiento ilustrado en el continente (**Gómez-Gutiérrez,** 2024).

La historia del Observatorio ha sido eje central de la historia de la ciencia en Colombia. Concebido por Mutis durante la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada (1783-1816), este edificio fue el punto de encuentro entre la astronomía, la botánica, la

arquitectura y la política en los albores de la Independencia (**Moreno Cárdenas *et al.***, 2022). Desde su inauguración el 20 de agosto de 1803, acto presidido por el virrey Pedro Mendinueta, el observatorio se convirtió en un emblema del conocimiento científico de la Nueva Granada y, más tarde, en el escenario de algunos de los episodios históricos más decisivos del país.

Fue allí, en la sala del segundo piso, donde Francisco José de Caldas (1768-1816) y otros criollos se reunieron la noche del 19 de julio de 1810 para planear la revuelta que al día siguiente daría origen al Grito de Independencia (**Arias de Greiff,** 1993). En esa torre blanca, la observación del cielo se entrelazó con el nacimiento de la nación.

## Dos siglos mirando al cielo

El Observatorio sobrevivió guerras, saqueos y largos periodos de abandono, pero nunca perdió su vocación científica. Después de la muerte de Caldas, la edificación cayó en ruinas hasta que, en 1823, la llegada de la Misión Boussingault, inspirada en parte por la huella profunda que había dejado el viaje de Alexander von Humboldt (1769-1859) a nuestro territorio a comienzos del siglo XIX, revitalizó la investigación científica en el país (**Bateman,** 1953; **Moreno Cárdenas *et al.***, 2022). A lo largo del siglo XIX, el Observatorio fue sede de estudios meteorológicos, mediciones astronómicas y elaboración de almanaques, funciones que lo consolidaron como la primera institución científica del país.

Su resurgimiento más importante llegó bajo la dirección del ingeniero y astrónomo Julio Garavito Armero (1865-1920), quien asumió el cargo en 1892. Desde allí realizó observaciones lunares, estudios de óptica y cálculos de efemérides, y estableció la hora oficial de Colombia. Su obra teórica lo llevó a ser homenajeado en 1970, medio siglo después de su fallecimiento, por la Unión Astronómica Internacional, dándole su nombre a uno de los cráteres de la Luna (**Arias de Greiff**, 1993).

En 1936 el Observatorio pasó a ser parte de la Universidad Nacional de Colombia, y en ese año se fundó la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN) en esta misma sede. Con ello se aseguró la preservación del edificio y su uso académico, convirtiéndose en un laboratorio de enseñanza, investigación y divulgación científica.

Declarado monumento nacional en 1975, el Observatorio también ha sido cuna de instituciones que transformaron la ciencia colombiana, entre ellas, además de la ACCEFYN, se cuentan el Museo Nacional, la Oficina de Longitudes, el Instituto de Meteorología, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y la Sociedad Geográfica de Colombia.

Su arquitectura de inspiración neoclásica, diseñada por el arquitecto y fraile Domingo de Petrés (1759-1811), combina elegancia y funcionalidad científica. Con cerca de 30 ventanas, tres pisos y una cúpula giratoria instalada en la segunda mitad del siglo XIX, fue el edificio más alto de Bogotá en su época, y su estructura octogonal sigue siendo una joya única del patrimonio colombiano.

## El alma verde del Observatorio

El Observatorio Astronómico contó desde su creación con un jardín, que, aunque pequeño en número de individuos, fue denominado como el "Jardín del Observatorio". En la documentación del siglo XIX está nombrado de esa manera en el acervo que posee el Archivo General de la Nación, entidad que custodia el patrimonio documental del país, lo que constituye el mejor reconocimiento de la importancia que se le reconoce como parte del entorno del Observatorio (Figura S1).

Durante el siglo XX, ese entorno cambió radicalmente. Las transformaciones urbanas del centro de Bogotá y la construcción de un parqueadero en la década de 1950 redujeron gran parte del jardín original (**Figura 1**). Aun así, sobrevivieron algunos árboles emblemáticos, como un ciprés (*Cupressus lusitanica*) de más de un siglo de vida, hoy catalogado como árbol patrimonial de Bogotá en la Resolución 2805 de 2023 expedida por la Secretaría Distrital de Ambiente.

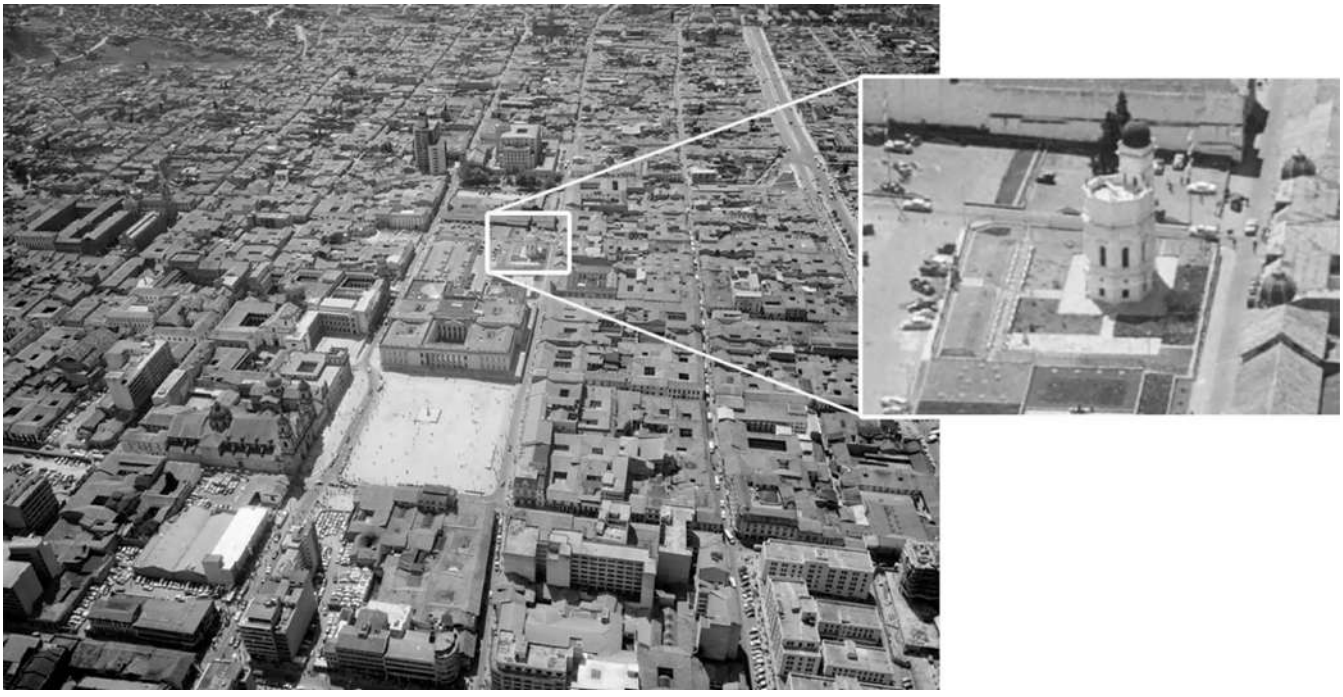


**Figura 1.** Fotografía aérea del centro de Bogotá en la década de 1950, donde se destaca la Plaza de Bolívar. La zona circundante al Observatorio Astronómico Nacional (recuadro), ubicada en lo que antes fueron los predios de la Expedición Botánica, aparece ya profundamente transformada. En esta época, gran parte de ese sector había sido desprovisto de sus jardines históricos y se utilizaba como parqueadero, reflejando las presiones urbanas y el crecimiento desordenado del centro de la ciudad a mediados del siglo XX. Cortesía Museo de Bogotá.

En la documentación oficial del Ministerio de Obras Públicas el espacio aparece nombrado como "Jardín del Observatorio", siendo la institución que a finales del siglo XIX era responsable de su mantenimiento y conservación (antes lo había sido el Ministerio de Fomento). Durante el siglo XX también lo fue, entre otras instituciones, la Sociedad de Mejoras y Ornato de Bogotá, que también mantuvo esa misma denominación. Actualmente, en el expediente que se conserva en la declaratoria del Observatorio Astronómico como elemento identitario de la nación, todavía se señala con ese nombre su jardín. En dicha documentación, el Ministerio de Cultura refleja el valor patrimonial del Observatorio, declarándolo bien de interés cultural del ámbito nacional.

