



ISSN 0370-3908 · eISSN 2382-4980

Revista 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. 48 • Número 188 • Págs. 467-714 • Julio - Septiembre de 2024 • Bogotá - Colombia

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

- Luis Fernando García, M.D., M. Sc.
Profesor emérito, Universidad de Antioquia,
Medellin, Colombia
- Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
- Juanita Ángel, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- Manuel Franco, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- Alberto Gómez, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- John Mario González, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- María Teresa Rugeles, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- María Mercedes Zambrano, Ph. D.
Corpogen, Bogotá, Colombia
- Juan G McEwen, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias del Comportamiento

- Guillermo Páramo, M.Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Rubén Ardila, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Ana María Groot de Mahecha, M. Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Fernando Cárdenas, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Ciencias Físicas

- Pedro Fernández de Córdoba, Ph. D.
Universidad Politécnica de Valencia, España
- Diógenes Campos Romero, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Román Eduardo Castañeda, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- María Elena Gómez, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali
- Gabriel Téllez, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- Jairo Roa-Rojas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

- 15 Ángela Stella Camacho Beltrán, Dr. rer. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- 15 Edgar González, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 Rafael Julián González Hernández, Ph. D.
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- 15 Carlos Duque, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- 15 Camilo Younes, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Manizales, Colombia

Ciencias Naturales

- 15 José Luis Fernández Alonso, Ph. D.
Real Jardín Botánico, Consejo Superior de
Investigaciones Científicas, Madrid, España
- 15 Jaime Cantera, Doctorat d'Etat
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- 15 Gabriel Roldán, Dr. rer. nat.
Universidad Católica de Oriente, Rionegro,
Antioquia, Colombia
- 15 Sandra Baena Garzón, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 Néstor Hernando Campos Campos, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Sede Caribe, Colombia
- 15 Martha Patricia Ramírez Pinilla, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Jairo Castaño-Zapata, Ph. D.
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia
- 15 Juan Manuel Díaz Merlano, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Gerardo A. Aymard C, Ph. D.
Universidad Nacional de los Llanos Ezequiel Zamora,
Venezuela
- 15 Néstor Julio García, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 Arturo Acero, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Santa Marta, Colombia
- 15 Elizabeth Hodson de Jaramillo, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 John Donato, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Martha R. Campos, M. Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Carolina Romero, M. Sc.
Herbarium, Missouri Botanical Garden, Estados Unidos
- 15 Eduardo Flórez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

- 15 Silvia Villabona, Ph. D.
Universidad Católica de Oriente, Rionegro,
Antioquia, Colombia
- 15 Natalia Ocampo Peñuela, Ph. D.
Universidad de California, Santa Cruz,
Estados Unidos
- 15 María Eugenia-Morales, Ph. D.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Tunja, Colombia

Ciencias Químicas

- 15 Sonia Moreno Guaqueta, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Myriam Sánchez de Gómez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Fernando Martínez, Docteur en Chimie
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Luis Fernando Echeverry, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- 15 Carmenza Duque Beltrán, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Ciencias de la tierra

- 15 Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Ph. D.
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá
- 15 José Daniel Pabón, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia
- 15 Alexander Correa, Ph. D.
Instituto de Geología, Universidad Nacional
Autónoma de México, Mexico
- 15 Camilo Montes, Ph. D.
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- 15 Germán Bayona, Ph. D.
Corporación Geológica Ares, Bogotá, Colombia
- 15 Hernando Dueñas Jiménez, Ph. D.
BIOSS SAS, Antioquia, Colombia
- 15 Natalia Hoyos, Ph. D.
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- 15 Camila Martínez, Ph. D.
Universidad Eafit, Medellín, Colombia
- 15 Monica Carvalho, Ph. D.
University of Michigan, Estados Unidos
- 15 Oris Rodríguez-Reyes, Ph. D.
Universidad de Panamá
- 15 José Gregorio Portilla, Ph. D.
Observatorio Astronómico Nacional de Colombia,
Bogotá, Universidad Nacional, Colombia
- 15 Santiago Vargas-Dominguez, Ph. D.
Observatorio Astronómico Nacional de Colombia,
Bogotá, Universidad Nacional, Colombia

Matemáticas

- Jorge Ivan Cossio Betancur, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- ① Luis Español González, Ph. D.
Universidad de la Rioja, España
- ① Luis Carlos Arboleda, Doctor
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- ① Clara Elena Sánchez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia
- Fernando Zalamea Traba, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- ① Carlos Enrique Mejía, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- ① Francisco Marcellán, Ph. D.
Escuela Politécnica Superior, Madrid, España
- ① Carolina Benedetti Velásquez, Ph.D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- ① Fernando León Saavedra, Ph. D.
Universidad de Cádiz, España

Comité científico internacional

- ① Carlos Jiménez, Ph. D.
Universidad de La Coruña, España
- ① Wolfgang Gieren, Ph. D.
Universidad de Concepción, Chile
- ① Alfonso Castro, Ph. D.
Harvey Mudd College, Claremont, CA, EEUU
- ① Rodolfo Castillo, Ph. D.
Fort Lauderdale, Florida, EEUU
- ① José Rubens Pirani Ph. D.
Universidade de São Paulo, Brazil
- ① Federico Ardila, Ph. D.
San Francisco State University, San
Francisco, CA, EEUU
- Juan Alfredo Tirao, Ph. D.
Academia Nacional de Ciencias Córdoba,
Argentina
- ① Pedro Romero, Ph. D.
Instituto Ludwig de la Universidad de
Lausana en Suiza
- ① Ulrich Paessler, Ph. D.
Academia de Ciencias de Berlín-
Brandenburgo, RFA
- ① Maria Sagrario Millán, Ph. D.
Universidad Tecnológica de Tarrasa,
España
- ① Zbigniew Jaroszewicz
Centro de Fotónica Aplicada, Instituto
Tele y Radiotécnico, Instituto Nacional
de Telecomunicaciones, Polonia
- ① José Luis Moran López, Dr. rer. nat.
Academia Mexicana de Ciencias,
México
- ① Jean-Pierre Galaup
Universidad de París Saclay, Francia
- ① Helena Nader, Ph. D.
Academia Brasileira de Ciencias, Brasil
- ① Roberto JJ Williams, Ph. D.
Academia Nacional de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales, Argentina
- ① Walter Fernández Rojas, Ph. D.
Presidente Academia Nacional de
Ciencias, Costa Rica
- ① Alex Held, Ph. D.
Commonwealth Scientific and Industrial
Research Organisation (CSIRO), Australia
- ① Rafael Radi, M.D.
Academia de Ciencias de Uruguay

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

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

Publindex, Minciencias (convocatoria 910 de 2021), categoría C

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, 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 previa autorización por escrito del titular de los derechos de explotación de la misma.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con 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. 48 · Número 188 · Págs. 467-714 · Julio - Septiembre de 2024 · Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias Físicas

Physical Sciences

Original article

Ca₂TiFeO₆ ordered perovskite: A comprehensive study of its structure and magnetic attributes

Perovskita ordenada Ca₂TiFeO₆: un estudio exhaustivo de su estructura y atributos magnéticos

Laura Vanessa Parra-Mesa, Carlos A. Parra-Vargas, Indry M. Saavedra-Gaona,

David A. Landínez-Téllez, Jairo Roa-Rojas 474

Original article

Optimizing corrosion resistance of anodized TiO₂ coatings through controlled calcination parameters

Optimización de la resistencia a la corrosión de recubrimientos de TiO₂ anodizados mediante parámetros controlados de calcinación

William Alexander Aperador-Chaparro, José Barba-Ortega, Miryam Rincón-Joya 483

Artículo original

Aproximación a la biología de *Procambarus clarkii* en la dársena de la planta Tibitoc (Zipaquirá, Colombia)

Approach to the biology of *Procambarus clarkii* in the Tibitoc plant dock (Zipaquirá, Colombia)

Carlos A. Rivera, Angela Zapata, Isabella Gonzalez-Gamboa, Mabel G. Pimiento-Ortega,

Andrea C. Sarmiento-Toro, Fabian L. Mesa-Roberto, Elisabeth Jiménez-Carmona,

Gina A. Romero-Galindo, Lina F. Mora Ballen, Diana C. Villamil-Pasito, William Villamil,

Nubia León-Lopez 491

Artículo original

Impacto del tráfico ilegal de mamíferos en Colombia con enfoque en los análisis de biodiversidad

Impact of illegal mammal trade in Colombia with a focus on biodiversity analyses

Edison D. Bonilla-Liberato, Tatiana E. Lozano-Suárez, Melissa F. Forero-Castellanos,

Edwin O. López-Delgado 508

Artículo original

Modulación metabólica a temperaturas crecientes: un enfoque ontogenético en la rana tropical de alta montaña *Dendropsophus molitor* (Hylidae)

Metabolic modulation under increasing temperatures: an ontogenetic approach in the high mountain tropical frog *Dendropsophus molitor* (Hylidae)

Juliana Poveda-Cantini, Edgar Cristancho 523

Ciencias Naturales

Natural Sciences

Artículo original

Una nueva especie de *Ageratina* (subg. *Andinia*, Eupatorieae, Compositae) y novedades taxonómicas en *Ageratina gynoxoides* (Wedd.) R.M.King & H.Rob

A new species of *Ageratina* (subg. *Andinia*, Eupatorieae, Compositae), and taxonomic novelties in *Ageratina gynoxoides* (Wedd.) R.M.King & H.Rob

José Aguilar-Cano, Fabio Andrés Ávila 537

Artículo original

Morfología vegetativa de *Phytalephas macrocarpa* en el noroeste de la Amazonía peruana

Vegetative morphology of *Phytalephas macrocarpa* in the northwest of the Peruvian Amazon

Karlene Yupe-Rosero, Sebastián Escobar, Kember Mejía, Johnny Cano-Guevara, Jhoynner Tapia,

Ángel Alejandro Salazar-Vega, E. Hanz Rodríguez-Cabrera, Ángel Martín Rodríguez del-Castillo 551

Artículo original

Un megaherbívoro invasor al descubierto: ecología de la población de hipopótamos (*Hippopotamus amphibius*) en Colombia

Uncovering an invasive mega-herbivore: the ecology of the hippos population (*Hippopotamus amphibius*) in Colombia

Rafael Moreno-Arias, Laura J. Nova-León, Lina M. García-Loaiza, María P. Bapstiste,

Olga L. Montenegro-Díaz, Hugo F. López Arévalo, Camilo Loaiza, David Santamaría-Castiblanco,

Gina Diaz-Rodríguez 564

Original article

Three new species of *Nanomis* Lugo-Ortiz and McCafferty, 1999 (Ephemeroptera: Baetidae) from Colombia

Tres nuevas especies de *Nanomis* Lugo-Ortiz and McCafferty, 1999 (Ephemeroptera: Baetidae) de Colombia

Luis Gonzalo Salinas-Jiménez, Lucimar Gomes-Dias, César Román-Valencia 582

Artículo original

Primer reporte de anfibios y reptiles en el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (Lima-Perú)

First report of amphibians and reptiles in The Pantanos de Villa Wildlife Refuge (Lima-Peru)

Diego A. Barrera-Moscoso, Grecia Torres-Ccasani, Dámaso W. Ramírez 595

Artículo original

Ampliación del ámbito geográfico de isópodos terrestres (Oniscidea) para el Caribe colombiano y primer registro de *Nagurus nanus* (Trachelipodidae) para Colombia

Geographic range extension of terrestrial isopods (Oniscidea) for the Colombian Caribbean and first record of *Nagurus nanus* (Trachelipodidae) for Colombia

Agustín E. Bravo-Rodríguez, Carlos Mario López-Orozco, Carlos A. Nisperuza-Pérez,

Jorge A. Quirós-Rodríguez, Néstor Hernando Campos-Campos 606

Artículo original

Actividad larvicida de extractos y fracciones proteicas de *Annona muricata* L. en *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae)

Larvicidal activity of extracts and protein fractions of *Annona muricata* L. on *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae)

Magaly Alejandra Brouset-Minaya, Juan Reyes-Larico, Edgar Chaparro,

Miguel Bobadilla Álvarez 623

Artículo original

Astronomía en Colombia: una perspectiva bibliométrica

Astronomy in Colombia: a bibliometric perspective

*Sofía Guevara-Montoya, Felipe Ortiz-Ferreira, María Paula Silva-Arévalo, Paola A. Niño-Muñoz,
Jaime E. Forero-Romero* 638

Original article

Quantifying Colombian blue carbon sinks from coastal mangroves

Cuantificación de sumideros de carbono azul en Colombia a partir de manglares costeros

*Joel Bernal O., Leidy P. Alfonso A., Valentina I. Burbano A., Santiago Vargas-Domínguez,
María Fernanda González, Juan Esteban Agudelo, Jose Iván Campos-Rozo* 658

Artículo original

Reconstrucción de campos multivectoriales a partir del análisis de Clifford

Reconstruction of multivectorial fields in Clifford analysis

Ricardo Abreu-Blaya, Juan Bory-Reyes, Tania Moreno-García, Daniel Alfonso-Santiesteban 671

Club de revistas/Journal Club

Aprovechando las debilidades de un hongo patógeno

Exploiting the weaknesses of a pathogenic fungus

Sandra V. Flechas 687

De ardillas y hombres: lepra en la Edad Media

Of squirrels and men: Leprosy in the Middle Ages

Luis F García 691

Vida de la Academia

Palabras de Clemente Forero Pineda en el homenaje de ACCE-ACCEFYN a

Enrique Forero González - Agosto 12 de 2024

Clemente Forero Pineda at ACCE-ACCEFYN's tribute to Enrique Forero Gonzalez - August 12, 2024

Clemente Forero Pineda 695

Obituario/Obituary

Fabio Antonio Cediel Melo 700

Enfoque y alcance

Focus and Scope 702

Nuestra portada



Ampliación del ámbito geográfico de isópodos terrestres (Oniscidea) para el Caribe colombiano y primer registro de *Nagurus nanus* (Trachelipodidae) para Colombia.

doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2630>

Las fotografías en la portada corresponden a cuatro de las 17 especies de isópodos terrestres o cochinillas que se registran para la región del Caribe colombiano, pertenecientes a 10 familias del suborden Oniscidea: A) *Nagurus nanus*, B) *Trichorhina bermudezae*, C) *Ctenorillo dazai*, D) *Ctenorillo tuberosus*.

Nagurus nanus, de la familia Trachelipodidae, es registrada por primera vez para el territorio colombiano y *Rhyscotoides parallelus*, de la familia Rhyscotidae, para la región del Caribe colombiano. Se brindan datos de historia natural, distribución global y local para cada especie.

Fotografías por Agustín Bravo y Carlos Mario López

Juan Manuel Díaz M., Dr. rer. nat.

Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia
Fundación MarViva

Miembro correspondiente Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Editor Asociado Revista de la Academia

Expansion of the geographical range of terrestrial isopods (Oniscidea) for the Colombian Caribbean and first record of *Nagurus nanus* (Trachelipodidae) for Colombia.

doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2630>

Photographs on the cover correspond to four of the 17 species of terrestrial isopods or woodlice that are recorded for the Colombian Caribbean region, belonging to 10 families of the Oniscidea suborder: A) *Nagurus nanus*, B) *Trichorhina bermudezae*, C) *Ctenorillo dazai*, D) *Ctenorillo tuberosus*.

Nagurus nanus (Trachelipodidae) is recorded for the first time for Colombia, and *Rhyscotoides parallelus* (Rhyscotidae) for the first time for the Colombian Caribbean region. Data on the natural history, global and local distribution of each species are provided.

Photographs by por Agustín Bravo y Carlos Mario López

Juan Manuel Díaz M., Dr. rer. nat.

Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia
Fundación MarViva

Miembro correspondiente Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Editor Asociado Revista de la Academia

Original article

Ca₂TiFeO₆ ordered perovskite: A comprehensive study of its structure and magnetic attributes

Perovskita ordenada Ca₂TiFeO₆: un estudio exhaustivo de su estructura y atributos magnéticos

✉ Laura Vanessa Parra-Mesa^{1,*}, Carlos A. Parra-Vargas², ✉ Indry M. Saavedra-Gaona²,
✉ David A. Landínez-Téllez^{1,3}, ✉ Jairo Roa-Rojas^{1,3}

¹ Grupo de Física de Nuevos Materiales, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá DC, Colombia

² Grupo de Física de Materiales, Escuela de Física, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

³ Grupo de Estudios de Materiales GEMA, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia

Abstract

The use of materials in contemporary technology heavily relies on their nanostructural, physical, and chemical attributes. The specific domain within technology referred to as spintronics, encompasses the realm of spin transport electronics. Spintronics delves into the electron spin, its inherent magnetic moment and fundamental charge, and the manipulation of these intrinsic characteristics to develop solid-state devices. In metallic systems, spintronics encloses phenomena like spin-charge coupling, which includes ferro- and ferrimagnetic materials, giant and colossal magnetoresistive materials, and metallic spins. Among the most versatile materials in the evidence of exotic properties, one of the most representative families is the so-called perovskites, widely studied in recent years including their properties in solar cell technology. Here, we present some crystallographic, compositional, morphological, optical, and magnetic attributes of the Ca₂TiFeO₆ double perovskite material, synthesized by the standard solid-state reaction method from high-purity precursor oxides. Rietveld refinement of experimental X-ray diffraction data revealed that this material crystallizes in a monoclinic perovskite-type structure with alternating ordering of Ti-Fe cations along the three crystallographic axes. The strongly granular surface character of the Ca₂TiFeO₆ materials was observed in the images from a scanning electron microscope; the electron X-ray energy dispersive spectra revealed a close match of sample composition to that expected from their chemical formula. The diffuse reflectance spectrum showed the semiconductor feature of the material with a 1.02 eV bandgap. The magnetic characterization in the 50 K < T < 335 K regime and the applied fields up to 1 kOe showed the ferromagnetic response of the material over the entire temperature range measured. These properties are promising in the spintronics industry for devices where the same material serves to process, record, read, and erase information as in the spin transistors.

Keywords: Double perovskite; Structure; Ferromagnetism; Semiconductor; Spintronics.

Resumen

La utilización de materiales en la tecnología contemporánea depende en gran medida de sus atributos nanoestructurales, físicos y químicos. El ámbito tecnológico específico de la espintrónica abarca la electrónica de transporte de espín. La espintrónica estudia a profundidad el espín electrónico, su momento magnético inherente, la carga fundamental y la manipulación de estas características intrínsecas para el desarrollo de dispositivos de estado sólido. En los sistemas metálicos, la espintrónica explora fenómenos como el acoplamiento espín-carga, incluidos los materiales ferro y ferrimagnéticos, los materiales magnetorresistivos gigantes y colosales, y los espines metálicos. Entre los materiales más versátiles en la evidencia de propiedades exóticas, una de las familias más representativas es la de las perovskitas, cuyas propiedades han sido ampliamente estudiadas en los últimos años en el campo de la tecnología de células solares. Presentamos aquí los atributos

Citation: Parra-Mesa LV, *et al.* Ca₂TiFeO₆ ordered perovskite: A comprehensive study of its structure and magnetic attributes. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):474-482, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.2651>

Editor: Rafael González Hernández

***Corresponding autor:**
Laura Vanessa Parra Mesa;
lparrame@unal.edu.co

Received: May 22, 2024

Accepted: July 31, 2024

Published on line: August 20, 2024



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

cristalográficos, composicionales, morfológicos, ópticos y magnéticos del material perovskita doble Ca₂TiFeO₆, sintetizados mediante el método estándar de reacción en estado sólido a partir de óxidos precursores de gran pureza. El refinamiento Rietveld de los datos experimentales de difracción de rayos X reveló que este material cristaliza en una estructura monoclinica de tipo perovskita con ordenación alternante de los cationes Ti-Fe a lo largo de los tres ejes cristalográficos. La naturaleza marcadamente granular de la superficie de los materiales Ca₂TiFeO₆ se observó mediante imágenes obtenidas en un microscopio electrónico de barrido y los espectros de dispersión de energía de rayos X electrónicos revelaron una estrecha correspondencia de la composición de las muestras con la esperada a partir de su fórmula química. El espectro de reflectancia difusa reveló la característica semiconductor del material con una banda prohibida de 1,02 eV. La caracterización magnética en el régimen de 50 K < T < 335 K y en campos aplicados de hasta 1 kOe evidenció la respuesta ferromagnética del material en todo el rango de temperatura medido. Estas propiedades generan expectativas tecnológicas en la industria espintrónica para la producción de dispositivos en los cuales un mismo material se utilice en el procesamiento y las operaciones de grabación, lectura y borrado de información como sucede en los transistores de espín.

Palabras clave: Perovskita doble; Estructura; Ferromagnetismo; Semiconductor; Espintrónica.

Introduction

Perovskites are an important basis for recent progress in solid-state physics, chemistry, and materials science. Perovskite-type oxides are characterized by the general form ABO₃, where A stands for an alkali earth metal lanthanide or semimetal of radius greater than B, B is usually a transition metal, and O is oxygen. These materials have been used in applications ranging from semiconductors, ferroelectrics, and superconductors to colossal magnetoresistive materials (Kieslich *et al.*, 2014) used in the fabrication of nanomaterials (Mao *et al.*, 2010) and high entropy composites (Jiang *et al.*, 2017). Perovskites allow a wide spectrum of cations with different oxidation states in their structure (Eng *et al.*, 2003) giving rise to a variety of compounds (Bhalla *et al.*, 2000) with a remarkable diversity of physical properties (Cavichini, *et al.*, 2018). Perovskites allow a wide spectrum of cations with different oxidation states in their structure (Eng *et al.*, 2003) giving rise to a variety of compounds (Bhalla *et al.*, 2000) with a remarkable diversity of physical properties (Cavichini *et al.*, 2018). Perovskites adopt the ABO₃ structure and also more complex forms such as the A₂BB'O₆- and AA'BB'O₆-type double perovskites (Lufaso & Woodward, 2001), and other more complex ones (Roa-Rojas *et al.*, 2022) with A and B sites occupied by two cations. These configurations indicate where cation inclusion occurs and their arrangement influences the material properties. Inclusion in A (less common than cation ordering in B) occurs in two different crystallographic sites, A and A', a configuration where the structural features limit the symmetries of complex perovskites, as cations in A favor a layered crystalline ordering (King & Woodward, 2010) endowing the material with magnetic and electrical properties (Cuervo-Farfán *et al.*, 2018) and modifying its optical (Deluque-Toro *et al.*, 2023) and dielectric (Jaramillo-Palacio *et al.*, 2021) characteristics.

A family of double perovskite-type materials, with few studies given their difficulty of synthesis but promising physical properties, is based on calcium titanate with the inclusion of magnetic atoms to form the compound Ca₂TiMO₆, where M represents a magnetic cation. Ca₂TiMnO₆ was reported as an antiferromagnetic at Néel temperature 15.3 K with dielectric losses at room temperature that crystallized in a tetragonal structure belonging to space group I4/m (#87) (Ochoa Burgos *et al.*, 2012). On the other hand, CaTi_{0.5}Cr_{0.5}O₃, reported as Ca₂TiCrO₆, is a simple CaTiO₃ perovskite substituted in 50% Cr at the Ti sites whose crystallization occurs in an orthorhombic structure (space group Pbnm, #62). Its main characteristic is the strongly frequency-dependent colossal dielectric character at room temperature (Tan *et al.*, 2013). When M=Fe, the CaTi_{1-y}Fe_yO_{3.5} material adopts a thin film form with suggested cubic phase crystallization (space group Pm3m, #221) and band gap 3.4 eV semiconductor-type response. There are no reports on the magnetic nature of the material (Yildirim *et al.*, 2022).

Here we aimed to examine the structural, morphological, optical, and magnetic properties of the $\text{Ca}_2\text{TiFeO}_6$ material to determine its multifunctional features and potential applicability in spintronic devices simultaneously combining the functions of magnetically stored information processing, erasing, writing, and reading.

Experimental procedures

We produced samples of the $\text{Ca}_2\text{TiFeO}_6$ material using the solid-state reaction ceramic method. The starting point was Sigma-Aldrich CaO , TiO_2 , and Fe_3O_4 oxides with 99.99% purity dried at 120°C and ground in an agate mortar for 3 h, which were then pressed into pellets and calcined at 800°C for 48 h. After a 30 minute-maceration, the final sintering process was carried out at 1000°C for 48 hours. For the structural characterization, we obtained diffraction patterns in a PANalytical X'pert-Pro diffractometer with $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 1.540598$ Å radiation in the Bragg-Brentano configuration and a 0.001° step during 5 s. We used Rietveld refinement with the GSAS-II code for data analysis (Toby & Von Dreele, 2013). We obtained scanning electron microscope (SEM) images from a Vega 3 TESCAN using secondary and backscattered electron detectors. Using a Bruker detector coupled to the microscope we obtained X-ray energy dispersive spectra (EDS) for the semi-quantitative compositional analysis. For the optical characterization, we used a VARIAN Cary 5000 UV-vis-NIR spectrophotometer, and the magnetic response was measured with a VSM in a VersaLab Quantum Design equipment in the range from 50 K to 335 K for magnetic susceptibility following the Zero Field Cooling (ZFC) and Field Cooled (FC) recipes and magnetization curves as a function of the external fields up to ± 1000 Oe.

Results and discussion

The Rietveld analysis of the experimental X-ray diffraction (XRD) data is shown in **figure 1**. We found a good correspondence between the experimental pattern (blue symbols) and the theoretical one (green line).

In **table 1**, we present the structural parameters resulting from the refinement: a characteristic monoclinic structure belonging to the space group $P2_1/n$ (#14), very similar to the orthorhombic structure of the $Pnma$ space group (#62) typical of simple perovskites, except that in the monoclinic, one of the angles of the unit cell axes was slightly deviated from 90° . The main feature is that Ti and Fe cations form a salt rock-like superstructure arranged intercalary along the three crystallographic axes. **Table 1** also shows Wyckoff's positions (c, d, and e) that relate to the lattice points where the symmetry groups of each unit cell point become conjugate subgroups of the space group $P2_1/n$ (Parthé *et al.*, 1993). These letters represent an encoding type for the atomic positions in the cell appearing always in alphabetical order (Wondratschek, 2006) while the numbers accompanying them determine the equivalent points per unit cell referred to as Wyckoff position multiplicity.

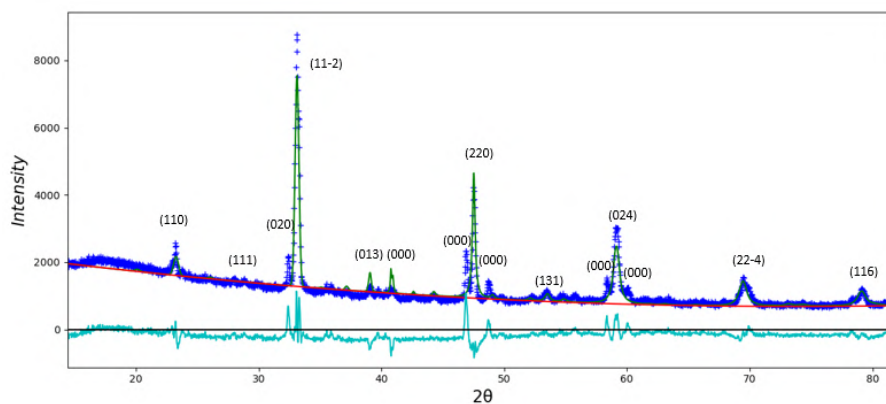


Figure 1. Diffraction pattern refined by Rietveld analysis for the material $\text{Ca}_2\text{TiFeO}_6$

Table 1. Structural parameters of Ca₂TiFeO₆ obtained from Rietveld refinement of the experimental XRD data

Lattice parameter (Å)	Atom	Wyckoff site	Atomic coordinates (±0.0001)		
			x	y	z
$a=5.39833(2)$	Ca	4e	0.5082	0.5272	0.2498
$b=5.42707(1)$	Ti	2c	0.0000	0.5000	0.0000
$c=7.65120(2)$	Fe	2d	0.5000	0.0000	0.0000
	O ₁	4e	0.2188	0.2148	-0.0338
$\alpha = \gamma = 90^\circ$	O ₂	4e	0.2865	0.7199	-0.0339
$\beta = 90.061(1)^\circ$	O ₃	4e	0.4323	-0.0087	0.2474
Refinement reliability parameters			$\chi^2 = 13.627, R_{exp} = 7.43\%, R_p = 11.08\%, R_{wp} = 10.16\%$		

The distorted nature of the crystal cell for the Ca₂TiFeO₆ double perovskite-type material is shown in **table 1**. The positions outside the expected equilibrium sites of the anions in the cell provided the first indication of the distortional character of the TiO₆ and FeO₆ octahedra. Second, the evidence of octahedral tinting arose from the differences between the interatomic distances of the Ti and Fe cations concerning each of the O₁, O₂, and O₃ anions. The presence of Ti-O-Fe bond angles away from 180° and of ρ and η angles different from zero degrees corroborate the distorted feature of the structure. Third, the structural distortion was evidenced by the tolerance factor, defined as

$$\tau = \frac{r_{Ca} + r_O}{\sqrt{2} \left(\frac{r_{Ti} + r_{Fe}}{2} + r_O \right)} \quad (1)$$

where r_{Ca} , r_{Ti} , and r_{Fe} are the ionic radii of the Ca, Ti, and Fe cations and r_O represents the ionic radius of oxygen. The ionic radii of the cations also influenced the octahedral distortions (Woodward, 1997). In their octahedral coordination, the ionic radius of Ti⁴⁺ is 0.605 Å and that of Fe⁴⁺ is 0.585 Å. The electrical (Aleksandrov, 1978) or magnetic (Lufaso & Woodward, 2004) character of the cations and their interaction with neighboring cations also contributed to the occurrence of distortions. The tolerance factor obtained was $\tau=0.9210$, representing an 8% deviation of the unit cell from the perfectly cubic structure, for which $\tau=1$ would be expected (Landínez-Téllez *et al.*, 2014). In perovskite-type materials, octahedral tilts are well described by Glazer's notation (Glazer, 1972), whereby the Ca₂TiFeO₆ structure is denoted $a^-b^+a^-$. The superscript (-) represents an out-of-phase tilt while (+) represents an in-phase tilt, so in the Ca₂TiFeO₆ material, the octahedra rotate in phase along the crystallographic *b* axis and out of phase along the *a* and *c* axes.

The surface morphology of the samples is exemplified in **figure 2a** at 10 kx magnification. A formation of primary structures of strongly diffused irregular grains is shown. The agglomerates thus formed, interconnected with each other, evidencing a high porosity in the material. The small grains in diffusion had average dimensions of 653.8 nm (**Figure 2b**), while the clusters can reach micrometer sizes. The boundaries between agglomerates appeared irregular, blurring with those of neighboring clusters. On the other hand, pores occurred in the form of small dark regions and depressions in the surface topography of the sample. Clusters are portions of compact material formed by grains joined by “necks” through which intergranular diffusion takes place as the result of the high temperature of the thermal processes applied during the sintering of the samples. In **figure 2a**, the regions closest to the surface became bright because, due to the non-conducting nature of the Ca₂TiFeO₆ material, they were electrically charged when hit by the electron beam of the microscope.