En cuanto a los cambios hechos en este jardín, con motivo del sesquicentenario de la Independencia, a mediados de los años 60 se acometió una primera remodelación: se plantaron nuevos árboles, se construyeron jardineras y se levantó una pérgola central que, con el tiempo, se convirtió en un referente del lugar. En el material suplementario (**Figuras S2 a S8,** https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3583/5334) se incluyen varias fotografías de diferentes épocas en las cuales se evidencia la existencia y evolución de la cobertura vegetal del denominado "Jardín del Observatorio". Sin embargo, el paso de los años y la falta de mantenimiento fueron diluyendo su esplendor.

El jardín que rodea los bustos de José Celestino Mutis, Alexander von Humboldt y Julio Garavito Armero, figuras que simbolizan la unión entre naturaleza, ciencia y nación, pedía una nueva vida. Esa renovación fue posible gracias a una alianza entre el Observatorio Astronómico y el Jardín Botánico de Bogotá.

## Una alianza para hacer florecer la historia

En el 2024 el Observatorio Astronómico Nacional y el Jardín Botánico de Bogotá (JBB) unieron esfuerzos para restaurar e intervenir paisajísticamente el jardín histórico del Observatorio, con el propósito de rescatar su valor patrimonial y fortalecer su conexión

con la ciencia y la biodiversidad.

El proyecto fue liderado por la Subdirección Técnica Operativa del JBB, cuyo equipo de coberturas icónicas realizó un diagnóstico exhaustivo de las condiciones del terreno y la vegetación existente (**Acero *et al.***, 2023a, 2023b). El estudio reveló que las plantas estaban dispuestas sin un patrón claro, sin responder a un diseño paisajístico coherente con la historia y la geometría del Observatorio (**Acero *et al.***, 2024).

La propuesta del Jardín Botánico fue crear un diseño temático y simbólico, inspirado en las especies históricas asociadas a Mutis y a la Expedición Botánica (**Acero *et al.***, 2025). La idea era que la vegetación no solo embelleciera el lugar, sino que contara su historia a través de las plantas.

Entre las especies seleccionadas se incluyeron el clavellino o *Mutisia clematis*, una enredadera descubierta y descrita por Mutis que ahora asciende por la pérgola central; la quina (*Cinchona officinalis*), de cuya corteza se obtenía la quinina; el té de Bogotá (*Symplocos theiformis*), planta emblemática del altiplano, y la feijoa (*Acca sellowiana*), especie suramericana introducida y adaptada a la región andina (**Cadena-Vargas *et al.***, 2021).

Junto a estas especies históricas, se incorporaron plantas ornamentales de intenso colorido: lirio iris, azulina, árbol de jade, hortensia, acanto, escarcha, ajo de rico y cola de zorro, sumando más de 1.400 ejemplares distribuidos en 122 metros cuadrados de áreas ajardinadas.

El diseño paisajístico presentado por el equipo de coberturas icónicas fue socializado con la Universidad Nacional en octubre de 2024 y, una vez aprobado, fue ejecutado por el ingeniero Jorge Rodríguez del JBB. El espacio se organizó en torno a los tres bustos principales, con líneas simétricas y coloridas que evocan la disciplina y la armonía de la astronomía. Las jardineras se trazaron con precisión milimétrica y cada grupo de plantas fue dispuesto según su color, textura y forma para lograr un equilibrio visual con la arquitectura del edificio.

El proyecto también incorporó seis nuevos árboles de especies emblemáticas, té de Bogotá, quina y feijoa, que refuerzan la identidad botánica del jardín y le dan continuidad al legado naturalista de Mutis.

## La siembra de un nuevo símbolo

Entre marzo y abril de 2025, ingenieros, jardineros y técnicos del JBB trabajaron día y noche para ejecutar el proyecto (**Figura 2**). Se removieron 12 metros cúbicos de tierra, se rehabilitaron jardineras antiguas, se restauró la pérgola por parte de la Universidad Nacional de Colombia, y se plantaron los nuevos individuos en jornadas que mezclaron la precisión de la jardinería con la emoción de devolverle la vida a un sitio histórico.

Cada busto recibió su propio entorno simbólico. Alrededor del de Mutis, se plantaron más de 700 ejemplares de ajo (*Allium sp.*) y 300 de escarcha (*Senecio* sp.) y acanto



**Figura 2.** Personal del Jardín Botánico de Bogotá realizando labores de siembra y renovación de las áreas verdes del Observatorio Astronómico Nacional en abril de 2025. Cortesía del Jardín Botánico de Bogotá

(*Acanthus* sp). El área que rodea el busto de Garavito se cubrió con lirios iris de flores azules (*Iris* sp.), su color favorito, también presente en su tumba. Y bajo la sombra de un nogal (*Juglans neotropica*) y una palma de cera (*Ceroxylon quindiuense*), el busto de Humboldt floreció con azulinas (*Plumbago* sp.), hortensias (*Hydrangea* sp.) y árboles de jade (*Crassula ovata*) (**Figura 3**).

El 22 de abril de 2025, Día Internacional de la Madre Tierra, el jardín fue inaugurado oficialmente. La ceremonia reunió a representantes del Observatorio Astronómico Nacional, el Jardín Botánico, la Universidad Nacional de Colombia y la comunidad científica. Durante el acto se destacaron los valores de la alianza interinstitucional, el homenaje a los científicos que cimentaron la ciencia colombiana y el compromiso de ambas entidades con la conservación del patrimonio natural y cultural de la ciudad.

Para el Jardín Botánico este proyecto fue también un tributo a su propio fundador, el padre Enrique Pérez Arbeláez, quien retomó el legado de Mutis en el siglo XX y sentó las bases de la botánica moderna en Colombia. Como señaló la directora del JBB, María Claudia García, "el jardín del Observatorio es un símbolo de cómo la ciencia, la historia y la naturaleza se encuentran para preservar la memoria viva del país".

Con la restauración de su jardín, el Observatorio Astronómico Nacional recupera no solo un espacio verde, sino también una dimensión espiritual, la unión entre el estudio del cielo y el cuidado de la Tierra. Las nuevas plantas y árboles no son solo ornamentales; son una forma de narrar la historia de la ciencia colombiana desde la botánica, la astronomía y el arte.

Los visitantes que hoy recorren el Observatorio pueden apreciar cómo la arquitectura del siglo XIX dialoga con un paisaje contemporáneo diseñado para la contemplación. Las especies seleccionadas enriquecen una de las pocas zonas verdes históricas del centro de la ciudad abiertas al público y prestan servicios ambientales, ornamentales y estéticos para que, como ciudadanos, conozcamos, nos apropiemos y protejamos nuestro patrimonio cultural, incluidos estos pequeños paisajes tan representativos.

El jardín también funciona como un espacio pedagógico y museológico donde los guías pueden relatar la historia del Observatorio a partir de las plantas que lo habitan; la quina que curó fiebres, el té de Bogotá que crece en los Andes, la enredadera *Mutisia* que trepa hacia la luz como metáfora del conocimiento (**Figura 4**).

La renovación paisajística representa una nueva etapa para el Observatorio, institución cuya sede académica se encuentra en el campus de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá y que hoy lidera la formación de estudiantes de posgrado en astronomía y el desarrollo de proyectos de investigación en astrofísica solar y estelar, cosmología y gravitación, agujeros negros, núcleos activos de galaxias, mecánica celeste,



**Figura 3.** Vista del jardín del Observatorio Astronómico Nacional donde se observan, de izquierda a derecha, las áreas recientemente plantadas que rodean los bustos de Julio Garavito Armero, José Celestino Mutis y Alexander von Humboldt. Las fotografías registran el estado de las siembras en noviembre de 2025 y el proceso de recuperación paisajística en torno a estos monumentos. Cortesía del Observatorio Astronómico Nacional



**Figura 4.** En el jardín histórico del Observatorio Astronómico Nacional, la imagen de la izquierda muestra un joven ejemplar de *Cinchona officinalis* (quina), plantado como parte del proceso de recuperación botánica del lugar. A la derecha se observa la primera *Mutisia clematis* en flor, registrada en la segunda semana de noviembre de 2025, cuyo color rojo intenso resalta sobre la fachada del Observatorio. Cortesía del Observatorio Astronómico Nacional

instrumentación, historia de la astronomía y divulgación científica. Así, más de dos siglos después de su fundación, el edificio de Mutis vuelve a ser un lugar donde florecen nuevas ideas con la vitalidad de la ciencia que crece entre las raíces del primer observatorio astronómico de América.

**Germán Darío Álvarez-Lucero[1], Mario Armando Higuera-Garzón[2], Santiago Vargas-Domínguez[2], Julio César Palacios-Rodríguez[1], Elizabeth Herrera-Nariño[1], Richard Javier Quitián-Peña[1], Lizzie Katherine Cordon-López[1], Gonzalo Jiménez-Vargas[2], Juan Alexis Acero-Rangel[1]**

[1] Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Bogotá, Colombia
[2] Universidad Nacional de Colombia, Observatorio Astronómico Nacional, Bogotá, Colombia

## Información suplementaria

Ver la información suplementaria en https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/3583/5334

## Contribución de los autores

Los autores contribuyeron a este trabajo por partes iguales, desde su concepción hasta la documentación, el análisis y la escritura del texto.

## Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflicto de intereses.

## Referencias

**Arias de Greiff, J.** (1993). *La astronomía en Colombia*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

**Acero, J., Álvarez, G., Carvajal, L., Cordon, L., Páez, G., Quitián, R., Palacios, J., Román, Y.** (2023a). *Guía Técnica para la Valoración, Exaltación y Gestión de los Árboles Patrimoniales en el Distrito Capital.* Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.

**Acero, J., Álvarez, Germán., Carvajal, L., Cordon, L., Páez, G., Quitián, R., Palacios, J. & Román, Y**. (2023b). *Guía Técnica para el Reconocimiento, la Valoración y la Gestión de las Coberturas Vegetales Icónicas en el Distrito Capital.* Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.

**Acero, J., Álvarez, G., Cordon, L., Palacios, J., Quitián, R., Román, Y**. (2024). *Evaluación Cobertura Vegetal Icónica Observatorio Astronómico Nacional*. Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.

**Acero, J., Álvarez, G., Cordon, L., Herrera, E., Palacios J., Quitián, R.** (2025). *Diseño Paisajístico Observatorio Astronómico Nacional [OAN]*. Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.

**Bateman, D., A.** (1953). *El Observatorio Astronómico de Bogotá: Monografía histórica con ocasión del 150º aniversario de su fundación*. Universidad Nacional de Colombia.

**Cadena-Vargas, C. E., Sánchez-Callejas, S. D., Velásquez Niño, J.** (2021). Colección viva del Jardín Botánico de Bogotá, Colombia. *Biota Colombiana, 22*(2), 163-172. https://doi.org/10.21068/c2021.v22n02a10

**Gómez-Gutiérrez, A.** (2024). Prehistoria del Observatorio Astronómico Nacional: Registros meteorológicos y astronómicos de José Celestino Mutis y Francisco José de Caldas (1772-1802*). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 48*(186), 178-194. https://doi.org/10.18257/raccefyn.2524

**Moreno-Cárdenas, F., Vargas-Domínguez, S., Cuéllar, J.** (2022). The pioneering scientific endeavor and contributions of José María González Benito (1843-1903), the first Colombian modern astronomer. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 46*(180), 225-239. https://doi.org/10.18257/raccefyn.1754

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):903-904, julio-septiembre de 2026. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.4133

**Carta a la Editora**

# La inteligencia artificial no se ensuciará las manos: ecología, datos y biodiversidad tropical

## Artificial intelligence won't get its hands dirty: ecology, data, and tropical biodiversity.

## Resumen

La inteligencia artificial está transformando la ecología al facilitar la revisión de literatura, el análisis de datos, la identificación de organismos y la escritura científica. Sin embargo, su avance no implica la desaparición del ecólogo, sino una redefinición de su papel. En países tropicales y megadiversos como Colombia, donde persisten grandes vacíos de información sobre especies, ecosistemas y procesos ecológicos, la IA depende de datos que aún deben ser producidos, organizados y validados. Por ello, el trabajo de campo, la taxonomía, las colecciones biológicas, los monitoreos de largo plazo, los experimentos, el ADN ambiental, los sensores remotos y la ciencia ciudadana serán cada vez más relevantes. La IA puede acelerar la detección de patrones y apoyar la interpretación ecológica, pero no reemplaza la observación, la medición ni el conocimiento territorial. La ecología tropical del futuro requerirá tecnología, pero también manos, criterio y presencia en el campo.

**Palabras claves:** Inteligencia artificial; Ecología; Diversidad; Trabajo de campo; experimentos.

Colombia es uno de los países más biodiversos del planeta, pero todavía desconocemos buena parte de esa diversidad. Muchas especies no han sido descritas, numerosos ecosistemas cuentan con pocos registros ecológicos, las series temporales son escasas y una parte importante de la información producida en tesis, colecciones biológicas, inventarios locales y monitoreos permanece dispersa o poco visible. Esta situación no es exclusiva de Colombia. Se repite, con matices, en muchos países tropicales de América Latina.

En ese contexto, la llegada de la inteligencia artificial a la ecología debe mirarse con entusiasmo, pero también con cautela. La IA puede revisar literatura, ordenar bases de datos, reconocer patrones, generar código, realizar pruebas estadísticas, identificar organismos en imágenes y escribir artículos científicos en cuestión de minutos. Podríamos preguntarnos, entonces, si la IA reemplazará a los ecólogos.

La respuesta es que no. Como ocurrió con internet, será una herramienta más, aunque una herramienta especialmente poderosa. Sin embargo, sí cambiará la manera en que hacemos ecología y, quizá, el centro de nuestras contribuciones. La IA no produce por sí sola el conocimiento ecológico que necesita para funcionar. Trabaja con información previamente generada, y en los países tropicales esa información sigue siendo insuficiente, desigual y, muchas veces, mal organizada.

Por eso, la pregunta no debería ser solamente si la IA reemplazará a los ecólogos. Una pregunta más urgente para Colombia y América Latina es otra: ¿qué tipo de ecología queremos construir en la era de la inteligencia artificial? Si nuestros países se limitan a entregar registros de biodiversidad para que otros los analicen, publiquen y conviertan en productos tecnológicos, la IA podría ampliar desigualdades ya existentes en la ciencia global. La biodiversidad tropical no debe convertirse únicamente en materia prima digital.

El desafío es distinto. Necesitamos fortalecer nuestra capacidad para generar, cuidar e interpretar datos ecológicos propios. Esto implica apoyar expediciones, taxonomía, colecciones biológicas, monitoreos de largo plazo, establecimiento y seguimiento de parcelas

permanentes, experimentos en mesocosmos, aprovechamiento de sensores remotos, ADN ambiental, ciencia ciudadana y bases de datos abiertas, pero bien gobernadas. También implica valorar datos pequeños pero rigurosos: una tesis de pregrado, un inventario municipal, una colección regional o un monitoreo comunitario pueden ser fundamentales si están bien documentados y validados.

La IA no se ensuciará las manos tomando muestras de suelo. Tampoco se mojará en el río ni en la ciénaga. No sentirá frío en el páramo ni será picada por mosquitos en un manglar. No decidirá dónde muestrear, no reconocerá siempre un dato improbable, no conversará con las comunidades locales ni comprenderá por sí misma la historia ambiental de un territorio. Puede ayudarnos a detectar patrones y a trabajar con mayor rapidez, pero necesita que alguien observe, mida, colecte, experimente, preserve, contraste e interprete.

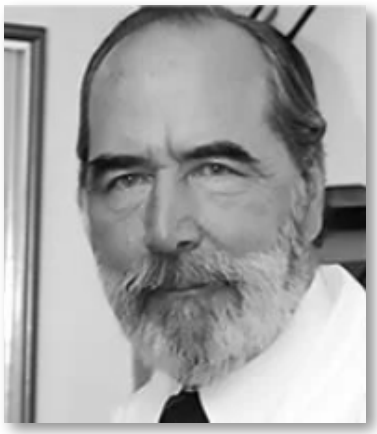
En la era de la inteligencia artificial, el papel del ecólogo colombiano y latinoamericano no será menor. Será distinto y quizá más importante. No se tratará solo de escribir más rápido ni de analizar más datos, sino de hacer mejores preguntas, producir información confiable, proteger su integridad y asegurar que el conocimiento sobre nuestra biodiversidad sea construido también desde nuestros territorios.

La inteligencia artificial puede ayudarnos a hacer ecología. Pero no hará ecología tropical sin quienes conocen, recorren y estudian los ecosistemas tropicales.

**Alfonso Pineda**
Escuela de Biología, Universidad Industrial de Santander, Edificio Camilo Torres, Bucaramanga, Colombia
Número telefónico: 607 – 6344000 ext. 1822
alpinbar@uis.edu.co

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):905-906, julio-septiembre de 2026.

## In Memoriam



# Jaime Bernal Villegas, MD PhD

Jaime Bernal Villegas fue un referente único en la historia de la ciencia y la medicina en Colombia. Nacido en 1950 en el hogar de Eduardo Bernal Arango y Consuelo Villegas Vélez en Bogotá, alcanzó a conocer a su abuelo, don Pedro Bernal Escobar, quien fue un reconocido promotor del cultivo del café y su institucionalización en Colombia.