We made a semi-quantitative estimate of the composition of the material through the characteristic X-ray detector of the microscope electron beam interactions with the surface of the sample, where the transitions between electronic orbitals emit radiation allowing an energy dispersion spectrum (**Figure 3**). Firstly, the EDS data of the spectrum suggested the absence of chemical elements other than those expected from the stoichiometric formula $\text{Ca}_2\text{TiFeO}_6$, so only those included in the solid-state reaction during the synthesis process appeared. Secondly, it was clear from the spectrum that the dominant intensities corresponded to K_α and K_β energy transitions of Ca, Ti, Fe, and oxygen K_α . As expected, the L_α transitions of Ca, Ti, and Fe were less intense and occurred at lower energy values. By deconvolution of the spectrum curve, it was possible to quantify the percentage proportion of each of the constituent atoms of the material. The values obtained were 97% in agreement with those expected from the stoichiometry $\text{Ca}_2\text{TiFeO}_6$, with 28.6%-Ca, 17.1%-Ti, 20.0%-Fe, and 34.3%-O.

After determining the structural and compositional characteristics of the material, we studied the properties that guarantee its applicability in modern technology. First, we characterized the optical response of the material using diffuse reflectance spectroscopy as shown in **figure 4a**, where the percentage of reflectance as a function of wavelength is represented. Three anomalies can be seen in the spectrum, as well as a discontinuity

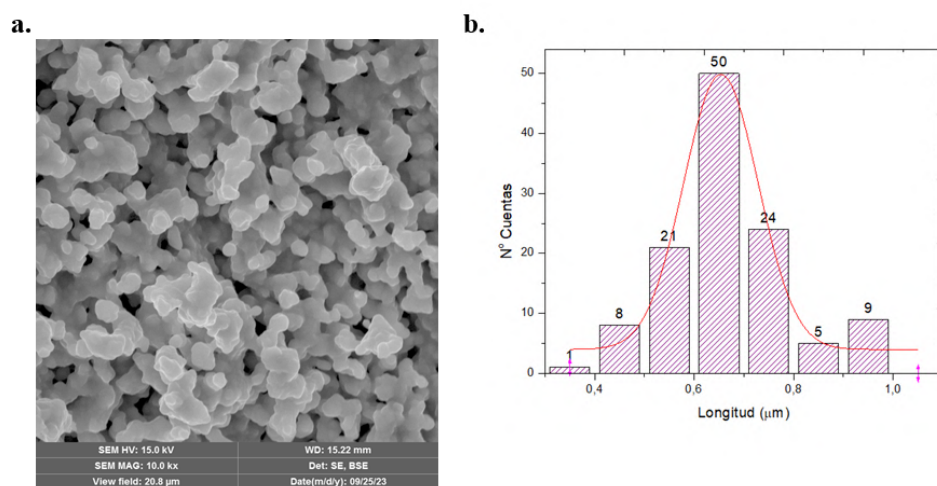


Figure 2. a. Surface microscopy image of a $\text{Ca}_2\text{TiFeO}_6$ double perovskite sample. **b.** Distribution of grain size in double perovskite $\text{Ca}_2\text{TiFeO}_6$

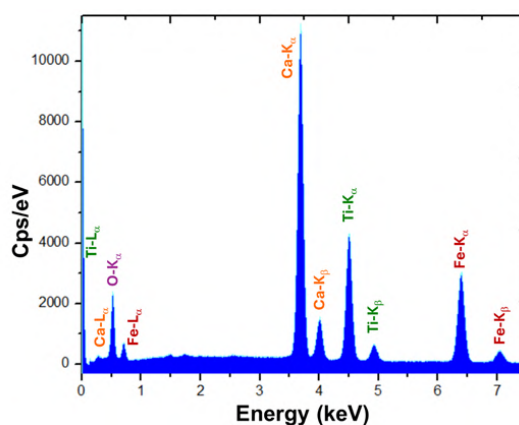


Figure 3. Surface grain energy dispersion spectrum for the $\text{Ca}_2\text{TiFeO}_6$ material

at $\lambda=799$ nm due to the change of lamp during the measuring process. These behavioral deviations in the spectrum are related to three vibrational modes observed by UV-vis of the eight that complete the irreducible representation for the double perovskite family (Cuervo-Farfán *et al.*, 2017). The remaining five vibrational modes were observable by Raman spectroscopy (Sorescu *et al.*, 2011) taking place at the Ti-O and Fe-O bonds of the octahedral coordination and the Ca-O bonds of the cuboctahedral coordination in the unit cell.

To obtain the value of an eventual optical bandgap, we performed a Kubelka-Munk-type analysis of the experimental data (Kubelka & Munk, 1931). As shown in Figure 4b, this analysis was done by modifying the Tauc equation for thick samples (Kumar *et al.*, 1999) to finally obtain an $E_g=1.02\pm 0.02$ eV bandgap, characteristic of semiconductor materials, such as SnSe₂ (Mohebbi *et al.*, 2024).

Although Fe⁴⁺ in octahedral coordination does not exhibit orbital splitting due to the crystal field, there is evidence of its contribution to ferromagnetic (Hayashi *et al.*, 2011) and antiferromagnetic (Golubeva *et al.*, 2009) ordering in perovskites. For this reason, we measured the magnetic susceptibility as a function of temperature following the ZFC and FC procedures under an H=200 Oe field strength in the thermal regime $50 < T < 335$ K. The result (Figure 5) was that at the highest temperature measured (T=335 K), there was a finite susceptibility value possibly indicating a magnetic ordering characteristic whose criticality occurs at higher temperatures.

Another interesting feature in the curve has to do with the irreversible response in ZFC and FC procedures denoting magnetic disorder effects associated with the microstructural randomness of the material. Finally, it is evident that from the beginning of the magnetization process at high temperatures up to T=335 K, the susceptibility increased by

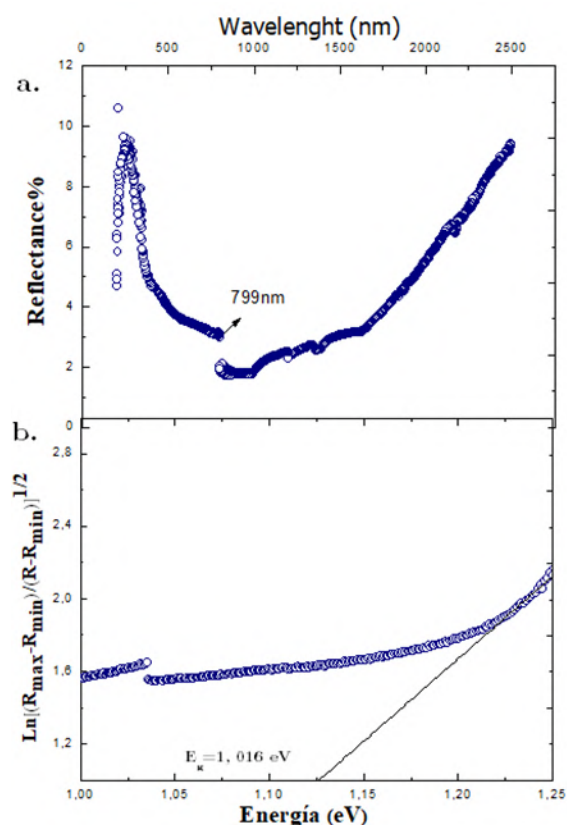


Figure 4. a) Diffuse reflectance spectrum and b) Kubelka-Munk analysis for obtaining the bandgap in the Ca₂TiFeO₆ samples

81.8% while in the $50\text{ K} < T < 335\text{ K}$ regime it increased by 18.2%. This shows that close to room temperatures and in the presence of a 100 Oe low field, the material presented magnetic ordering but still not all its domains had oriented to reach saturation, which can be achieved under the application of higher fields or lower temperatures.

To examine these effects more exhaustively, we did magnetization measurements as a function of the applied field (**Figure 6**). The curves revealed a hysteretic characteristic and although there was an increase in the coercive field with decreasing temperatures, the values were typical of soft ferromagnetic materials, which may have applicability in devices designed for reading and recording information on magnetic media. Additionally, the remanent magnetization also increased slightly with decreasing temperatures.

On the other hand, we observed that not only the coercive field and the remanent magnetization increased with decreasing temperatures but also the absolute value of the magnetization. This has to do with the observations already discussed above concerning the susceptibility curve as a function of temperature (**Figure 5**), where it is clear that

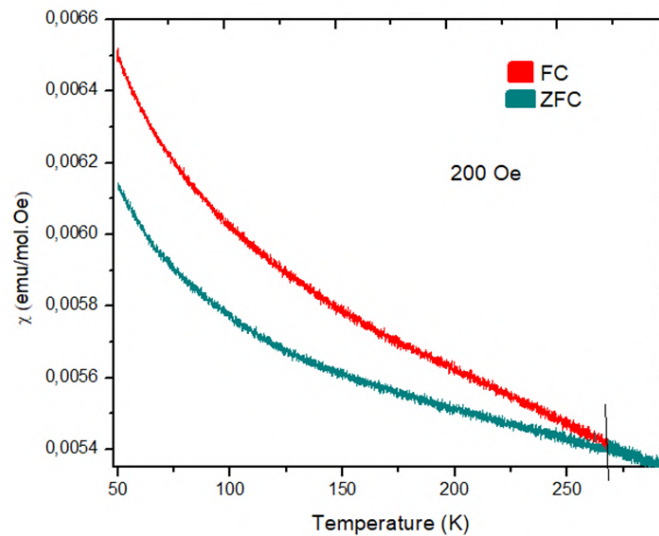


Figure 5. Susceptibility as a function of temperature measured in $\text{Ca}_2\text{TiFeO}_6$ samples

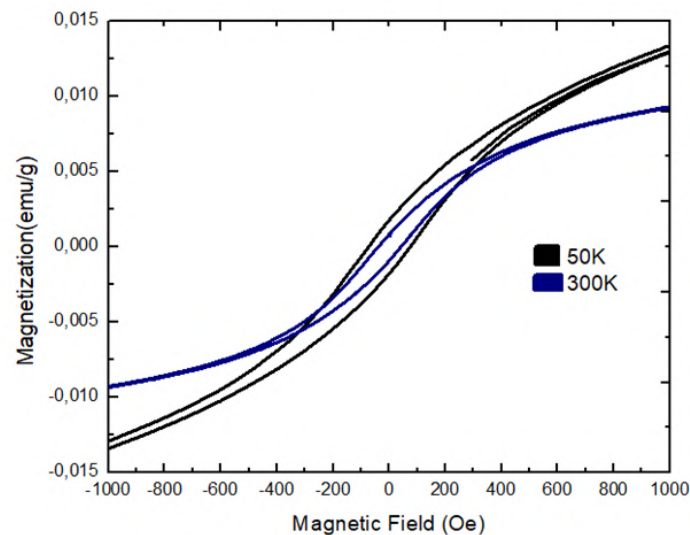


Figure 6. Magnetization as a function of the magnetic field measured in $\text{Ca}_2\text{TiFeO}_6$ samples

at lower temperatures the magnetic moment is higher due to the orientation of a greater number of magnetic domains in response to the application of the external field. Due to the ferromagnetic nature of Ca₂TiFeO₆ in the measurement regime, the occurrence of a Curie temperature above 335 K is expected.

Conclusions

We synthesized the material Ca₂TiFeO₆ by solid reaction. The Rietveld analysis of experimental X-ray diffraction data allowed us to establish that the material crystallized in a monoclinic perovskite-type structure (space group P2₁/n, #14) with Ti and Fe cations ordering along the crystallographic axes and forming a superstructure characteristic of double perovskites. We observed grains of submicrometer dimensions forming agglomerates of micrometer sizes in SEM images. Compositional analysis through EDS experiments corroborated the stoichiometry of the perovskite-type oxide Ca₂TiFeO₆. The optical characterization suggested the semiconductor character of the material with a 1.02 eV bandgap. Susceptibility measurements as a function of temperature and hysteresis curves allowed us to establish that the material behaved as a soft ferromagnet at Curie temperature higher than 335 K. The coexistence of semiconducting and ferromagnetic responses in the same crystallographic phase allowed us to classify the material as multifunctional with potential applicability in the design of spintronic devices such as spin transistors.

Acknowledgments

Our study was partially supported by the Dirección de Investigación y Extensión (DIEB) at the National University of Colombia (Hermes Code 57456).

Author contributions

LVP synthesized the samples and performed the structural, morphological, and compositional characterizations. CAPV and IMSG performed the magnetic measurements. DALT coordinated the structural and morphological analyses. JRR proposed and directed the project, coordinated the work team, interpreted and correlated the experimental and theoretical results, analyzed the interaction mechanisms, and wrote the paper.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest of any kind regarding the publication of the results of our research work.

References

- Aleksandrov, K.S.** (1978). Mechanisms of the ferroelectric and structural phase transitions. Structural distortions in perovskites. *Ferroelectrics*, 20, 61-67.
- Bhalla, A.S., Guo, R., Roy, R.** (2000). The perovskite structure - A review of its role in ceramic science and technology. *Materials Research Innovations*, 4(1), 3-26.
- Cavichini, A. S., Orlando, M. T., Depianti, J. B., Passamai Jr, J. L., Damay, F., Porcher, F., Granado, E.** (2018). Exotic magnetism and spin-orbit-assisted Mott insulating state in a 3d-5d double perovskite. *Physical Review B*, 97(5), 054431.
- Cuervo-Farfán, J. A., Aljure-García, D. M., Cardona, R., Arbey-Rodríguez, J., Landínez-Téllez, D. A., Roa-Rojas, J.** (2017). Structure, ferromagnetic, dielectric and electronic features of the LaBiFe₂O₆ Material. *Journal of Low Temperature Physics*, 186, 295-315.
- Cuervo-Farfán, J.A., Parra-Vargas, C.A., Viana, D.S.F., Milton, F.P., García, D., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2018). Structural, magnetic, dielectric and optical properties of the Eu₂Bi₂Fe₄O₁₂ bismuth-based low-temperature biferroic. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 20942-20951.
- Deluque-Toro, C.E., Vergara, V.E., Gil-Rebaza, A.V., Landínez-Téllez, D. A., Roa-Rojas, J.** (2023). Ground state structural, lattice dynamic, thermodynamic and optical properties of the Ba₂CaMoO₆ ordered perovskite. *Physica B: Condensed Matter*, 666, 415132.
- Eng, H.W., Barnes, P.W., Auer, B.M., Woodward, P.M.** (2003). Investigations of the electronic structure of d⁰ transition metal oxides belonging to the perovskite family. *Journal of Solid State Chemistry*, 175(1), 94-109.