Tras su formación primaria y secundaria en el Gimnasio Campestre —del que llegaría a ser rector años después—, cursó estudios de medicina y cirugía en la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá. Al finalizar sus estudios de pregrado viajó a Inglaterra en donde obtuvo un PhD en Genética Humana en la Universidad de Newcastle-upon-Tyne. Al regresar al país en 1980, fundó la Unidad de Genética Clínica en el departamento de Patología de la Facultad de Medicina de la Pontificia Universidad Javeriana, y allí inició la labor docente y de investigación que mantuvo por espacio de muchos años. Paralelamente ejerció la práctica de la genética clínica y fundó la Red Colombiana de Medicina Genética (PREGEN), con el propósito de ofrecer el tamizaje neonatal a cada recién nacido y detectar eventuales anomalías de origen genético, muchas de estas tratables si son detectadas a tiempo.

En la Javeriana ideó y dirigió la Expedición Humana en los años 90 del siglo pasado, labor multidisciplinaria de estudio y descripción de la diversidad genética y cultural de Colombia, publicando decenas de artículos, en especial la serie *Terrenos de la Expedición Humana* con diversas aproximaciones científicas y sociales a las comunidades aisladas del país. Pasó después, siempre en función académica, a ser rector del colegio Gimnasio Campestre y luego de la Universidad Tecnológica de Bolívar, antes de apoyar el área de la investigación molecular en la Universidad del Sinú en Cartagena.

Fue miembro del Consejo Nacional de Biotecnología y jefe del Programa Nacional de Ciencia y Tecnología de la Salud de Colciencias; director del Instituto de Genética Humana de la Facultad de Medicina de la Pontificia Universidad Javeriana; miembro y coordinador del Consejo Nacional de Acreditación en el Ministerio de Educación; miembro del Consejo de Regentes de la Universidad Javeriana y miembro de las juntas directivas de la Fundación Social, Colmédica e Icetex.

El Doctor Bernal fue elegido miembro correspondiente de la Academia Nacional de Medicina, en donde fue editor de la revista *Medicina*, de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, de la Academia de la Historia de Cartagena de Indias, así como miembro honorario de la Academia de Medicina de la misma ciudad.

En el curso de su vida publicó más de doscientos cincuenta artículos científicos y treinta libros[1], y por su trabajo recibió una variedad de distinciones, entre las que se cuentan un Doctorado Honoris Causa de la Universidad Hermilio Valdizán del Perú, el Premio Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Fundación

[1] https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=FDEYgoEAAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate

Alejandro Ángel Escobar, el Premio al Colombiano Ejemplar, la Orden Francisco Hernández de la Panamerican Federation of Medical Schools, la Orden Universidad Javeriana, la Medalla de Servicios Distinguidos de la Policía Nacional, la Henley International Lecture de la Universidad de Alabama, la Lawton Chiles Lecture del Lawton Chiles Center (Atlanta-Washington-Tampa) y la categoría de Investigador Emérito de Colciencias, entre otros.

Jaime Bernal Villegas dejó una importante estela de discípulos en el área de la genética clínica y de la genética de poblaciones, con un énfasis característico en su dimensión social. Dedicó su vida a la investigación científica y a la formación, desde el preescolar hasta el doctorado, de cientos de colombianos que se beneficiaron de sus luces y su generosidad.

**Alberto Gómez Gutierrez**
Académico de Número, Academia Colombiana de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
50(196):907-910, julio-septiembre de 2026.

## In Memoriam



# Elizabeth Hodson de Jaramillo (1948-2026)

**Miembro correspondiente 2004 - Miembro de número 2018. Ex silla 22**

El 26 de junio de 2026 recibimos la triste noticia de la partida de Elizabeth… Bacterióloga de profesión y bióloga de corazón, Elizabeth terminó estudios de bacteriología en la Pontificia Universidad Javeriana en 1968 y en 1973 hizo una maestría en Fisiología y Genética Vegetal en el programa ICA-Universidad Nacional, en cuyo curso investigó el metabolismo de las solanáceas y sus factores de resistencia a las heladas. Allí descubrió que lo suyo era el mundo de las plantas. Trabajó brevemente en Tunja como profesora asistente de la Facultad de Agronomía de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, así como en la carrera de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia. A finales de los años 70 llegó al Departamento de Biología de la Pontificia Universidad Javeriana, donde en 1997 fue nombrada Profesora Titular y en el 2008 Profesora Emérita.

Conocí a Elizabeth en la Javeriana, yo era estudiante de Biología y ella profesora de fisiología vegetal. Desde entonces admiré su sabiduría, su capacidad para trasmitir conocimientos a través de la docencia, su entusiasmo y su pasión por la investigación, que contagiaba a alumnos y colegas. Desde su llegada a la Javeriana se propuso fortalecer tanto la investigación como la docencia en microbiología agrícola y fisiología vegetal.

Su dedicación al trabajo universitario la llevó a participar en 1987 en el Simposio Permanente sobre la Universidad (SPSU), creado a finales de los años 70 bajo el liderazgo de ASCÚN, y que entonces coordinaba el padre Alfonso Borrero S.J. Ello le permitió comprender las dinámicas propias de la universidad en la sociedad. Años más tarde, a finales de los años 90, terminó su doctorado en fisiología vegetal en la Universidad de Nottingham con una investigación centrada en la manipulación genética de plantas de *Passiflora edulis* para desarrollar su resistencia a los virus que afectaban su producción comercial. Su trayectoria científica la convirtió en referencia nacional e internacional en ingeniería genética y bioseguridad, campos desde los que contribuyó al desarrollo de la ciencia en el país.

Recordar la vida de Elizabeth es rememorar momentos de grandes cambios en la Facultad de Ciencias de la Javeriana. Elizabeth asumió la dirección de la carrera de Biología entre 1986 y 1991 y le dio un giro renovador al programa con la implementación de reformas orientadas a profesionalizar la docencia a través de la investigación para el fortalecimiento de ambas. Ella tenía claro que la enseñanza debía transmitirse de forma vivencial a través de la investigación. Para Elizabeth era evidente que los profesores debían ejercer activamente la investigación de las disciplinas que enseñaban en el aula. Además, reestructuró la planta de personal docente del Departamento para fortalecer las áreas de botánica y sistemática inicialmente y, posteriormente, las áreas de zoología, fisiología vegetal y ecología, gestionando la vinculación de investigadores provenientes de la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de los Andes y de egresados de la Javeriana. Estos cambios le permitieron desarrollar un programa de reorientación curricular a través de una revisión de los contenidos del plan de estudios de la carrera para orientarla hacia el trabajo de campo, la investigación formal y el estudio sistemático de la biodiversidad en el país.

Simultáneamente asumió el liderazgo del Departamento de Biología en dos administraciones independientes: de 1986 a 1992 y del 2000 al 2006. En su primera administración Elizabeth gestionó con éxito la construcción de nueva infraestructura para el departamento de Biología y, por ende, para la Facultad de Ciencias. En aquella época, en los años 80, se carecía de laboratorios debidamente dotados para la investigación, y ella, con su tenacidad y su esfuerzo, incentivó la formulación de programas de financiación interna y externa destinados específicamente a la dotación de laboratorios diseñados bajo normas de seguridad y especificaciones técnicas exclusivas para laboratorios de investigación. El resultado fue la construcción del primer complejo de edificios dedicados a laboratorios de investigación en Biología y otros departamentos de la Facultad.

Bajo su mirada acuciosa se formalizaron las primeras unidades de investigación del departamento, que hoy continúan liderando la investigación y se han multiplicado: la Unidad de Biología Vegetal (UBV), con énfasis en la propagación de especies forestales vía cultivo de tejidos y en el estudio de las micorrizas. En sus inicios esta fue liderada por Elizabeth, y más adelante, en el 2010, dio origen a dos grupos de investigación que funcionan actualmente, el de Biología de Plantas y Sistemas Productivos y el de Agricultura Biológica. La Unidad de Ecología y Sistemática (UNESIS), creada bajo el "Programa de investigaciones para el desarrollo de la Ecología y la Sistemática en la Pontificia Universidad Javeriana, Convenio Colciencias - Universidad Javeriana, y la Unidad de Biotecnología y Saneamiento Ambiental (USBA), enfocada en sus inicios en la evaluación de sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales, pero que hoy incluye nuevas líneas de investigación. Después se conformaron otras unidades de investigación que han seguido el camino trazado por ella en los años 90.

Elizabeth trabajaba en diferentes frentes. Consciente de la necesidad de fortalecer la escritura y la publicación de artículos científicos en la Facultad, fundó en 1987 la revista científica oficial de la Facultad de Ciencias, *Universitas Scientiarum* (ISSN: 0122-7483; E-ISSN: 2027-1352) y ejerció como su primera editora en jefe entre 1987 y 1988. Hoy la revista es una importante publicación multidisciplinaria dedicada a la promoción de los avances recientes en todos los campos de las ciencias exactas y naturales.