- Glazer, A.M.** (1972). The classification of tilted octahedra in perovskites. *Acta Crystallographica B*, 28, 3384-3392.
- Golubeva, O.Y., Semenov, V. G., Volodin, V.S., Gusarov, V.V.** (2009). Structural stabilization of Fe⁴⁺ Ions in perovskite-like phases based on the BiFeO₃-SrFeO₃ system. *Glass Physics and Chemistry*, 35, 313-319.
- Hayashi, N., Yamamoto, T., Kageyama, H., Nishi, M., Watanabe, Y., Kawakami, T., Matsushita, Y., Fujimori, A., Takano, M.** (2011). BaFeO₃: A Ferromagnetic Iron Oxide. *Angewandte Chemie International Edition*, 50, 12547-12550.
- Jaramillo-Palacio, J.A., Muñoz-Pulido, K.A., Arbey-Rodríguez, J., Landínez-Téllez, D.A., Roa-Rojas, J.** (2021). Electric, magnetic and microstructural features of the La₂CoFeO₆ lanthanide ferrocobaltite obtained by the modified Pechini route. *Journal of Advanced Dielectrics*, 11(03), 2140003.
- Jiang, S., Hu, T., Gild, J., Zhou, N., Nie, J., Qin, M., Harrington, T., Veccio, K., Luo, J.** (2017). A new class of high-entropy perovskite oxides. *Scripta Materialia*, 142, 116-120.
- Kieslich, G., Sun, S., Cheetham, A.K.** (2014). Solid-state principles applied to organic-inorganic perovskites: New tricks for an old dog. *Chemical Science*, 5(12), 4712-4715.
- King, G. & Woodward, P.M.** (2010). Cation ordering in perovskites. *Journal of Materials Chemistry A*, 20(28), 5785-5796.
- Kubelka, P., Munk, F.** (1931). An article on optics of paint layers. *Z. Technical Physics*, 12, 593.
- Kumar, V., Sharma, S. K., Sharma, T. P., Singh, V.** (1999). Band gap determination in thick films from reflectance measurements. *Optical Materials*, 12, 115.
- Landínez-Téllez, D.A., Martínez-Buitrago, D., Cardona C., R., Barrera, E. W., Roa-Rojas, J.** (2014). Crystalline structure, magnetic response and electronic properties of RE₂MgTiO₆ (RE = Dy, Gd) double perovskites. *Journal of Molecular Structure*, 1067, 205-209.
- Lufaso, M.W. & Woodward, P.M.** (2001). Prediction of the crystal structures of perovskites using the software program SPuDS. *Acta Crystallographica Section B*, 57(6), 725-738.
- Lufaso, M.W. & Woodward, P.M.** (2004). Jahn-Teller distortions, cation ordering and octahedral tilting in perovskites. *Acta Crystallographica B*, 60, 10-20.
- Mao, Y., Zhou, H., Wong, S. S.** (2010). Synthesis, Properties, and Applications of Perovskite-Phase Metal Oxide Nanostructures Properties of Perovskite Systems. *Material Matters*, 5(2), 50.
- Mohebbi, E., Pavoni, E., Pierantoni, L., Stipa, P., Zampa, G.M., Laudadio, E., Mencarelli, D.** (2024). Band gap and THz optical adsorption of SnSe and SnSe₂ nanosheets on graphene: Negative dielectric constant of SnSe. *Results in Physics*, 57, 107415.
- Ochoa-Burgos, R., Martínez, D., Parra-Vargas, C. A., Landínez-Téllez, D. A., Vera-López, E., Sarmiento-Santos, A., Roa-Rojas, J.** (2012). Magnetic and ferroelectric response of Ca₂TiMnO₆ manganite-like perovskite. *Revista Mexicana de Física S*, 58(2), 44-46.
- Parthé, E., Gelato, L., Chabot, B., Penzo, M., Cenozual, K., Gladyshevskii, R.** (1993). TYPiX Standardized and crystal chemical characterization of inorganic structure types. In: *Gmelin Handbook of Inorganic and Organometallic Chemistry*, 8th ed. Springer.
- Roa-Rojas, J., Cuervo-Farfán, J. A., Deluque-Toro, C. E., Landínez-Téllez, D. A., Parra-Vargas, C. A.** (2022). Rare-earth ferrobismuthites: ferromagnetic ceramic semiconductors with applicability in spintronic devices. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 9, 628-645.
- Sorescu, M., Xu, T., Hannan, A.** (2011). Initial stage growth mechanism of LaFeO₃ perovskite through magnetomechanical ball-milling of lanthanum and iron oxides. *American Journal of Materials Science*, 1, 57.
- Tan, Y.-Q., Meng, Y., Yong-Mei, H.** (2013). Structure and colossal dielectric permittivity of Ca₂TiCrO₆ ceramics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46, 015303.
- Toby, B.H., Von Dreele, R B.** (2013). GSAS-II: the genesis of a modern open-source all-purpose crystallography software package. *Journal of Applied Crystallography*, 46, 544-549.
- Wondratschek, W.** (2006). International Tables for Crystallography, Vol. A, Chapter 8.3, 732-740. Springer, Dordrecht.
- Woodward, P.M.** (1997). Octahedral Tilting in Perovskites. I. Geometrical Considerations. *Acta Crystallographica B*, 53, 32-43.
- Yildirim, C., Devoize, F., Geffroy, P.-M., Dumas-Bouchiat, F., Bouclé, J., Vedraïne, S.** (2022). Electrical and Optical Properties of CaTi_{1-y}FeyO_{3-δ} Perovskite Films as Interlayers for Optoelectronic Applications. *Materials*, 15, 6533.

Original article

Optimizing corrosion resistance of anodized TiO₂ coatings through controlled calcination parameters

Optimización de la resistencia a la corrosión de recubrimientos de TiO₂ anodizados mediante parámetros controlados de calcinación

William Alexander Aperador-Chaparro¹, José Barba-Ortega², Miryam Rincón-Joya^{2,*}

¹ Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia

² Grupo de Física mesoscópica, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia

Abstract

We studied how calcination parameters such as temperature and duration influence the phase composition and corrosion resistance of anodized titanium dioxide (TiO₂) coatings. We synthesized TiO₂ anatase and rutile phases on titanium surfaces via anodization at 40 V followed by calcination at 350°C and 450°C, respectively. We used electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to assess these properties and behaviors. Our results indicated that longer calcination times and higher temperatures favored the rutile phase and shorter times resulted in coatings with a mixture of anatase and rutile. The rutile phase exhibited superior corrosion resistance due to its more complete crystallization and reduced structural defects. These results underscore the importance of optimizing calcination parameters to achieve desired crystalline phases and enhance corrosion resistance, with promising implications for applications in corrosive and mechanically challenging environments.

Keywords: Rutile; Anatase; Anodizing; Electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

Resumen

Estudiamos aquí cómo parámetros de calcinación como la temperatura y la duración influyen en la composición de fases y la resistencia a la corrosión de los recubrimientos de dióxido de titanio (TiO₂) anodizados. Se sintetizaron las fases de anatasa y rutilo del TiO₂ en superficies de titanio mediante anodización a 40 V, seguida de calcinación a 350 °C y 450 °C, respectivamente. Se utilizó la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) para evaluar estas propiedades y comportamientos. Los resultados indicaron que los tiempos de calcinación más largos y las temperaturas más altas favorecieron la fase rutilo, en tanto que los tiempos más cortos resultaron en recubrimientos con una mezcla de anatasa y rutilo. La fase rutilo mostró una resistencia superior a la corrosión debido a una cristalización más completa y la reducción de defectos estructurales. El estudio subraya la importancia de optimizar los parámetros de calcinación para alcanzar las fases cristalinas deseadas y mejorar propiedades como la resistencia a la corrosión, con implicaciones prometedoras para aplicaciones en entornos corrosivos y sujetos a desgaste mecánico.

Palabras clave: Rutilo; Anatasa; Anodización; Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

Introduction

Due to their versatility and wide range of applications in modern science and technology, nanostructured materials, especially TiO₂, are crucial research topics (Mansfeldova, 2021; Manut, 2020). Their use in various commercial products, from cosmetics to solar cells, highlights their importance across multiple fields. Nanocrystalline TiO₂ synthesis focuses on its role as a photocatalyst (Lin, 2014; Seul, 2022) in environmental applications such as hydrogen production using solar energy. Titanium dioxide (TiO₂) is widely used for

Citation: Aperador Chaparro WA, *et al.* Optimizing corrosion resistance of anodized TiO₂ coatings through controlled calcination parameters. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):483-490, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.2652>

Editor: Rafael González Hernández

***Corresponding autor:**

Miryam Rincón Joya;
mrinconj@unal.edu.co

Received: May 24, 2024

Accepted: July 31, 2024

Published on line: August 30, 2024



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

energy conversion and storage, sensors, cosmetics, paints, and electronics. TiO₂ exists naturally in several polymorphic forms (Seul, 2022), the most common being rutile, brookite, and anatase. Anatase TiO₂ stands out for its superior charge separation and ion storage capabilities compared to other polymorphs. This is useful in nanocrystalline solar cells, photocatalysis, and lithium-ion batteries (Baram, 2010; Li, 2019). However, thermodynamically, rutile TiO₂ is the most stable polymorphic form under ambient conditions (Seul, 2022; Quitério, 2015).

Catalysts utilizing TiO₂ continue to find widespread use in photocatalysis and H₂ production through water photoelectrolysis (Sanoja, 2024). The anodic oxidation technique of titanium sheets has become increasingly popular for fabricating TiO₂ films with a nanostructured morphology. Research has aimed to enhance the performance of these materials as photoanodes in visible light-driven H₂ generation, exploring heterojunction formation or cocatalyst incorporation to tune their catalytic activity (Pasquale, 2023; Parambil, 2023). In the quest for efficient photocatalysts, the importance of an organized three-dimensional arrangement of TiO₂ nanotubes on a mesh stands out, leveraging their extensive internal and external surface areas. This facilitates light absorption from various directions resulting in enhanced efficacy in water photoelectrolysis. Studies have demonstrated that nanotubes grown on titanium wires can effectively capture light reducing liquid scattering effects and improving photocatalytic activity (Pasquale, 2023).

Erosion-corrosion, a phenomenon characterized by the rapid degradation of metals due to chemical interactions and mechanical wear from fluid-solid particle motion, is prevalent in corrosive industrial settings (Thakur, 2024; Sarngan, 2022). Conversely, anodizing is an electrochemical technique that enhances the surface properties of materials like titanium, forming a protective oxide layer that boosts corrosion resistance and other desirable traits. While erosion-corrosion results from combined chemical and mechanical factors, anodizing is a controlled method to create a protective oxide layer. Here, we initially employed the anodizing process (Suhadolnik, 2020; Gabellini, 2023). However, recent research underscores challenges in reproducibility within the titanium anodization process, particularly in fluoride solutions, highlighting the need for further exploration of electrolyte compositions to consistently produce high-quality TiO₂ films unaffected by electrolyte aging (Arzaee, 2023; Yu, 2023). Titanium dioxide (TiO₂) is a widely used material in several fields, its most common forms being rutile, brookite, and anatase. Anatase TiO₂ stands out for its ability to separate charges and ion storage properties, making it ideal for nanocrystalline solar cells, photocatalysis, and lithium-ion batteries (Kim, 2022; Ali, 2018; Eddy, 2023). However, rutile TiO₂ is the most thermodynamically stable polymorphic form under ambient conditions for which there is interest in its large-scale and cost-effective production (Kim, 2022).

The difference in surface energy between the rutile and anatase forms plays a crucial role in their stability, especially in smaller particles. Although in its rutile form, TiO₂ is more stable, wet methods often produce anatase due to its lower surface energy. Here we transformed rutile particles to anatase through an anodization process resulting in the rutile phase and a mixture of anatase and rutile phases. Our main objective was to study the behavior of anodized TiO₂ through electrochemical EIS studies and discuss its crystalline properties and response to corrosion.

Materials and methods

The electrochemical anodization of 2 cm² Ti foils (99.99% high purity and 0.12 mm thick) was done in a homemade setup as previously detailed (Mateus, 2019; Bautista, 2018), at room temperature using a 50 V power supply. The electrolyte consisted of an ethylene glycol solution containing NH₄F (0.2% by weight) and H₂O (2% by weight). All samples were subjected to a potential of 40 V for 30 minutes (Mateus, 2019; Bautista, 2018).

Sample 1 was anodized at 40 V and subsequently calcined at 350 °C for five hours. Sample 2 underwent anodization at 40 V and a two-hour calcination at 350 °C. Sample

3 was anodized at 40 V and calcined at 450 °C for two hours. Each sample was then sequentially rinsed with ethanol and deionized water. To obtain the X-ray diffraction (XRD) patterns of the anodized Ti foil, a Panalytical Empyrean device was used in a continuous beam configuration with a scintillation detector and a parallel plate collimator. Measurements were taken from 10 to 90° at a 2θ angle with a sampling time of 0.02 seconds and a step size of 0.0040°/s using cobalt radiation with a wavelength of $K\alpha_1 = 1.78900 \text{ \AA}$. The atomic force microscopy images were obtained on a Bruker Dimension Technology KIT equipment. The electrochemical study was conducted using a potentiostat (Gamry PCI4300) equipped with Gamry framework (version 4.21/EIS 300 software), employing electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The impedance curves were obtained at room temperature using a cell housing a working electrode within an exposed area (1 cm²), a reference electrode (Ag/AgCl), and a graphite counter electrode in a 0.5 M NaCl solution with distilled water. The open-circuit potential was measured for 30 minutes (Aperador, 2012). We analyzed the electrochemical behavior of the electrolyte via EIS at open-circuit potential for 30 minutes to establish its stable values that served as the starting point for the EIS measurements.

Results and discussion

The TiO₂ crystalline structure of titanium dioxide is of great interest for its multiple polymorphic forms, prominently rutile and anatase. Rutile exhibits a tetragonal crystalline structure, offering superior stability at elevated temperatures and a high density. Its applications span from white pigments to optical coatings and high-temperature applications owing to its stability. Conversely, anatase showcases a tetragonal crystalline structure akin to rutile but with a slightly different atomic arrangement. Its properties render it more active than rutile in photocatalytic reactions, attributed to its energy band structure making it an optimal choice for photocatalysis, solar cells, self-cleaning coatings, and biomedical applications, leveraging its photocatalytic properties.

Figure 1a shows sample 3 after the anodization process and calcination at 450 °C, resulting in the formation of the rutile phase. **Figure 1b** shows samples 1 and 2 also subjected to anodization using the same procedure as sample 3 and calcined at 350 °C; sample 1 was calcined for 5 hours and sample 2 for 2 hours. This anodization process is crucial to form an oxide layer that facilitates the attainment of the desired phases without the need for prolonged times or high calcination temperatures, unlike literature reports (Çomaklı, 2015; Jianguo, 2010) suggesting temperatures of 500-700 °C for the anatase phase and 900 °C for the rutile phase. This underscores the significant role of anodization prior to calcination in achieving the desired phases. **Figure 1** also reveals a broad peak at approximately 15°, 2θ, corresponding to titanium (Ti), attributed to the formation of a very

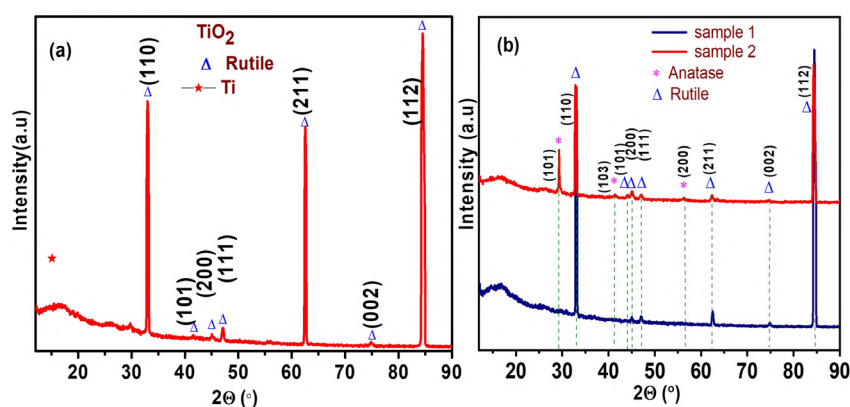


Figure 1. XRD patterns: **a.** Sample 3, calcined at 450 °C for two hours. **b** Samples 1 and 2 calcined at 350 °C for two hours (sample 2) and five hours (sample 1)

thin layer of titanium oxide during the anodization process on the foil leaving the titanium visible beneath this oxide layer. The calcination process of the samples and the duration of this process play a crucial role in the formation of the rutile and anatase phases.

Figure 1 illustrates the three samples post-anodization and calcination at varying temperatures. Rutile, characterized by a tetragonal structure with six atoms per unit cell, emerges as the most stable, featuring a slight orthorhombic distortion in the TiO_6 octahedron. Within the rutile unit cell, four oxygen atoms create a partial octahedron around Ti, while two titanium atoms (at positions $[0, 0, 0]$ and $[1/2, 1/2, 1/2]$) are individually positioned (Reference code: 01-088-1175) (Kim, 2021). Conversely, the distortion of the TiO_6 octahedron is notably more pronounced in the anatase phase that possesses a tetragonal structure (Kim, 2021; Gonçalves, 2018). Consequently, the symmetry of anatase is inferior to orthorhombic. The anatase unit cells comprise four titanium atoms at $[1/2, 1/2, 1/2]$, $[0, 0, 0]$, $[1/4, 0, -1/4]$, and $[0, 1/2, 1/4]$, and eight oxygen atoms shaping a partial TiO_6 octahedron around Ti, with each octahedron edge divided into four (Reference code: 96-101-0943).

Rutile arranges into a linear chain, whereas anatase adopts zigzag chains with a helical axis where each octahedron connects to eight other octahedra (four through shared edges and four through corners). Compared to rutile, Ti-Ti distances in anatase are larger and Ti-O distances are smaller. A slight orthorhombic distortion is observed in rutile, more pronounced in anatase. These structural disparities yield different densities and electronic band configurations. At elevated temperatures, phase transformations occur, occasionally converting anatase into rutile. Under certain experimental conditions such as high-energy milling operations, anatase may transform into amorphous phases rather than rutile. At macro and microscopic scales, rutile is deemed the thermodynamically stable phase under ambient conditions, despite anatase crystallizing first (Gonçalves, 2018). Here, we obtained the rutile phase through an anodization process followed by rapid high-temperature calcination.

In TiO_2 photocatalysis applications, the significance of the structure, whether in the form of rutile or anatase, lies in its direct influence on the photocatalytic activity of the material. This activity is affected by various factors: phase structure, crystallite size, specific surface area, and pore structure, among others. Although rutile has a smaller energy gap than anatase, its photocatalytic activity is lower due to faster electron and hole recombination rates, larger grain size, and smaller specific surface area (Ali, 2018). These findings suggest that both the crystalline structure and the physical properties of TiO_2 play a crucial role in its ability to catalyze photocatalytic reactions with significant implications for applications such as the decomposition of organic pollutants in the environment and solar energy generation. **Table 1** summarizes the phases we identified, namely rutile and anatase, and their characteristics.

The sample in **figure 1a** exhibits a rutile structure after undergoing anodization and calcination at 450 °C. Conversely, **figure 1b** shows the coexistence of both anatase and rutile phases alongside titanium. These findings underscore how minor adjustments in the anodization process or calcination temperature can significantly impact the structural phase of the samples.

Table 1. Comparing the crystal structures of TiO_2 nanostructures

Properties	Rutile	Anatase
Crystal structure	Tetragonal	Tetragonal
Space group	P42/mnm	I41/amd
Lattice constant (Å)	$a, b = 4.5170$ $c = 2.9400$	$a, b = 3.7300$ $c = 9.3700$
Density (g cm^{-3})	4.42	4.07
Volume/molecule (Å ³)	31.21	34.061 (Ali, 2018)

According to roughness parameters, the coating of the structure that grew after anodizing on the titanium surface generally exhibits a regular and homogeneous surface (**Figure 2a**) and a tubular structure with some presence of voids or removal of peaks. **Figure 2b** shows more voids and the sample is less homogeneous. In other words, examining the surface profiles reveals that sample 1 exhibits a relatively smooth surface (**Figure 1a**), whereas sample 3 appears much rougher with several defects visible. Several researchers have noted that increased surface roughness typically leads to higher surface hydrophilicity (**Zhou, 2019**).

The main parameter calculated from the Tafel polarization curves in **figure 3** was the corrosion rate of the anodic samples on the titanium substrate. Sample 1 exhibited the lowest corrosion rate and sample 2 the highest. Additionally, the most negative E_{corr} value corresponded to sample 1 and the least negative to sample 3 (**Table 2**). These electrochemical test results suggest that sample 1 has better anticorrosive properties and sample 2 exhibits greater deterioration and less corrosion resistance (**Camargo, 2009**).

Figure 3 illustrates Tafel potentiodynamic curves with the rutile curve displaying the lowest corrosion density among the samples. This suggests structural changes following calcination likely influenced by mechanical and thermal factors. These alterations are reflected in **table 2** where sample 2 exhibits superior corrosion resistance indicating a significant increase in corrosion density and velocity likely induced by microstructural variations due to applied voltages (**Lee, 2020; Li, 2019; Luttrell, 2014**).

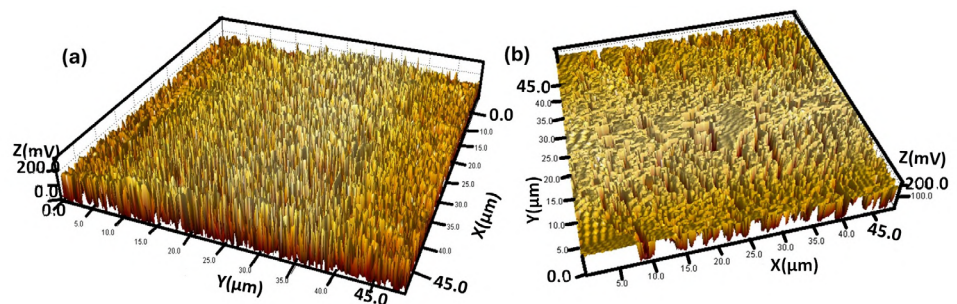


Figure 2. Atomic force microscopy (AFM) images of sample 1 calcined at 350 °C and sample 3 calcined at 450 °C for two hours

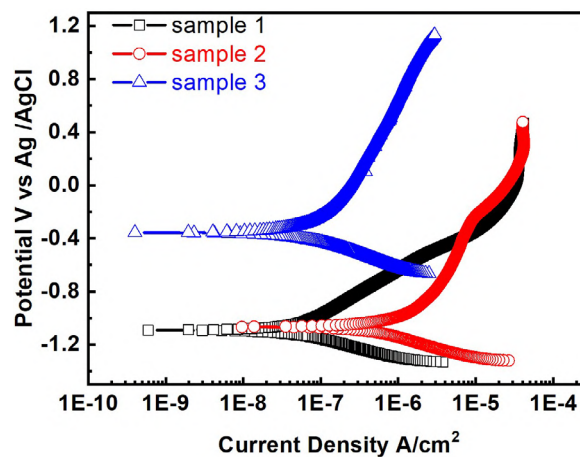
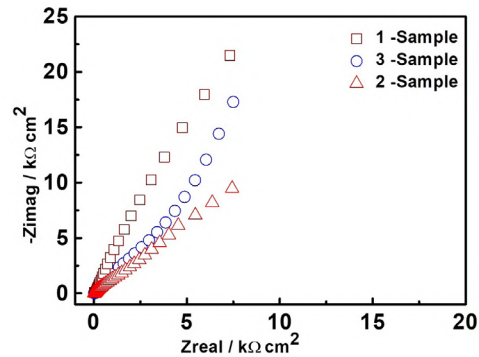


Figure 3. Tafel potentiodynamic curves of the anodized titanium samples obtained through the friction-stir agitation process

Table 2. Corrosion rate in the samples

	Sample 1	Sample 2	Sample 3
I _{corr}	52.80 nA /cm ²	1750 nA/cm ²	105.0 nA/cm ²
E _{corr}	-1.09 V vs Ag/AgCl	-1.07 V vs Ag/AgCl	-0.356 V vs Ag/AgCl
Corrosion R _a mpy	72.42 e ⁻³	2.403	144.1e ⁻³
Chi Squared	1.61	4.9	1.8 e ⁻¹

**Figure 4.** Coating impedance data

A notable correlation emerges between the initial corrosion potential recorded in each EIS measurement and the estimated values obtained from EIS data adjustments (as listed in **table 2**). This correlation highlights an increase in E_{corr} associated with a reduction in the surface area occupied by anodic regions and the expansion of oxide-protected areas.

Potentiodynamic polarization curves in **figure 3** provide valuable insights into surface changes. **Figure 4** complements this with electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of charge transfer and recombination processes at the photoelectrode-electrolyte interfaces (**Monetta**, 2017). EIS facilitates the comparison of structural properties and corrosion resistance among samples with different TiO_2 crystalline phases (rutile and anatase) correlating directly with the results of electrochemical tests. It also reveals how variations in the process such as calcination times, calcination temperature, or the composition of the anodizing electrolyte affect the structural properties and corrosion resistance of TiO_2 coatings. Parte superior do formulário

Conclusions

Our results underscore the pivotal role of calcination parameters, specifically temperature and time, in shaping the phase composition and corrosion resistance of anodized TiO_2 coatings. By systematically varying the calcination conditions post-anodization, we successfully synthesized both rutile and anatase phases of titanium dioxide. Our findings highlight that even minor adjustments in the calcination process significantly influence the observed structural phases. Furthermore, our electrochemical analyses, including Tafel polarization curves and impedance spectroscopy, provided valuable insights into the corrosion behavior of these coatings. Samples subjected to longer calcination durations exhibited lower corrosion rates, indicative of enhanced corrosion resistance. This correlation emphasizes the critical importance of optimizing calcination parameters to achieve desired crystalline phases and enhance material properties such as corrosion resistance. These results suggest promising applications in biocompatible coatings and environments prone to mechanical wear and corrosive conditions.

Acknowledgments

We thank Professor Jorge Bautista at the Francisco de Paula Santander University in Cúcuta for facilitating the laboratory space for sample collection, and to the Universidad Nacional de Colombia and the Universidad Militar Nueva Granada.

Author contributions

M.R. Joya contributed to sample acquisition and manuscript drafting. W. A. did the experimental measurements and revisions. J.B.O. oversaw the revision and discussion.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interests of any kind regarding the publication of the results of our research work.

References

- Ali, I., Suhail, M., Alothman, Z. A., Alwarthan, A. (2018). Recent advances in syntheses, properties and applications of TiO₂ nanostructures. *RSC Advances*, 8(53), 30125-30147. <https://doi.org/10.1039/c8ra06517a>
- Aperador, W., Ramírez, C., Caicedo, J.C. (2012). The effect of Ti(CN)/TiNb(CN) coating on erosion-corrosion resistance. *Ingeniería e investigación*, 32(2), 6-11. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v32n2.37522>
- Arzaee, N. A., Yodsin, N., Ullah, H., Sultana, S., Mohamad N. M. F., Mahmood Zuhdi, A. W., Mohd Yusoff, A. R. B., Jungstuttiwong, S., Mat Teridi, M. A. (2023). Enhanced hydrogen evolution reaction performance of anatase-rutile TiO₂ heterojunction via charge transfer from rutile to anatase. *Catalysis Science & Technology*, 13(24), 6937-6950. <https://doi.org/10.1039/D3CY00918A>
- Baram, N. & Ein-Eli, Y. (2010). Electrochemical Impedance Spectroscopy of Porous TiO₂ for Photocatalytic Applications. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(21), 9781-9790. <https://doi.org/10.1021/jp911687w>
- Bautista-Ruiz, J. H., Raba, A. M., Joya, M. R. (2018). Influence of the H₂O content and the time on the formation of nanostructures in a chemical solution of H₂O/HF/NH₄F/EG. *Journal of Physics: Conference Series*, 1126(1), 012042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1126/1/012042>
- Camargo, A., Aperador C., W. A., Ríos, A., Ortiz, C., Vera, E. (2009). Caracterización mediante espectroscopía de impedancia electroquímica de películas anódicas crecidas sobre Al 2024-T3. *Revista de la Sociedad Colombiana de Física*, 41(2), 261-263.
- Çomaklı, O., Yazıcı, M., Yetim, T., Yetim, A.F., Çelik, A. (2015). The effect of calcination temperatures on structural and electrochemical properties of TiO₂ film deposited on commercial pure titanium. *Surface and Coatings Technology*. 285, 298-303. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.11.055>
- Eddy, D.R., Permana, M.D., Sakti, L.K., Sheha, G.A.N., Solihudin; Hidayat, S., Takei, T., Kumada, N., Rahayu, I. (2023). Heterophase Polymorph of TiO₂ (Anatase, Rutile, Brookite, TiO₂ (B)) for Efficient Photocatalyst: Fabrication and Activity. *Nanomaterials*, 13, 704. <https://doi.org/10.3390/nano13040704>
- Gabellini, L., Calisi, N., Martinuzzi, S. M., Taurino, R., Innocenti, M., Bacci, T., Borgioli, F., Galvanetto, E., Caporali, S. (2023). Effect of Bath Composition on Titanium Anodization Using the Constant-Current Approach: A Crystallographic and Morphological Study. *Coatings*, 13(7), 1284. <https://doi.org/10.3390/coatings13071284>
- Gonçalves, M., Pereira, J., Matos, J., Vasconcelos, H. (2018). Photonic Band Gap and Bactericide Performance of Amorphous Sol-Gel Titania: An Alternative to Crystalline TiO₂. *Molecules*, 23(7), 1677. <https://doi.org/10.3390/molecules23071677>
- Jiaguo Y. & Bo W. (2010). Effect of calcination temperature on morphology and photoelectrochemical properties of anodized titanium dioxide nanotube arrays. *Applied Catalysis B: Environmental*, 94(3-4), 295-302. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.12.003>
- Kim, M. G., Kang, J. M., Lee, J. E., Kim, K. S., Kim, K. H., Cho, M., Lee, S. G. (2021). Effects of Calcination Temperature on the Phase Composition, Photocatalytic Degradation, and Virucidal Activities of TiO₂ Nanoparticles. *ACS Omega*, 6(16), 10668-10678. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01684>
- Kim, S. A., Hussain, S. K. K., Abbas, M. A., Bang, J. H. (2022). High-temperature solid-state rutile-to-anatase phase transformation in TiO₂. *Journal of Solid-State Chemistry*, 315, 123510. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2022.123510>