Sin duda otro de sus aportes notables fue su contribución a la estructuración de las políticas de investigación en la Universidad. A finales de los años 80, Elizabeth hizo parte del primer Comité Central de Investigaciones, iniciativa creada bajo la administración del rector, el Padre Jorge Hoyos, S.J., y coordinada por el Padre Jairo Bernal, S.J. Fruto de este trabajo fue el diseño de las primeras pautas, reglamentos y políticas que instauró la Javeriana para la investigación en diferentes facultades y que abrió el camino para la implementación formal de la investigación en la Universidad como práctica complementaria de la docencia.

Su gran pasión fue la biotecnología, como lo demuestra su papel pionero en la investigación en ese campo en el país, siempre a partir del mundo de las plantas, pero sin desconocer otros ámbitos relevantes. Los estudiantes de Ciencias de la década de los 80 empezábamos a escuchar esta palabra, pero la sentíamos lejana a nuestra realidad. Elizabeth la acercó a nosotros al asumir la dirección del Programa Nacional de Biotecnología de Colciencias (1992 – 1998), dejando una hoja de ruta para posicionar la biotecnología como área prioritaria de investigación y desarrollo en Colombia y en América Latina.

Después de finalizar su paso por Colciencias y habiendo culminado su doctorado (1999), regresó a la Javeriana donde asumió nuevamente la dirección del departamento entre 2000 y 2006. En el 2004 fue nombrada miembro

correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN). Para ese entonces, Elizabeth se perfilaba como experta en evaluación y manejo de riesgo del Protocolo de Cartagena en Bioseguridad, y participó activamente en el grupo de expertos técnicos *ad hoc* (*ad hoc technical expert group*) de este Protocolo y del Convenio de Diversidad Biológica (CDB). Entre 2004 y 2007 coordinó el Proyecto GEF-BM Bioseguridad Colombia desde el Instituto Alexander von Humboldt y ejerció otras coordinaciones relacionadas: coordinadora de la secretaría de Bioseguridad de la Fundación REDBIO International FRI (2011-2013) y coordinadora regional de comunicaciones y capacitación del Proyecto GEF-BMLAC-Biosafety (Brasil, Colombia, Costa Rica, Perú). Después empezó una nueva etapa de trabajo como socia honoraria del Comité Científico de la Fondazione Scuola Medica Salernitana (Italia) en el 2012 y miembro de la Comisión Mundial de Ética del Conocimiento Científico y la Tecnología de la UNESCO (COMEST) en el 2016.

En el 2018 fue nombrada Miembro de número (Ex silla 22) de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, ACCEFYN. Se posesionó dictando una conferencia titulada "Bioeconomía: el futuro sostenible", con la cual descubre otra gran pasión suya, la bioeconomía, que resalta el valor de la ciencia en el desarrollo a través del uso sostenible de la biodiversidad.

En el 2019 participó en la Misión Internacional de Sabios Colombia, cuyo reto fue plantear políticas, estrategias y recomendaciones para el desarrollo sostenible a largo plazo, la competitividad y la inclusión, haciendo hincapié en la investigación, la creación y la colaboración sectorial. Elizabeth contribuyó a unificar conceptos y visiones para el desarrollo de la bioeconomía que respondieran a las necesidades del país y se enfocaran en el conocimiento como base del desarrollo sostenible y el bienestar de Colombia.

Su trayectoria académica, su visión y su compromiso con el país y la región, le permitieron desarrollar consultorías en el campo de la bioeconomía que la llevaron a proponer diferentes proyectos, entre ellos, la Cátedra IICA en Bioeconomía y Desarrollo Sostenible, la Cátedra UNESCO en Biotecnología y Objetivos de Desarrollo Sostenible (UTP – Universidad del Quindío – Universidad de Caldas – Universidad Nacional de Colombia, Manizales – CIRAD). Además, trabajó como miembro del Scientific Group for the UN Secretary-General's Food Systems Summit en el 2021 y ejecutó múltiples asesorías en Agrobiotecnologías y Bioseguridad de los organismos genéticamente modificados (OGM), en Biodiversidad y en Bioeconomía, entre las que cabe destacar la construcción de la Agenda Cuatrienal de Bioeconomía para el Instituto Sinchi, 2021; la consultoría para Technopolis Group como experta de alto nivel en el Proyecto "Asesoría en Políticas de I&D+I" enfocado en apoyar a los países de Centroamérica y el Caribe (CELAC) en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en 2018; la consultoría para la F.A.O. como instructora para cursos de Bioseguridad y Biotecnologías desde el 2002 y para la formulación de actividades de desarrollo agrícola desde el 2006; y la consultoría del Proyecto de la OEA "Regulaciones de Bioseguridad en América Latina y el Caribe en el marco del Protocolo Internacional de Bioseguridad", subproyecto de "Lineamientos para un programa Nacional de Capacitación en Bioseguridad en Colombia. 2002-2003".

Elizabeth deja un gran legado reflejado en numerosas publicaciones científicas, técnicas y de política centradas en los temas de la biotecnología, la bioeconomía y la biodiversidad. Editó 22 libros, presentó 33 capítulos científicos en libros y publicó más de 50 artículos científicos, sin mencionar sus continuas participaciones en encuentros, charlas, simposios y congresos en los cuales compartió generosamente

su sabiduría a lo largo de varias décadas. Sin duda contribuyó de forma integral al desarrollo de la biotecnología y dedicó su vida a enseñarnos que la ciencia debe estar al servicio de la sociedad y no lo contrario.

Recordar a Elizabeth es regresar a aquellos años en que, guiados por su mirada visionaria y su fe en el futuro del país, nos animaba a continuar estudiando, a creer en nuestros sueños, a construirlos con tenacidad, ética y rigor, a no desfallecer en la adversidad cuando nada parecía funcionar y la esperanza parecía lejana. Ella estaba presente para recordar nuestro compromiso repitiendo la frase *"Quien no vive para servir, no sirve para vivir"*.

Recordar a Elizabeth es agradecer la fortuna que tuvimos quienes la conocimos, fuimos sus alumnos, colegas, amigos y compañeros en la Academia.

Elizabeth, gracias por todo. Su recuerdo siempre vivirá en mi corazón.

**Sandra Baena**
Miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
50(196):911-924, julio-septiembre de 2026.

# A nuestros lectores y autores

## Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias biomédicas, ciencias del comportamiento (filosofía, sicología, antropología, sociología), ciencias físicas, ciencias naturales (biología, microbiología, botánica, zoología, ecología) ciencias químicas, ciencias de la tierra (geología, medio ambiente) y matemáticas.

Está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (*International Center for Scientific Research), Current Mathematical Publications,* EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, *Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record*. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 41 volúmenes.

## Proceso de evaluación por pares

Se recibirán solo los manuscritos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los manuscritos serán evaluados en primera instancia por el editor y los editores asociados de la disciplina correspondiente.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, quienes evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración aproximada de 90 días.

Los pares académicos pueden adoptar alguna de las siguientes tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a un tercer evaluador.

En cualquiera de los casos, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo dentro de las cuatro semanas siguientes. Además, deberá enviar un documento en el que responderá, una a una, todas las observaciones señaladas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, se entenderá que los autores han retirado el manuscrito en su forma actual y, si se remitiera de nuevo, el Comité Editorial de la Revista lo considerará cómo un nuevo trabajo.

Los trabajos que sean aceptados se considerarán como propiedad de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales** y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

## Ética de la publicación

**La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RACCEFYN),** acoge la normatividad internacional definida por el *Committee on Publication Ethics* (COPE). Algunas normas se pueden consultar en:

COPE guidelines on good publication practice: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/

COPE code of conduct: https://publicationethics.org/resources/code-conduct

Ver documento pdf (anexo)

## Política de acceso abierto

La página web de la Revista (**www.raccefyn.co**) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, el acceso y la difusión de la producción científica.

## Directrices para autores

***Tipología de los artículos publicados en la Revista***

**Artículos originales o artículos de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene los siguientes apartes importantes: introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

**Artículos cortos:** documentos breves que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica y, que, por lo general, requieren de una pronta difusión.

**Artículos de posesión o artículos de revisión de tema:** documentos resultantes de una investigación donde se analizan crítica y sistemáticamente, a la par que se integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, centradas en un campo de la ciencia o la tecnología, con el fin de dar cuenta de sus avances y sus tendencias de desarrollo. Presentar un artículo de revisión constituye un requisito para que un Académico pueda posesionarse como miembro correspondiente o de número.

**Cartas al editor:** posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del Comité Editorial, constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.

**Comentarios bibliográficos:** son escritos críticos breves sobre libros recientes publicados en las disciplinas de interés de la Revista.