- Lee, V. S., Cho, A. Y., Rim, Y. S., Park, J.-Y., Choi, T. (2020). Synergistic Design of Anatase–Rutile TiO₂ Nanostructured Heterophase Junctions toward Efficient Photoelectrochemical Water Oxidation. *Coatings*, 10(6), 557. <https://doi.org/10.3390/coatings10060557>
- Li, B., Zhang, L., Li, Y., Li, H., Zhou, L., Liang, C., Wang, H. (2019). Corrosion resistance and biological properties of anatase and rutile coatings on titanium surface. *Chemistry Letters*, 48, 1355-1357. <https://doi.org/10.1246/cl.190549>
- Li, L., Lyu, L., Gui, J., Sun, X., Qian, Y., Yang, G. (2019). Facet-dependent interfacial charge transfer in TiO₂/nitrogen-doped graphene quantum dots heterojunctions for visible-light driven photocatalysis. *Catalysts*, 9(4), 345. <https://doi.org/10.3390/catal9040345>
- Lin, J., Heo, Y. U., Nattestad, A., Bachmatiuk, A., Ha, J. S., Zhang, X. (2014). 3D hierarchical rutile TiO₂ and metal-free organic sensitizer producing dye-sensitized solar cells with 8.6% conversion efficiency. *Scientific Reports*, 4, 5769. <https://doi.org/10.1038/srep05769>
- Luttrell, T., Halpegamage, S., Tao, J., Kramer, A., Sutter, E., Batzill, M. (2014). Why is anatase a better photocatalyst than rutile - Model studies on epitaxial TiO₂ films. *Scientific Reports*, 4, 4043. <https://doi.org/10.1038/srep04043>
- Manut, A.S., Zoofakar, M.H. Mamat, N.S., Ghani, Ab M. Zolkapli, M. (2020) Characterization of Titanium Dioxide (TiO₂) Nanotubes for Resistive-type Humidity Sensor. *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2020, pp. 104-107, <https://doi.org/10.1109/ICSE49846.2020.9166854>
- Mansfeldova, V., Mansfeldova, V., Zlamalova, M., Tarabkova, H., Janda, P., Vorokhta, M., Piliat, L., Kavan, L. (2021). Work Function of TiO₂ (Anatase, Rutile, and Brookite) Single Crystals: Effects of the Environment. *The Journal of Physical Chemistry C*, 125(3), 1902-1912. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c10519>
- Mateus, H. M., Bautista-Ruiz, J., Barba-Ortega, J., Joya, M. R. (2019). Formation of titanium oxide nanotube arrays by controlling H₂O and time through anodic oxidation. *Rasyan. Journal of Chemistry*, 12(3), 1304-1314. <https://doi.org/10.31788/RJC.2019.1235265>
- Monetta, T., Acquesta, A., Carangelo, A., Bellucci, F. (2017). TiO₂ nanotubes on Ti dental implant. Part 2: EIS characterization in Hank's solution. *Metals*, 7(6), 220. <https://doi.org/10.3390/met7060220>
- Parambil, N. S. K., Raphael, S. J., Joseph, P., Dasan, A. (2023). Recent advancements toward visible-light-driven titania-based nanocomposite systems for environmental applications: An overview. *Applied Surface Science Advances*, 18, 100487. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100487>
- Pasquale, L., Tavella, F., Longo, V., Favaro, M., Perathoner, S., Centi, G., Ampelli, C., Genovese, C. (2023). The Role of Substrate Surface Geometry in the PhotoElectrochemical Behavior of Supported TiO₂ Nanotube Arrays: A Study Using Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). *Molecules*, 28, 3378. <https://doi.org/10.3390/molecules28083378>
- Quitério, P., Apolinário, A., Sousa, C. T., Costa, J. D., Ventura, J., Araújo, J. P. (2015). The cyclic nature of porosity in anodic TiO₂ nanotube arrays. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(7), 3692-3698. <https://doi.org/10.1039/c4ta04607b>
- Sarngan, P. P., Lakshmanan, A., Sarkar, D. (2022). Influence of Anatase-Rutile Ratio on Band Edge Position and Defect States of TiO₂ Homo Junction *Catalyst*. *Chemosphere*, 286 (Part 2), 131692. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131692>
- Sanoja-López, K. A., Loo-Molina, N. S., Luque, R. (2024). An overview of photocatalyst eco-design and development for green hydrogen production. *Catalysis Communications*, 106859. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2024.106859>
- Suhadolnik, L., Marinko, Ž., Ponikvar-Svet, M., Tavčar, G., Kovač, J., & Čeh, M. (2020). Influence of Anodization-Electrolyte Aging on the Photocatalytic Activity of TiO₂ Nanotube Arrays. *Journal of Physical Chemistry C*, 124(7), 4073-4080. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b09522>
- Thakur, N., Thakur, N., Kumar, A., Thakur, V. K., Kalia, S., Arya, V., Kumar, A., Kumar, S., Kyzas, G. Z. (2024). A critical review on the recent trends of photocatalytic, antibacterial, antioxidant and nanohybrid applications of anatase and rutile TiO₂ nanoparticles. *Science of The Total Environment*, 914, 169815. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169815>
- Yu, H., Li, S., Peng, S., Yu, Z., Chen, F., Liu, X., Guo, J., Zhu, B., Huang, W., Zhang, S. (2023). Construction of rutile/anatase TiO₂ homo junction and metal-support interaction in Au/TiO₂ for visible photocatalytic water splitting and degradation of methylene blue. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(3), 975-990. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.010>
- Zhou, L., Liang, C., Wang, H. (2019). Corrosion resistance and biological properties of anatase and rutile coatings on titanium surface. *Chemistry Letters*, 48, 1355-1357. <https://doi.org/10.1246/cl.190549>

Artículo original

Aproximación a la biología de *Procambarus clarkii* en la dársena de la planta Tibitoc (Zipaquirá, Colombia)

Approach to the biology of *Procambarus clarkii* in the Tibitoc plant dock (Zipaquirá, Colombia)

Carlos A. Rivera^{1,*}, Angela Zapata¹, Isabella Gonzalez-Gamboa²,
Mabel G. Pimiento-Ortega², Andrea C. Sarmiento-Toro², Fabian L. Mesa-Roberto²,
Elisabeth Jiménez-Carmona², Gina A. Romero-Galindo², Lina F. Mora Ballen¹,
Diana C. Villamil-Pasito¹, William Villamil¹, Nubia León-Lopez^{1,*}

¹Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá E.S.P., Bogotá, Colombia

²Organización Luis Fernando Romero Sandoval Ingenieros S.A.S., Villavicencio, Colombia

Resumen

La langostilla de río o cangrejo rojo americano (*Procambarus clarkii*) es una especie invasora que altera los ecosistemas y la calidad del agua, pues es portadora de organismos dañinos para la salud y, además, desestabiliza estructuras al remover materiales cuando cava sus madrigueras. El objetivo del presente estudio fue estudiar aspectos poblacionales, morfométricos y dietarios de *P. clarkii* en la dársena de la planta Tibitoc. Se hicieron tres muestreos utilizando en cada uno 120 trampas de tipo Zreal y Accesotech, cebadas con comida de gato durante 24 horas. Los resultados sugieren que la densidad fue baja (300 ind/ha), aunque el potencial de invasión puede ser alto debido a que las hembras llevaban más de 500 huevos. La proporción de sexos fue 1:1, y las hembras presentaron diferentes estados de maduración, lo que indica desoves consecutivos, y tenían mayor tamaño y peso que los machos. Los datos morfométricos de los especímenes recolectados y sus rasgos reproductivos registraron valores menores a los reportados en la literatura, lo que sugiere que los requerimientos alimenticios no eran adecuados y, probablemente, no se daban todas las condiciones para el desarrollo de la población. La dieta estuvo constituida por detritus, material vegetal, algas, macroinvertebrados y peces, lo que concuerda con lo informado en otros estudios. El tiempo estimado de vida media de *P. clarkii* fue de 2,3 años. Para controlar la población de esta especie en la dársena de la planta Tibitoc, se recomiendan capturas pasivas anuales con trampas Accesotech (o de diseño parecido).

Palabras clave: Especie invasora; Control poblacional; Estacionalidad climática; Decápoda.

Abstract

The red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) is an invasive species that alters ecosystems and water quality representing a health risk, as it carries damaging organisms; besides, it destabilizes structures by removing materials when it digs its burrows. Here we studied the *P. clarkii* population and morphometric and dietary aspects in the Tibitoc plant dock. We did three samplings using 120 Zreal and Accesotech traps baited with cat food for 24 hours on each occasion. Our results suggest that the density was low (300 ind/ha), although the invasive potential may be high as females presented more than 500 eggs. The sex ratio was 1:1; the females presented different stages of maturation, indicating consecutive spawning, and they were larger and heavier than the males. The morphometric data of the specimens collected and their reproductive traits showed lower values than those recorded in the literature, suggesting that the nutritional requirements were not adequate and not all the conditions for the development of the population were met. The species' lifespan was 2.3 years. As in other studies, the diet was detritus, plant material, algae, macroinvertebrates, and fish. To control the species population in the Tibitoc plant dock, we recommend annual passive captures using Accesotech traps (or similar designs).

Keywords: Invasive species; Population control; Climatic seasonality; Decapoda.

Citación: Carlos A. Rivera, *et al.*
Aproximación a la biología de
Procambarus clarkii en la dársena de la
planta Tibitoc (Zipaquirá, Colombia).
Revista de la Academia Colombiana de
Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
48(188):491-507, julio-septiembre de
2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2557>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Carlos A. Rivera;
limnorivera@yahoo.com.ar;
Nubia León-López;
nileon@acueducto.com.co

Recibido: 31 de enero de 2024

Aceptado: 4 de julio de 2024

Publicado en línea: 5 de agosto de 2024



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

Introducción

La langostilla de río o cangrejo rojo americano (*Procambarus clarkii* Girard, 1852) es una especie ampliamente conocida por su rápida dispersión y su capacidad de colonizar una gran variedad de ambientes tanto en zonas templadas como tropicales (Scalici & Gherardi, 2007; Nunes *et al.*, 2017). Esta especie posee una gran plasticidad ecológica al tolerar aguas contaminadas y con baja concentración de oxígeno disuelto, además de sobrevivir a períodos prolongados de sequía (Re-Araujo & Bückle-Ramírez, 1985).

La langostilla se ha reportado habitando en una gran variedad de ecosistemas acuáticos, principalmente en ríos de curso lento, marismas, estanques, sistemas de riego y campos de arroz, aunque también es posible encontrarla en ríos torrentosos (Gherardi *et al.*, 2002; Dörr *et al.*, 2006; Cruz & Rebelo, 2007; Scalici *et al.*, 2010). *P. clarkii* tiene un gran impacto negativo en los ecosistemas acuáticos que coloniza porque desplaza a otras especies de decápodos y consume una gran variedad de organismos, incluidas plantas acuáticas, macroinvertebrados, peces y anfibios (Bondar *et al.*, 2005; Chucholl, 2013; Fernández-Cardenete *et al.*, 2013; Souty-Grosset *et al.*, 2016), por lo que su introducción puede reducir la biodiversidad y aumentar la homogeneización de las comunidades bióticas. Además, por su rápido aumento poblacional y sus hábitos excavadores, puede modificar estructuralmente los nuevos ambientes al aumentar la turbiedad del agua (Gherardi & Acquistapace, 2007; Pineda & Rodríguez, 2012), al tiempo que sus túneles o madrigueras pueden afectar estructuras como los diques o desestabilizar el margen de los ríos (Faller *et al.*, 2016; Haubrock *et al.*, 2019; Lemmers *et al.*, 2022; Svoboda, 2017).

La langostilla también afecta la salud humana y la fauna nativa, ya que transmite el hongo *Aphanomyces astaci* (Svoboda *et al.*, 2017) y es transmisora de la tularemia (Ordax, 2003), la cual afecta a mamíferos silvestres. También se ha reportado en sus tejidos *Cryptosporidium oocysts* y huevos de varias especies de helmintos (Zhu *et al.*, 2019). *P. clarkii* es hospedador intermedio de trematodos del género *Paragonimus* spp., que genera una enfermedad pulmonar granulomatosa inflamatoria crónica en humanos llamada paragonimiasis. En Colombia se la ha reportado como hospedadora de *Paragonimus* en especímenes recolectados en Cundinamarca (Phillips, 2019).

Procambarus clarkii fue introducida en Colombia en 1985 (Flórez-Brand & Espinosa-Beltrán, 2011) con el objeto de hacer experimentos relacionados con su potencial alimenticio. En 1988 se presentó una fuga accidental en la cuenca del río Palmira (Álvarez-León & Gutiérrez-Bonilla, 2007) y fue reportada en Jamundí, Santiago de Cali, Yocoto, San Juan Bautista de Guacarí y Guadalajara de Buga, municipios de la cuenca media del río Cauca (Flórez-Brand & Espinosa-Beltrán, 2011). El primer registro de *P. clarkii* en Cundinamarca fue en la cuenca del río Bogotá, cerca de Briceño, en el 2004 (Campos, 2005). En el 2012 se reportó por primera vez en el departamento de Boyacá (Arias-Pineda & Rodríguez, 2012), en donde actualmente tiene una amplia distribución. Entre el 2015 y el 2017 se la encontró en la sabana de Bogotá, en los municipios de Suesca, Fúquene, Chía y en los humedales y parques urbanos de la ciudad de Bogotá (Arias-Pineda & Pedroza-Martínez, 2018). También hay un reporte en el departamento de Santander.

Recientemente la especie fue incluida en la lista de especies invasoras de Colombia (Resolución 67 de enero de 2023 del Ministerio de Medio Ambiente) y ya se cuenta con una primera propuesta de plan de manejo en la región (CAR, 2016) y en Bogotá se expidió una resolución sobre su manejo y control (Resolución 3919 de 2021, Secretaría Distrital de Ambiente). Un primer paso en la implementación de medidas de manejo o control de *P. clarkii* requiere establecer la línea de base de sus poblaciones. Se sabe que la especie puede adaptarse fácilmente en el ámbito local modificando aspectos de su ciclo de vida (Dörr & Scalici, 2013). Algunos modelos también sugieren que su capacidad de invasión en el país podría ser muy alta (Camacho *et al.*, 2021). En este contexto, el objetivo de nuestro estudio fue establecer los aspectos básicos de la biología, la ecología

y la dieta del cangrejo rojo americano en la dársena de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Tibitoc. A partir de la información recopilada, se estableció el estado de las poblaciones, y se plantean sugerencias para su control.

Métodos

En el 2021 y el 2022 se realizaron tres muestreos (diciembre de 2021 y enero y marzo de 2022), en la estructura de pretratamiento del agua del río Bogotá en la planta Tibitoc conocida como dársena (**Figura 1**). Durante los muestreos se probaron dos tipos de trampas comerciales diseñadas para la captura de decápodos y se tomaron muestras de agua para caracterizar las condiciones del hábitat de los cangrejos.

Recolección de los individuos

En cada uno de los muestreos se instalaron trampas de tipo Zreal y Accesotech cebadas con alimento procesado para gato (**Figura S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>). Se instalaron 120 trampas por muestreo, 60 de tipo Zreal y 60 de Accesotech, repartidas en tres polígonos o estaciones de muestreo (**Figura 1**). De las 120 trampas, la mitad se usaron para el análisis de la efectividad de los métodos de captura y

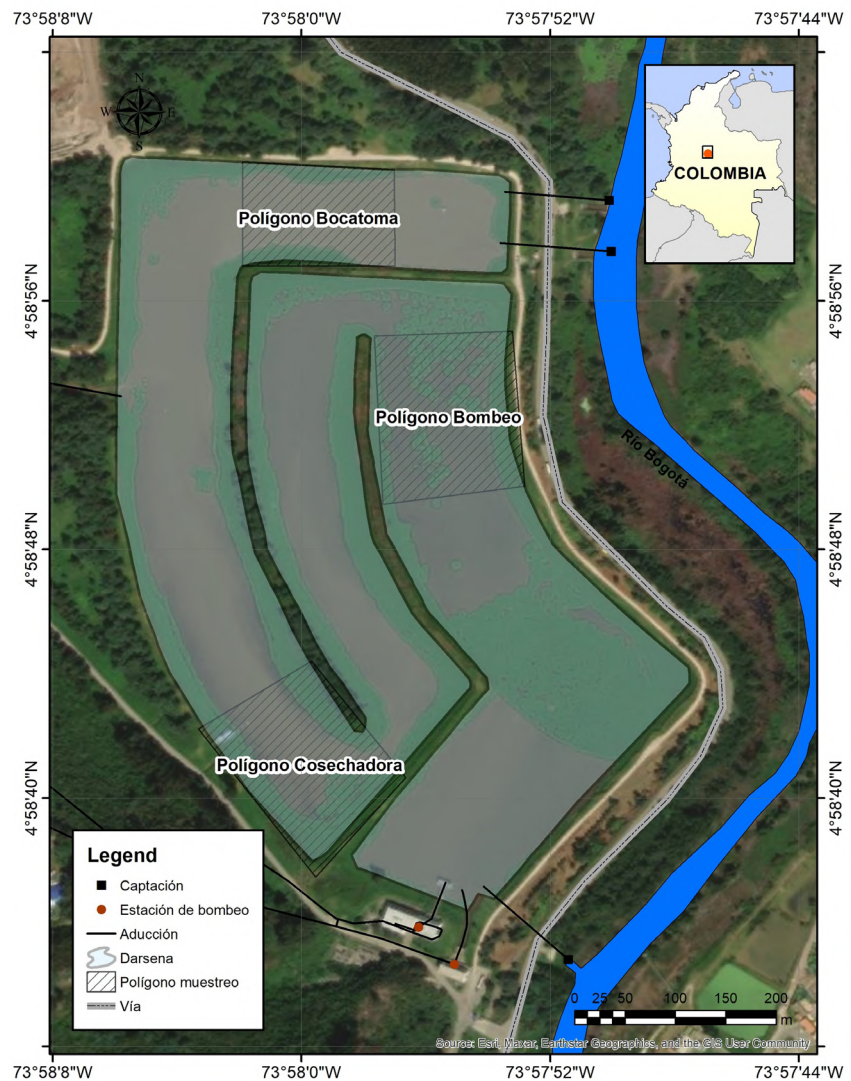


Figura 1. Mapa del área de estudio

medición de la densidad, en tanto que la otra mitad se usó para los análisis de la biología y la ecología trófica de la especie. El primer polígono se ubicó en la zona de ingreso del agua a la dársena y los otros dos en puntos intermedios antes de la zona de bombeo. En cada polígono, las trampas se colocaron paralelas al flujo del agua y en una de las zonas litorales cada 5 m; en el interior de cada una se dispuso un recipiente plástico agujereado (cebador) con 50 g de alimento macerado para gatos del tipo *pellet* seco que se usó como atrayente; el cebo se escogió después de evaluar diferentes tipos. Las trampas se dejaron durante 24 horas.

Todos los especímenes recolectados durante el estudio se sacrificaron forzando el descenso de la actividad metabólica por choque térmico a baja temperatura después de colocar a los individuos en bolsas plásticas e introducirlos en una nevera con hielo. Al llegar al laboratorio, los cangrejos se almacenaron en un congelador a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un periodo no inferior a 48 horas (Sun *et al.*, 2012).

Caracterización del ambiente

En cada uno de los muestreos se tomaron medidas *in situ* de pH, conductividad, oxígeno y temperatura del agua utilizando una sonda multiparamétrica HACH HQ40d. Además, se recolectaron muestras de agua para analizar los parámetros descritos en la **tabla 1**. Todos los análisis siguieron los métodos estandarizados según **Baird & Bridgewater, 2017; Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB, 2020**). En los muestreos también se recolectaron muestras para analizar la estructura de las comunidades de fitoplancton, zooplancton y macroinvertebrados.

Estudio de la biología y ecología de la especie

Los individuos recolectados fueron sexados a partir de las características morfológicas (Delsinne *et al.*, 2013) que se describen en la **figura 2**, se midieron con un calibrador digital y se pesaron en una balanza analítica. Se tomaron las siguientes medidas: largo total (LT), el cual se toma desde la punta del rostro hasta el final del telson; largo del cefalotórax (LC), desde la punta del rostro hasta el final del cefalotórax; ancho del cefalotórax (AC) medido en su parte media, y ancho del abdomen (AA) medido en el primer somito abdominal.

Para el análisis de las tallas, los datos se dividieron en intervalos de 5 mm para un total de 10 intervalos y, posteriormente, se utilizó el parámetro LC para obtener la distribución de frecuencias a partir de la composición de las tallas en el programa FAO-ICLARM Stock Assessment Tools (FiSAT II) (Gayanilo *et al.*, 2005; Mistri *et al.*, 2019). En el análisis del crecimiento se utilizó la ecuación de Von Bertalanffy:

$$L(t) = L_{\infty} [1 - \exp(-k(t - t_0))],$$

donde $L(t)$ es la longitud a la edad t , L_{∞} es la longitud asintótica, k el parámetro de curvatura de la función de crecimiento de Von Bertalanffy, y t_0 el parámetro de condición inicial. A partir de los datos se obtuvo la longevidad esperada mediante la ecuación:

$$t_{\max} = \left(\frac{3}{k}\right) + t_0,$$

donde t_{\max} es el tiempo máximo de vida, k el parámetro de curvatura obtenido de la ecuación de Von Bertalanffy y t_0 el parámetro de condición inicial obtenido de la ecuación anterior. Estos análisis se desarrollaron en el programa FiSAT II.

Para el análisis del estado reproductivo las hembras, estas se dividieron en cuatro categorías: C1, inmaduras, es decir, hembras recolectadas que no superaban los 6 cm de longitud total y no portaban huevos; C2, individuos de tamaño superior a 6 cm de longitud total sin huevos externos ni internos; C3 ovígeras, hembras que en la disección presentaron huevos internos en el cefalotórax, y C4, postovígeras, hembras con presencia de huevos externos adheridos en los pleópodos. Los machos se dividieron en dos categorías: machos inmaduros, recolectados con un tamaño inferior a 6 cm de longitud total y que no presentaban ganchos copuladores visibles (F1), y machos maduros, recolectados con un tamaño superior a 6 cm y presencia de ganchos copuladores bien desarrollados (F2).

Tabla 1. Resumen del comportamiento físico y químico de la dársena de Tibitoc. Se presentan los valores de los tres muestreos y los valores promedio y el rango de desviación estándar (DS) para la entrada y salida de la dársena entre 2004 y 2022. n: número de datos

Variable	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Entrada a la dársena				Salida de la dársena			
	dic-21	ene-22	mar-22	promedio	rango	DS	n	promedio	rango	DS	n
Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	38,8	59,7	31,4	30,3	5,18-77,93	12,3	90	29,3	3,3-61,6	10,8	96
Calcio total (mg/L)	8,18	9,01	12	7,4	3,8-22,6	3,5	38	6,9	3,6-13,1	2,4	40
Carbono orgánico total (mg/L)	10,4	15,2	9,16	7,6	1,5-46,2	5,0	92	7,2	2,3-22,9	3,1	100
Carbono inorgánico (mg/L)	14	4,29	5	6,8	2,3-20,3	3,1	79	12,3	2-26,2	4,4	107
Cloruros (mg/L)	17	11,2	13,1	13,1	1,6-68,7	8,5	101	7,1	2,3-18,4	3,4	86
Clorofila (mg/m ³)	0,5	2,1464	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Color verdadero (UPC)	10	95	41	28,3	9-66	12,9	87	25,9	8-90	12,3	91
DBO (mg O ₂ /L)	9	15	7	6,3	1-45	7,2	101	4,9	0,5-25	4,7	108
DQO (mg O ₂ /L)	26,2	38,1	22,9	29,9	5-104,6	15,0	101	26,7	5-97,5	14,6	108
Dureza cálcica (mg CaCO ₃ /L)	18,8	15,6	21,8	18,9	7,2-56,7	9,6	37	18,8	10,6-38,5	7,5	36
Dureza total (mg CaCO ₃ /L)	37,6	23,9	23,4	25,9	4,4-158	20,0	60	24,9	13-57	9,8	53
Fósforo total (mg/L)	0,05	0,22	0,315	0,3	0,01-2,24	0,3	89	0,3	0,01-2,0	0,3	95
Hierro total (mg/L)	1,54	1,26	1,49	1,6	0,1-4,2	0,7	101	1,2	0,055-3,4	0,5	108
Magnesio total (mg/L)	0,666	1,51	1,76	1,6	0,023-5,7	0,8	86	1,6	0,49-4,91	0,7	91
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,72	1,39	0,77	1,0	0,01-3,73	0,7	101	0,9	0,03-3,9	0,7	107
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,133	0,0851	0,005	0,1	0,005-0,86	0,1	101	0,1	0,001-0,92	0,1	107
NH ₄ ⁺ (mg/L)	<4,0	<4,0	<4,0	0,6	0,01-1,9	0,5	101	0,6	0,05-1,99	0,5	108
NTK (mg/L)	<4,0	<4,0	<4,0	2,0	0,1-11,27	1,3	90	1,6	0,1-5,01	0,8	96
Sílice (mg/L)	6,85	5,95	5,5	6,3	2,133-15,7	2,7	84	5,7	0,0464-12,9695	2,4	86
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	10	15	25	45,5	3,5-255	37,3	89	15,7	4,8-66,875	9,3	95
Sólidos totales (mg/L)	60	76	105	138,5	75,8-330,6	47,7	101	107,3	44,8-198	26,1	108
Sólidos disueltos totales (mg/L)	72	59	75	97,7	27,2-214	33,5	100	93,4	27,2-185	25,0	107
Sólidos sedimentables (mg/L)	0,1	0,1	2,5	0,1	0,1-0,3	0,0	35	0,1	0,05-0,8	0,1	34
Turbiedad NTU	2	6,8	8,5	30,7	2,1-170	27,8	101	14,9	1,8-70	9,3	108
Fósforo soluble (mg/L)	0,05	0,052	0,141	0,2	0,01-1,37	0,3	51	0,2	0,0001-1,455	0,2	61
pH	6,65	6,51	7,73	6,9	6,34-7,6	0,3	101	7,0	6,34-7,65	0,3	108
Conductividad µS/cm	181	138	146,5	126,0	22-778	75,2	101	125,4	14-776	71,5	108
Oxígeno disuelto (mg/L)	1,36	2,68	3,85	2,2	0,1-6,4	1,6	89	2,9	0,1-7,1	1,8	95
Temperatura (°C)	27,99	23,43	20,2	18,5	7,4-23,3	2,7	99	19,2	12-24,4	2,4	106
Coliformes totales (UFC/100 mL)	178	300000	9540	105751,5	906-2950000	299068,8	101	16824,4	133,4-141360	22174,2	108
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 mL)	<1,0	8000	35	4397,9	1-61300	8061,1	100	787,8	<1,0-9804	1397,2	108
SO ₄ ³⁻ (mg/L)	<10,0	13,1	<10,0	10,5	1-97,12	11,4	87	9,5	0,5-33,0962157	5,7	92

Se calculó el índice gonadosomático (IGS) en 65 hembras y 82 machos sexualmente maduros usando la ecuación:

$$IGS = \frac{PG}{PHsT \times 100},$$

donde PG es el peso de las gónadas y PHsT el peso húmedo del organismo sin tenazas.

El índice hepatosomático (IHS) se calculó en 214 individuos de todas las categorías sexuales con la ecuación:

$$IHS = \frac{PH}{PHsT \times 100},$$

donde PH es el peso del hepatopáncreas y PHsT el peso húmedo del organismo sin tenazas.

El conteo de los huevos internos se hizo en 65 hembras de categoría tres (C3) usando un estereoscopio. En las hembras de categoría 4 (C4) los huevos solo se cuantificaron en los tres únicos individuos capturados. Los huevos externos se fotografiaron con una cámara Axio Cam en estereoscopio Carl Zeiss y se midieron utilizando el programa Zen 3.4 lite.

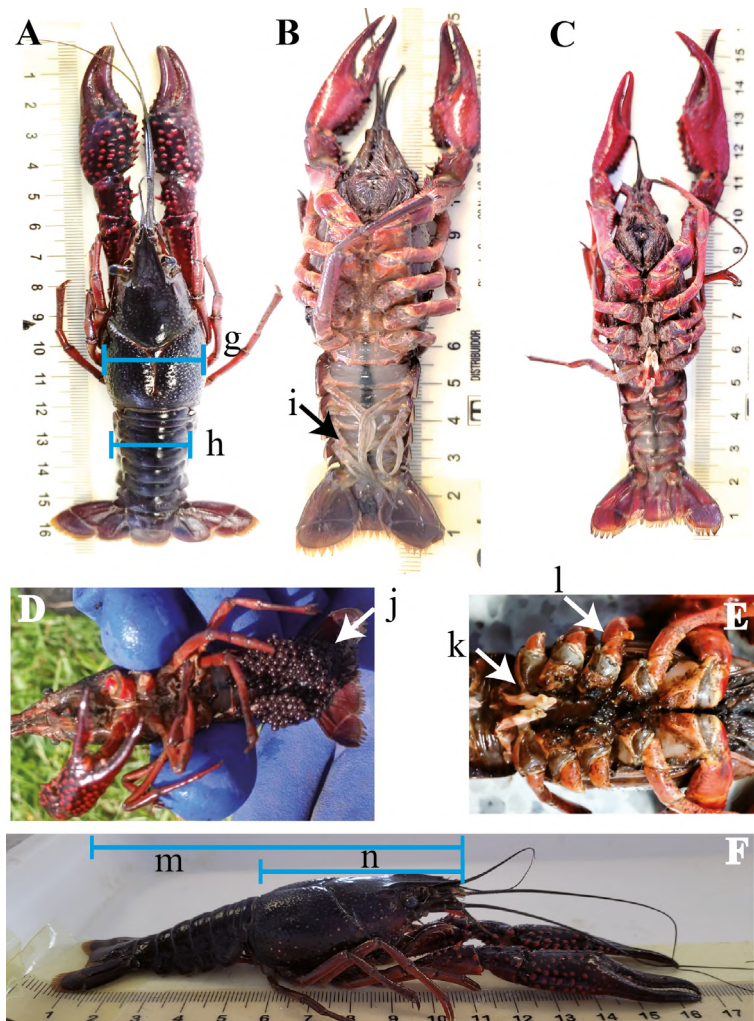


Figura 2. Registro fotográfico de *P. clarkii*. A. vista dorsal, señalando el ancho del cefalotórax (g) y el ancho abdominal (h). B. vista ventral de una hembra en donde se observan los pleópodos (i). C. vista ventral de un macho. D. vista ventral de una hembra con huevos, en donde se observan los huevos en posición externa. E. vista ventral de un macho en el que se señalan los pleópodos modificados (k) y los ganchos copuladores (l). F. Aspecto general de *P. clarkii* en vista lateral, mostrando la forma de medir la longitud total (m) y la longitud del cefalotórax (n)

El índice de maduración es un valor que provee información sobre el grado de madurez de las gónadas de las hembras a partir de su coloración. Para calcularlo se tomaron las gónadas extraídas de las hembras de cada muestreo y se categorizaron por color siguiendo la metodología de **Guerra & Niño** (1996) y **Anastacio et al.** (2009). Se establecieron cuatro estados de maduración según las siguientes categorías: estado K1, gónadas blancas; estado K2, gónadas amarillas; estado K3, gónadas naranjas, y estado K4, gónadas cafés. Se asume que las gónadas de color más intenso están en un estado de madurez más avanzado. Después de determinar la categoría por color, se estimó el índice de maduración (IM) en cada muestreo:

$$IM = \sum_{i=0}^n \frac{\text{Estado k de los individuos}}{N},$$

donde N es el número total de las hembras analizadas.

Para evaluar la dieta de la langostilla, se seleccionaron 51 machos y 40 hembras. Se estimó el porcentaje de llenado del estómago y se separaron los ítems alimentarios mediante disección usando pinceles finos y evitando raspar células de la pared del estómago. Los ítems alimentarios se separaron en dos grandes grupos: tejido animal o vegetal, y se identificaron hasta el menor nivel taxonómico posible.

Análisis de datos

Para comparar la densidad y la abundancia de organismos según las estaciones de muestreo y el tipo de trampa, se determinó primero la normalidad de los datos usando el test de Shapiro-Wilk. Posteriormente se aplicó el análisis de varianza o prueba t para los datos con distribución normal y el análisis de Kruskal Wallis o test de Mann Whitney para aquellos con distribución no normal. Estos análisis se realizaron en el software Past 4.0. La relación entre la longitud y el peso se evaluó mediante regresiones lineales (**Loureiro et al.**, 2019). En el análisis de estructura de tallas se utilizó el método de Normsep con el algoritmo Simplex (**Gayanilo et al.**, 2005) en el programa FiSAT II.