**Corrección de los autores**

**Fe de erratas**

## Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales y de alto nivel, escritos en inglés o español, y que traten sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedarán como propiedad permanente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo la internet. (Ver transferencia derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia aceptará mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original, que no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado para aparecer en otra publicación impresa o electrónica y que, además, ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista. Igualmente, que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad. (Ver formatos declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: http://www.raccefyn.co).
3. La participación de los autores en el trabajo deberá ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad por los aportes de cada cual. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, quienes deberán ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres. Finalmente, el manuscrito debe contener un párrafo en el que se detallará la contribución de cada uno de los autores.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplan con los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deberán aparecer en la sección de *Agradecimientos*, pero no serán citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deberán aparecer en los *Agradecimientos*.
5. La terminología debe regirse por el Código Internacional de Nomenclatura Botánica. La terminología física, química o bioquímica, deberá seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deberán usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos deberán ser escritos en la forma recomendada por el *Internacional Code of Botanical Nomenclature* y por el *International Committee on Systematics of Prokaryotes* o ICSP.

## Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deberán ser enviados a través de **http://www.raccefyn.co**
El manuscrito incluirá además de la página correspondiente al título, el resumen, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de las figuras, todos los cuales deberán estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No debe olvidarse el usar la numeración en todo el manuscrito. Extensión máxima de 30 páginas, entre 5.000 a 8.000 palabras.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una hoja de presentación, página en Word con los nombres y apellidos (si desea poner el segundo apellido, debe ir separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grado académico), filiaciones y correos electrónicos. Agregar aquí un párrafo en el que los autores declaren su aporte personal al manuscrito bajo consideración.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés (máximo 30 palabras, 165 caracteres)
3. Título corto (máximo 10 palabras, 50 caracteres)
4. Resumen en español e inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis, separadas por punto y coma.
6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico, dirección electrónica y código ORCID. *Open Researcher and Contributor* ***ID*** **(**Identificación del Investigador y del colaborador abierto)
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores y códigos ORCID *Open Researcher and Contributor* ***ID***.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo en conjunto con las leyendas de las figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales y con una resolución mayor a 300 dpi (*dots per inch*).
9. El número máximo de tablas y figuras es de 7. Para enviar información adicional se puede emplear la sección de *Información suplementaria* debidamente referenciada en el texto: tabla 1S, 2S, etc.; figura 1S, 2S, etc.

## Estructura del manuscrito

**Introducción:** se debe mostrar el marco teórico en el cual se inscribe el tema de la investigación, propósito del artículo y justificación del estudio indicando, además, la delimitación de la pregunta problema.

**Materiales y métodos:** se describirán los sujetos de observación o experimentación, aparatos o dispositivos y metodologías empleadas en el estudio. La descripción de la metodología debe tener referencias de los métodos usados.

**Análisis estadístico:** señalar los métodos estadísticos utilizados y la manera de analizar los datos.

**Resultados:** deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y las figuras acompañadas de una explicación y análisis de las mismas.

**Discusión:** debe hacerse énfasis en los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastando los resultados con la información pertinente disponible en literatura actualizada y relacionar las conclusiones con los objetivos propuestos. Se deben incluir las implicaciones y limitaciones de los hallazgos y comparar las observaciones relevantes con las de otros estudios.

Los resultados y la discusión pueden presentarse también en forma combinada, en cuyo caso la sección se denominará *Resultados y Discusión*.

**Conclusiones:** deberán responder al objetivo de la investigación reportada e incluir el planteamiento de objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

**Referencias:** todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre entre paréntesis el apellido del primer autor y el año de publicación. Si el apellido del autor o autores forma parte de la estructura formal de la frase, sólo se pondrá entre paréntesis la fecha; por ejemplo: Pérez y Ribas (1996). Si no forma parte de la estructura formal del texto, por ejemplo: ... como indica Barbudo (2003). Si son solo dos autores se pondrán los dos apellidos, si son más de dos sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo "*et al*."

La Revista ACCEFYN utiliza las normas del Manual APA, estas emplean un sistema de citación de autor-fecha.

**Lista de referencias.** Se organizan alfabéticamente y se citan de la siguiente manera:

***Artículo de revista***

**Apellido, A. A., Apellido, B. B., Apellido, C. C.** (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen:** pp-pp.

Ejemplo

**Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L.** (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. Nat Med., **7:** 33-40.

***Libro***

**Apellido, A. A.** (Año). Título. Ciudad, País: Editorial

Ejemplo

**Salisbury, F. B., Ross, C. M.** (1994). Fisiología Vegetal. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

***Capítulo de libro***

**Apellido, A. A., Apellido, B. B.** (Año). Título del capítulo o la entrada. En A. A. Apellido. (Ed.), Título del libro (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Ejemplo

**Guba, E.G.** (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. La enseñanza: Su teoría y su práctica (148-165). Madrid, España: Akal.

***Revista en línea***

**Apellido, A. A.** (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen** (número): pp-pp. Disponible en: http://www...

Ejemplo

**Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G.** (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. Biotropica, **10** (2): 110-121. Disponible en: http://www.jstor.org/pss/2388013.

**Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P.** (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. J Cereb Blood Flow Metab. doi: 10.1177/0271678X16662476

***Citas páginas web***

Anotar la fecha de la consulta

Ejemplo

**Guiry, M.D., Guiry, G.M.** (2015). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Disponible en http://www.algaebase.org., accedida entre enero y junio de 2015.

**Tablas y figuras:** las tablas y cuadros se denominarán tablas y llevarán numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilizar las letras minúsculas del alfabeto según orden de aparición en la respectiva tabla: a, b, c, d, e, etc.

Las fotografías, gráficos, dibujos y esquemas se denominan todos como Figuras, las cuales se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se describen en hoja separada. Si se trata de micro-fotografías debe indicarse el aumento utilizado. Las personas, o sus nombres, no deben ser identificables en las fotografías pero se requiere permiso escrito para su publicación.

Cuando las tablas y figuras hayan sido tomadas de revistas o libros, sean impresos o electrónicos, se debe especificar la fuente y adjuntar autorización de la respectiva publicación para su reproducción.

**Agradecimientos:** podrán ser expresados a personas o entidades que hayan ayudado en la realización del trabajo. Se mencionarán las personas y el tipo de ayuda aportada, así como las entidades, instituciones o fundaciones que hayan financiado o suministrado materiales. En caso de proyectos de investigación financiados será suficiente con mencionar el código de registro y la entidad, institución o fundación que lo apoyó económicamente.

## Consideraciones

Los trabajos aceptados son propiedad de la Revista ACCEFYN y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

## Corrección de estilo y publicación del manuscrito

Una vez aceptados los artículos, éstos se enviarán a corrección orto-tipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará el registro de cada una de las sugerencias llevadas a cabo y los comentarios o dudas para que el autor o los autores aprueben y contesten apropiadamente.

La versión corregida deberá ser enviada nuevamente para su aprobación definitiva en un plazo mínimo de 48 horas. El manuscrito deberá ir con una carta al editor, informando cuales correcciones fueron procesadas. El editor le informará al autor la fecha aproximada y el número del volumen en el que el trabajo será publicado.

## Rectificaciones y correcciones de errores

Las rectificaciones sobre la información suministrada por parte de los autores, se harán en el número inmediatamente posterior al anuncio de las mismas y serán responsabilidad de los mismos autores. La Revista se encargará de publicar una nota aclaratoria a manera de erratas. En el caso que sean necesarias mejoras y corrección de errores orto-tipográficos, de manejo visual de la información o de imprecisiones involuntarias, el o los autores podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan efectuarse en las versiones electrónicas de la Revista.

## Falsificación de artículos

Si en el proceso editorial se encuentra falsificación, omisión de datos, duplicidad del artículo o plagio, se devolverá el original al autor con la debida notificación a su institución patrocinadora, centro de investigación o universidad.

## Conflicto de intereses

Si los autores o coautores, editores o revisores (evaluadores) tienen algún conflicto de intereses que pueda de alguna manera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, tal conflicto debe ser declarado.

Los conflictos de interés más evidentes son los llamados conflictos financieros, resultado de relaciones entre empleador-empleado, financiaciones y patentes, así como también honorarios, consultorías, investigación pagada por compañías que dependen de los resultados investigativos, entre otros.

También existen los conflictos personales resultado de amistades o animadversiones, competencias académicas y pasiones en el campo intelectual o moral (por ej. parientes en una compañía que se beneficiaría de los resultados que se van a publicar, el uso de los resultados publicados para promoción inmediata basada en el artículo publicado, creencias religiosas que estén en conflicto directo con la investigación que se va a publicar, entre otros).

## Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También pueden publicarse el título del trabajo, resumen, tablas y figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, también dando el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN.

b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.

c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.

d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.

e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

## Aviso de derechos de autor

Los autores certifican que son los creadores originales del trabajo y declaran que:

a) Los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y,

en los casos que así lo requieran, se cuenta con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales.

b) Todos los materiales que se presentan están totalmente libres de derecho de autor y, por lo tanto, el autor de la correspondencia se hace responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de responsabilidad a la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

c) El trabajo es inédito y no será enviado a otras revistas mientras se espera la decisión de los editores de tal revista. El primer autor declara que no existe un posible conflicto de intereses en este manuscrito.

d) En caso de ser publicado, los autores del artículo transfieren todos los derechos de autor a la Revista ACCEFYN, sin cuyo permiso expreso no podrá reproducirse ninguno de los materiales publicados en la misma.

e) A través de este documento, y si el trabajo es aceptado para su publicación, la Revista ACCEFYN asume los derechos para editar y publicar los artículos en índices nacionales, e internacionales o bases de datos con fines académicos y científicos no comerciales en medios impresos, electrónicos, Internet en texto completo o cualquier otro medio conocido o por conocer con respeto de los derechos de autoría.

## Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También se pueden publicar el título del trabajo, el resumen, las tablas y las figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, dando también el crédito a la revista de ACCEFYN.

b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.

c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y de los coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.

d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.

e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

## Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico incluidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros ni serán usados con otros fines.

## Lista de comprobación para la preparación de envíos

Como parte del proceso de envíos, los autores están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

**1. Carta de sometimiento del artículo, donde informa que todos los autores han leído, aprueban y declaran que:**

- Están de acuerdo con el manuscrito remitido, en su contenido, organización y presentación.
- El trabajo es original, el cual no ha sido publicado previamente y, de igual forma, no se someterá a otra revista hasta conocer la respuesta del Comité Editorial.
- En caso de ser aceptado el manuscrito, se autoriza su publicación bajo las normas establecidas por la revista.

- El documento no cuenta con texto o figuras que tengan reserva de derechos y si los tuviere se cuenta con la autorización escrita para su reproducción.
- El documento no contiene citas o transcripciones de obras que carezcan de referencias bibliográficas debidamente citadas.
- Se incluye un párrafo donde los autores declaran cuál fue el aporte de cada uno de ellos al documento.
- Esta carta firmada debe ser adjuntada en el paso 4 del presente proceso de envío en formato PDF.

**2. Presentación**

- Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo, apellido y segundo apellido separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grados académicos), filiaciones y correos electrónicos.
- Título completo del manuscrito en español e inglés y titulo corto.
- Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
- Direcciones electrónicas de todos los coautores.
- Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras. Figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales.

**3. Estructura del artículo.** Se incluyen

- El resumen en español e inglés (Abstract).
- Las palabras clave (máximo 6) en español e inglés (Keywords).
- Introducción.
- Materiales y métodos.
- Resultados y Discusión para comunicaciones cortas.
- Discusión.
- Agradecimientos a colaboradores y/o instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.
- Referencias.
- Declaración de conflicto de interés.

**4 Información adicional: figuras**

- Se incluyen como archivo independiente, cada figura en página aparte.
- Se incluyen las leyendas correspondientes al final del original. Estas figuras deberán ser cargadas en el paso 4 del presente proceso de envío en formato JPG o TIF.

**5. Información adicional: tablas**

- Se incluyen al final del original, elaborados en el modelo más sencillo de tablas del programa Word.
- Se ordenan secuencialmente.
- Se incluye el título correspondiente.

**6. Referencias**

- Se han seguido las normas de la revista de ACCEFYN en las instrucciones a los autores.

**7. Abreviaturas:**

- Se introducen entre paréntesis la primera vez que se usan.

**8. Nomenclatura:**

- Los nombres de género y especie están en letra cursiva.
- Los nombres de microorganismos, plantas y animales se escriben completos la primera vez que se citan, en el título y en el resumen.

**9. Ética**

- Todos los autores conocen y aprueban la presentación del manuscrito, su contenido, la autoría y el orden de la autoría.
- El manuscrito ha sido postulado solo a la Revista ACCEFYN y no se encuentra postulado ni ha sido publicado en otra revista.
- Si el artículo incluye la investigación en humanos o con animales se han seguido las directrices de la Declaración de Helsinki y el uso de primates no humanos en la investigación.
- Se incluye los agradecimientos a las instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.

**10. Revisores**

Se suministran indicaciones sobre tres o cuatro posibles revisores con sus nombres completos, formación académica y direcciones de correos electrónicos.

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
50(196):911-924, julio-septiembre de 2026.

# To our readers and authors

## Focus and Scope

The Journal of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences (ACCEFYN) is a multidisciplinary quarterly journal that publishes high quality original research articles.

The journal publishes scientific articles in the disciplines of Biomedical Sciences, Behavioral Sciences (philosophy, psychology, anthropology, and sociology), Natural Sciences (Biology, Botany, Microbiology, Zoology, Ecology), Physical Sciences, Chemical Sciences, Earth Sciences (Geology, Environmental Sciences) and Mathematics. It is included in several national and international directories and indexing services like Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (International Center for Scientific Research), Current Mathematical Publications, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, On-line Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Within the Colombian citation system, the journal is register in Publindex (The Journal index Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias).

The journal´s website (**www.raccefyn.co**) allows free and open access to full-text articles with the purpose of contributing to the visibility, access and dissemination of Colombian scientific production.

The first issue was published in December 1936, year of the official creation of the National Academy, led by Jorge Álvarez Lleras. The journal has been edited 41 volumes since then.

## Peer Review Process

Manuscripts that meet the author guidelines are welcomed. Manuscripts will be assessed by the editor in chief and associate editors' expert in the topic of the manuscript.

If the editors see fit, the manuscript will be sent to, at least, two peers knowledgeable in the topic of the manuscript. It is estimated the peer reviewing process will take around 90 days.

The reviewers can decide to a) accept the article without any modification, b) accept it if some recommendations are addressed, or c) reject the manuscript. If peers exhibit contradicting assessments, an extra reviewer will be approached to settle disparities and reach a final decision.

The corresponding author will be notified of the results of the peer review process. The author should return an amended version, along with a documenting reporting the response to the reviewers, four weeks after receiving the results of the reviewers.

If the author does not send these documents past the suggested time, the journal will assume the manuscript has been withdrawn. If the author send these documents past the suggested time, the journal takes the manuscript as a new submission and the reviewing process starts anew.

Accepted manuscripts are considered property of the journal. Thus, the journal is free to reproduce an entire manuscript or parts of it.

The journal is not responsible of the contents of the published manuscripts and related legal implications.

## Publication Ethics and Publication Malpractice Statement

The journal abides by the *Committee on Publication Ethics* (COPE) standards. These guidelines can be consulted in the following links:

COPE guidelines on good publication practice: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/

COPE code of conduct: https://publicationethics.org/resources/code-conduct

See document pdf (annex)

## Open access policy

The journal enables open access to published articles via its website (**www.raccefyn.co**) to contribute to the dissemination, accessibility, and visibility of scientific work.

## Author Guidelines

**Research articles.** A manuscript documenting the results of at least one experiment/study by following the following structure: introductions, methodology, results, discussion, conclusions, and references. Extra material can be reported as an appendix.

**Brief articles.** Manuscripts reporting the results of novel experiments/study in a succinct manner and that require prompt diffusion.

**Inaugural articles or Review articles.** Manuscripts reporting literature reviews on a topic. It is one requirement for the Academics to be admitted to the Academy

**Letters to the editor.** Manuscripts proposing critical comments, novel analysis or re-interpretations of published work.

**Book reviews.** Short manuscripts reporting a review of a book recently published within an area of interest to the journal.

**Authors correction**

**Errata**

## Information for Authors

Authors should bear in mind the following

1. Submitted manuscripts must be original and of outstanding quality. They can be written in Spanish or English in an area related to the **Exact, Physical or Natural Sciences**. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
2. The corresponding author will be required to state that the work is original, has not been published elsewhere, is not under review elsewhere and that co-authors agree as to the version submitted. Equally important, the corresponding author will be asked to state whether copyrights have been passed on to other parties. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. It is assumed all listed authors have contributed substantially to the manuscript. Their order in the manuscript should be reached by agreement. Finally, each author's contribution should be explicitly stated. Collaborators whose contribution was not substantial (see above) should be mentioned in the 'acknowledgments' section (see http://www.icmje.org/ for a reference). Financial supports and grants should also be mentioned in this section.
4. The terminology used in the manuscript should follow that used in specific areas (we therefore recommend authors to consult specialised references in this regards as to their own fields of research). Scientific names should follow recommendations such as those stated, for example, by the International Code of Botanical Nomenclature and the International Committee on Systematics of Prokaryotes.

## Submission and Presentation of manuscript

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: **http://www.accefyn.co**

The manuscript, including the title page, the abstract, tables with titles, graphics with descriptive legends, must be prepared in Microsoft WORD processor in double space. Use Arial font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript. Maximum extension 30 pages, 5,000 to 8,000 words.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name, first and second family name separated by a hyphen) of all the authors (without positions, and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.
2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references, and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or TIF format.

## Manuscript Structure

**Introduction:** there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

**Materials and methods:** a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

**Statistical analysis:** indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

**Results:** these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

**Discussion:** emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies. The results and the discussion may also be presented in a combined form.

**Conclusions:** an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

**References:** these citations must be verifiable. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way: last name of the first author and year of publication Pérez (1996). If there are only two authors use both last names Perez and Ribas (1996). If there are more than two authors use only the first last name followed by *et al*.

**Reference list:** alphabetically and following the examples

***Journal article***

**Last name, A. A., Last name, B. B., Last name, C. C.** (Year). Title. Journal name, **volume:** pp-pp.

Example

**Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L.** (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. Nat Med., **7:** 33-40.

***Book***

**Last name, A. A.** (year). Title, City, Country: Publisher

Example

**Salisbury, F. B., Ross, C. M.** (1994). Fisiología Vegetal. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

***Book chapter***

**Last name, A. A., Last name, B. B.** (Year). Chapter title. In A. A. Last name. (Ed.), Book title (pp. xx-xx). City, Country: Publisher.

Example

**Guba, E.G.** (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. La enseñanza: Su teoría y su práctica (148-165). Madrid, España: Akal.

***Journal on line***

**Last name, A. A.** (Year). Article title. Journal, **volume** (issue): pp-pp. Available in http:/ /www…or DOI

Examples

**Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G.** (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. Biotropica, **10** (2): 110-121. Available in: http://www.jstor.org/pss/2388013

**Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P.** (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. J Cereb Blood Flow Metab. doi: 10.1177/0271678X16662476

***References web pages***

Date of the access

Example

**Guiry, M.D., Guiry, G.M.** (2015). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Available in http://www.algaebase.org., accesed in June 2015.

**Tables and graphics:** The tables and frames are called tables and carry an Arabic numeration in accordance with the order in which they appear. The corresponding title is placed on the upper part of the table and notes are placed in the lower part. Symbols for unit measures must appear in the column

headings. If it is necessary to display some information, use lower case letters from the alphabet according to the appearance of the table: a, b, c, d, e, etc.

Photographs, graphics, pictures, or sketches are named figures, are enumerated in order of appearance, and their legends must be written in a separate page. With respect to microfiches, indicate the size of the augmentation used. People or their names should not be identifiable in photographs, unless written permission for their publication has been obtained.

When tables and figures have been taken from magazines or books, published in hard copy or electronically, specify the source and include the authorization for its reproduction from the respective publication.

**Acknowledgments:** These can be expressed to persons or entities who have aided in the realization of the work. Mention is made of persons and their type of aid provided, as well as to entities or institutions which have provided financial and material assistance. In case of investigative projects with financial support it suffices to mention the registry code and the entity, institution or foundation which provided the economic support.

## Considerations

They will be published in the following issue to the announcement of the correction. They are responsibility of the authors. Errata are responsibility of the Journal.

Fabrication of evidence, data omission, duplicity of data or plagiarism will be penalized. The authors and their institutions, research center or university and sponsors will be notified.

Once the article has been accepted, it will undergo a style and format revision which will bring it to its definitive version. The authors will receive the galley proofs in PDF format for the correction of errors before its printing. The corrected version must be returned for final approval within a period of 48 hours. The manuscript must be accompanied with a letter to the editor informing him of the corrections that were carried out. The editor will inform the author of the date and volume number in which the publication will appear.

If the authors or co-authors, the editors or reviewers (evaluators) have some conflict of interest which may in any way influence the transparency and objectivity of the peer review process and publication, it must be so declared.

The most obvious conflicts of interest are those referred to as financial conflicts, which result between, employer-employee, investments, and patents, as well as honoraria, consulting, paid investigation by companies which depend on the investigative results, etc.

There also exist personal conflicts arising from friendships, animosity, academic competencies and passions in the moral or intellectual field (for example relatives in a company which will benefit from the results to be published, the use of the results for immediate promotion based on the published article, religious beliefs which are in direct conflict with the investigation that will be published, etc.).

## Copyright Notice

**Declaration of originality and transfer author's rights**

The authors declare:

The published data and reference materials have been duly identified with their respective credits and have been included in the bibliographic notes and citations that have been so identified and that should it be required, I have all releases and permissions from any copyrighted material.

All material presented is free from any copyright and that I accept full legal responsibility for any legal claims relating to copyrighted intellectual property, fully exonerating from responsibility the **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.**

This work is unpublished and will not be sent to any other journal while waiting for the editorial decision of this journal. I declare that there is no conflict of interest in this manuscript.

In case of publication of this article, all author´s rights are transferred to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,** and so cannot be reproduced in any form without the express permission of it.

By means of this document, if the article is accepted for publication by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,** the Revista assumes the right to edit and publish the articles in national and international indices or data bases for academic and scientific use in paper, electronic, CD-ROM, internet form either of the complete text or any other known form known or to be known and non-commercial, respecting the rights of the authors.

## Transfer of author rights

In case the article is approved for publication, the main author in representation of himself and his co-authors or the main author and his co-authors must cede the author rights of the corresponding article to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, except in the following cases:

The authors and co-authors will retain the right to revise, adapt, prepare derived works, oral presentations, and distribution to some colleagues of reprints of their own published work, if the corresponding credit is given to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**. It is also permissible to publish the title of the work, summary, tables, and figures of the work in the corresponding web sites of the authors or their employers, also giving credit to the Revista.

If the work has been realized under contract, the author's employer has the right to revise, adapt, prepare derivative works, reproduce, or distribute in hard copy the published work, in a secure manner and for the exclusive use of his employees.

If the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** were approached for permission by a third party for using, printing, or publishing specifically articles already published, the Revista must obtain the express permission of the author and co-authors of the work or of the employer except for use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work. The **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

No other right, other than the author's right, can be claimed by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

## Privacy Statement

The names and e-mail addresses appearing in the journal will be used solely for the purposes explicitly therein expressed and by no means will they be supplied to third parties.

---

## Submission Preparation Checklist

As part of the submission process, authors are required to check off their submission's compliance with all of the following items, and submissions may be returned to authors that do not adhere to these guidelines.

**1. Letter of submission, where it is stated that all authors have read and approved that:**

- The submitted manuscript conforms in content, organization and presentation with established norms.
- The original article has not been previously published in any form nor has it been submitted to another journal nor will it be until an answer is received from the Editorial Committee.
- In the case the manuscript is accepted, it is then authorized to be published under the journal´s norms.
- The document may not be published without authorization of all copyrighted texts and figures.
- The document is fully cited in a list of references.

**2. Appearance**

- The first page written in Word with names and surnames (complete name, first and second surnames separated by a hyphen) of all authors (without job titles or academic titles), affiliations and e-mail address.
- Complete title of the manuscript in Spanish and English. Short title.
- Name of person responsible for correspondence with their complete address, telephone number and electronic address.
- E-mail of all coauthors.
- Text, references and tables in the same file together with legends of the figures. Figures in jpg or TIF format.

**3. Structure of the article**

The following sections are to be included:

- An abstract should be included in both Spanish and English.
- Key words (no more than 6) should be included in both Spanish and English.
- Introduction.
- Materials and methods.

- Results and Discussion for short communications.
- Discussion.
- Acknowledgments to collaborators and institutions and organizations which financed the research.
- Declaratıon of conflict of interest.

**4. Additional information: Figures**

- Each figure is included in a separate page in jpg or TIF format
- Corresponding legends are included in a separate page
- Figures should be charged in JPG o TIF format

**5. Additional information: Tables**

- Tables are included on a separate page and are presented in a simple manner as a Word table
- Tables are ordered sequentially

**6. References**

Citations must follow the journal ACCEFYN´s norms found in the authors´ instructions

**7. Abreviations**

The first use is introduced in parentheses

**8. Nomenclature**

- The generic and specific names are written in italics
- Names of micro-organisms, plants and animals are written out completely the first time that they are cited in the title and in the abstract.

**9. Ethics and malpractice considerations**

- All authors must know and approve of the form, content, authors, and the order of the authors
- An article that has been submitted to the journal ACCEFYN has not be submitted or published in any other journal.
- If the article includes research on human or animals have all authors read and followed the guiding principles of the Declaration of Helsinki and the use of non-human primates in the research?

**10. Reviewers**

List 3 or 4 possible reviewers with their complete names, academic background and e-mails.