Resultados

La dársena presenta espejos de agua abiertos con un tiempo de renovación de agua de menos de 48 horas. La zona litoral se caracterizó por la presencia de macrófitas, principalmente *Ludwigia sp.*, alcanzando coberturas en esta zona del 80, 98 y 79 % en los tres muestreos, respectivamente. Otras macrófitas presentes, aunque en muy baja proporción, fueron *Juncus effusus* y *Lemna minor*. La dársena funciona como un sistema de pre-tratamiento y en su recorrido se reduce la concentración de sólidos totales y de carbono orgánico (**Tabla 1**). En general, las aguas de la dársena son turbias y el pH es ligeramente ácido a neutro. Variables como el oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los coliformes totales indicaron que el agua es de regular calidad. Asimismo, las concentraciones de nutrientes fueron altas. Durante el periodo de los muestreos se presentaron condiciones con alta precipitación pluvial, cuando lo habitual en estos meses son las condiciones de sequía (**Figura S2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>). Los valores de nutrientes y de carga orgánica fueron semejantes a la media histórica del sistema.

El fitoplancton registró una comunidad muy variable según los periodos, pero estuvo dominado principalmente por cianobacterias (Microcystaceae, Oscillatoriaceae y Nostocaceae) y diatomeas (Eunotiaceae y Aulacoseriaceae), aunque en muy bajas densidades (**Figura S3**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>). El zooplancton tuvo menor variación entre periodos y presentó una comunidad dominada por protozoarios (Arcellidae) y rotíferos (Brachionidae). La familia Chironomidae dominó la comunidad de macroinvertebrados; otros grupos de macroinvertebrados presentes fueron Physidae y Hyalellidae (**Tabla S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>), lo que sugiere una calidad del agua regular.

Los individuos de *P. clarkii* recolectados tuvieron un peso inferior a los 40 g y una longitud total menor a 12 cm (**Tabla 2**). Las hembras registraron un mayor peso y talla en comparación con los machos. Estacionalmente, los resultados fueron semejantes, pero

Tabla 2. Resumen estadístico del peso y las medidas morfométricas de *P. clarkii* capturados en la dársena de Tibitoc

Variable	Sexo	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Peso húmedo total (g)	Hembras	0,1	41,8	21,2	23,2	10,5	0,49
	Machos	0,4	41,3	19,5	21,6	9,3	0,48
Peso sin tenazas (g)	Hembras	0,1	34,6	18,6	20,0	8,9	0,48
	Machos	0,3	30,5	15,6	17,2	6,8	0,43
Longitud de cefalotórax (mm)	Hembras	9,2	58,8	45,7	48,7	11,4	0,25
	Machos	13,1	56,7	44,1	46,8	9,2	0,21
Ancho de cefalotórax (mm)	Hembras	3,6	27,8	20,3	22,0	5,3	0,26
	Machos	4,9	25,2	19,6	20,9	4,3	0,22
Ancho de abdomen (mm)	Hembras	2,5	23,2	17,0	18,5	4,7	0,28
	Machos	3,0	20,4	15,6	16,5	3,5	0,23
Longitud total (mm)	Hembras	17,9	117,7	90,5	97,6	24,2	0,27
	Machos	24	113,1	87,5	93,3	18,0	0,21

con una tendencia a valores de peso y talla más altos durante el tercer muestreo (**Figura 3**). El número total de individuos recolectados varió entre los muestreos, con un mayor número de capturas en el segundo y el tercero. La captura de machos presentó diferencias significativas entre periodos, pero no entre polígonos.

La relación entre la longitud total y la del cefalotórax indica que esta última medida puede ser usada como un parámetro poblacional. La relación entre las dos longitudes mostró una menor variación en los datos de los machos que en los de las hembras, lo que sugiere diferencias en la morfología de los sexos según la edad (**Figura 4**). Las hembras presentaron un dimorfismo dependiente de su talla, es decir, registraron una talla total menor con respecto a la longitud del cefalotórax cuando medían menos de 90 mm. Por el contrario, los machos presentaron una relación constante de las dos medidas en todas las tallas.

La distribución temporal de la longitud total evidenció que la mayoría de los individuos estuvo por encima de los 75 mm en los tres muestreos (**Figura 4**), probablemente como efecto de la selectividad del tipo de trampas usadas. En general, se recolectaron pocos individuos de talla baja (<25 mm). Los resultados también mostraron que la probabilidad de encontrar individuos por encima de los 50 mm es baja.

La relación entre la longitud del cefalotórax y el peso sin tenazas siguió un comportamiento exponencial, con una mayor correspondencia en las hembras que en los machos (**Figura 4**). Las hembras tuvieron un crecimiento de tipo alométrico positivo ($b=3,2$; $p<0,0001$), mientras que en los machos se registró un crecimiento alométrico negativo ($b=2,76$; $p<0,0001$). En el primer muestreo se observó un crecimiento alométrico positivo, en tanto que en el segundo la población presentó un crecimiento alométrico negativo y en el tercero el crecimiento fue isométrico. A partir del análisis de tallas, se observó que la población presentó una densidad máxima (K) de 1,3 y una longitud asintótica (L_{∞}) de 56,9, lo que sugiere una longevidad esperada (t_{\max}) del cangrejo rojo americano en la dársena de 2,3 años.

En cuanto al grado de madurez de los individuos, las hembras con huevos internos presentes (C3) fueron las más abundantes, en tanto que los machos maduros dominaron en los muestreos 2 y 3 (**Figura S4**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/>

view/2557/3980). En el segundo muestreo aumentó la proporción de machos maduros y en el tercer muestreo se redujo la proporción de hembras C3, aunque siguieron dominando; solo tres hembras fueron inmaduras (C1). La cantidad de machos maduros (F2) disminuyó ligeramente en el tercer muestreo.

Los valores del IGS estuvieron principalmente por debajo de uno, lo que indica un alto porcentaje de hembras con ovarios inmaduros (**Figura S5**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>). Sin embargo, cuatro hembras en el tercer muestreo alcanzaron IGS superiores a cuatro. En cuanto a los machos, los valores generalmente no superaron un IGS de 0,2.

El IHS de las hembras osciló entre 0,73 y 9,72. El valor más bajo se asoció con hembras en estado de madurez (C3, hembras ovígeras) (**Tabla 3**). Las hembras C4 presentaron un IHS máximo de 3,2; el de los machos no mostró diferencias estadísticas significativas entre muestreos, pero sí se observaron diferencias entre hembras ($p=0,002$).

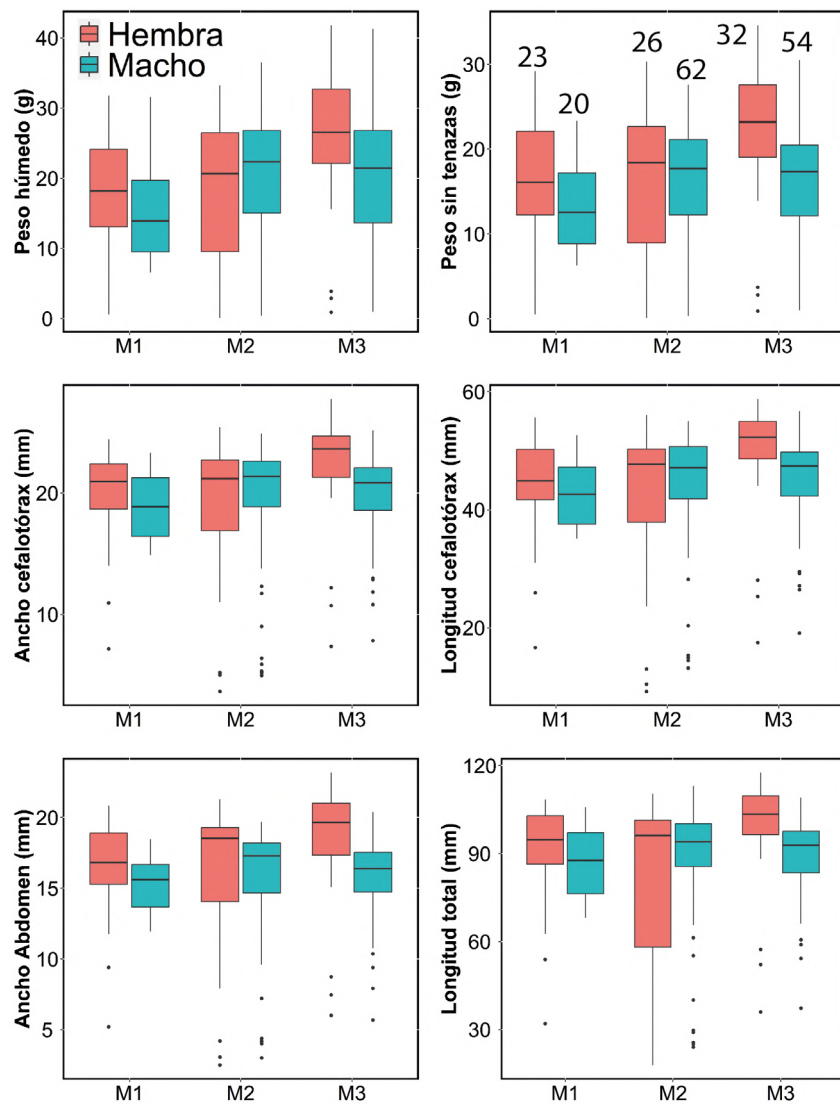


Figura 3. Diagramas de cajas del peso y medidas morfométricas de los ejemplares de *P. clarkii* colectados en los tres muestreos. Los números presentados en la figura superior derecha corresponde al total de especímenes colectados por sexo y muestreo (M1: diciembre/2021, M2: enero/2022, M3: marzo/2022)

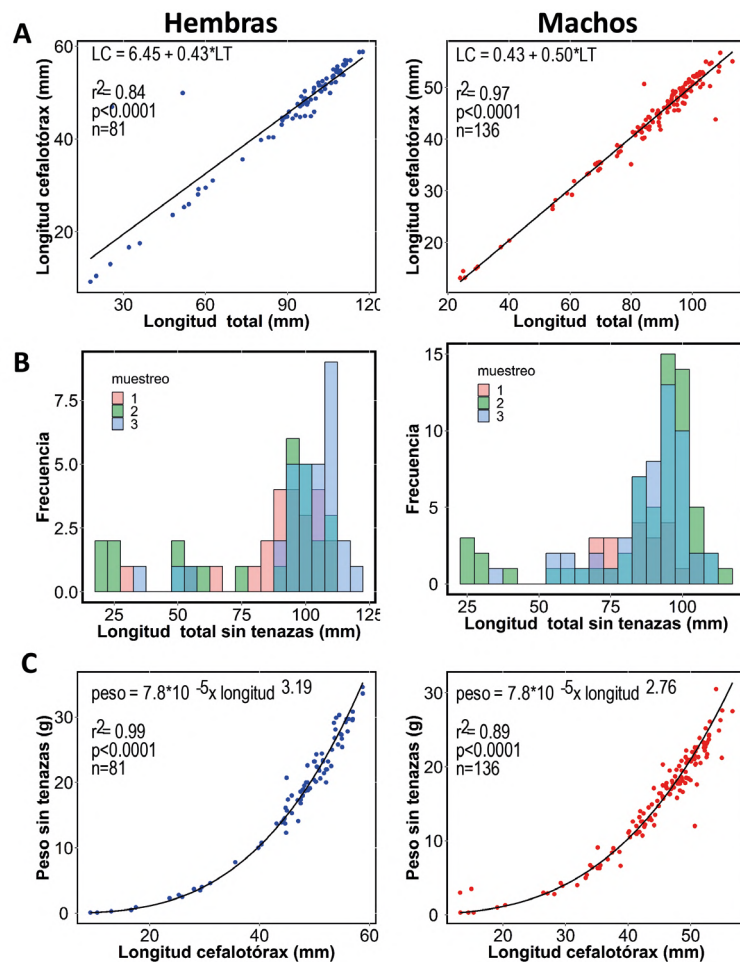


Figura 4. A. Relación entre la longitud total (LT) y la longitud del cefalotórax (LC), B. distribución de tallas de la longitud total sin tenazas (1: diciembre/2021, 2: enero/2022, 3: marzo/2022) y C. relación entre la longitud del cefalotórax y el peso sin tenazas de la langostilla, para hembras y machos

Tabla 3. Índice hepatosomático por cada categoría de madurez sexual de los organismos de *P. clarkii* capturados en la dársena de Tibitoc

	Estado de madurez	n	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Coficiente de variación
Hembras	C1	8	6,6	2,9	1,00	1,96	0,66
	C2	3	3,7	1,98	0,85	1,56	0,79
	C3	65	9,7	4,21	0,73	1,77	0,42
	C4	3	3,2	2,68	1,86	0,72	0,27
Machos	F1	53	15	3,41	0,70	2,18	0,64
	F2	82	7,2	3,61	0,30	1,20	0,33

El índice de madurez (IM) evidenció que la mayoría de las hembras capturadas en el primer muestreo (**Figura S6**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>) estaban en la etapa temprana del ciclo reproductivo, con huevos en estado K1 (blancos), aunque el estado K3 también presentó valores altos. En los otros dos muestreos el comportamiento fue muy variable.

Los resultados indican que, en promedio, la producción de huevos de las hembras de *P. clarkii* fluctuó entre los 300 y 800 huevos, con un promedio de 523. Sin embargo, se registró una diferencia en el número de huevos según el estado de madurez (**Figura S6**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>). En el segundo y tercer muestreos se observaron hembras con un mayor número de huevos, principalmente en sus etapas más avanzadas de maduración. Los datos registrados en el presente estudio indican que algunas de las hembras con LT superior a 90 mm generalmente albergaban un número superior de huevos. Los huevos externos presentaron, en promedio, un diámetro de 2,3 mm.

La mayoría de las hembras en estado gonadal C3 presentó grados diferentes de madurez. El 32 % de las 65 hembras con huevos se encontraba en estado K2 de maduración. Los resultados obtenidos no evidenciaron un patrón por muestreo de hembras con un estado específico de madurez, lo que indica que las hembras puedan poner los huevos en diferentes momentos del año si las condiciones del sistema son propicias.

En cuanto al análisis de la dieta, se observó que el detritus fue el ítem alimentario más representativo, seguido del tejido vegetal y el animal (**Figura S7**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>). El índice de importancia relativa (IIR) del detritus fue de 49,8, seguido del tejido vegetal (31,8) y del tejido animal (10,7).

Se encontraron 33 tipos de ítems (**Tabla S2**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>). Las microalgas *Ankistrodesmus* sp., *Aphanothece* sp., *Navicula* sp., *Achnantheidium* sp. y *Nitzschia* sp. fueron las más frecuentes. En los contenidos estomacales también se identificaron rotíferos y protozoarios de los géneros *Brachionus* sp., *Euglypha* sp. y *Ciliophora* y macroinvertebrados de la familia Chironomidae (Díptero).

Discusión

El cuerpo de agua estudiado tiene algunas características adecuadas para el desarrollo de una población permanente de *P. clarkii*. La presencia de vegetación acuática, así como zonas litorales con sustratos arcillosos, favorece el desarrollo de esta especie (**Gherardi**, 2006; **Yu et al.**, 2020). Durante los periodos de muestreo la temperatura fue más elevada que las medias históricas y se presentaron lluvias (**Figura S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>) como consecuencia del fenómeno de La Niña (**National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA**, 2023). No obstante, tanto las características físicas y químicas como la caracterización de las comunidades de fitoplancton, zooplancton y macroinvertebrados indican que la calidad del agua es inadecuada para el consumo humano. Aunque la langostilla tiene un amplio grado de desarrollo en condiciones de baja calidad del agua, de reducida concentración de oxígeno disuelto y de presencia de lluvias, todo ello en su conjunto podría limitar el crecimiento de la población. Sin embargo, no se encontró una relación estadística entre la densidad de individuos capturados y las características físicoquímicas del agua.

El aumento de la capturas en el segundo muestreo podría ser efecto de las lluvias (**Anastacio et al.**, 2009). La disminución de las lluvias pudo promover el cambio de las poblaciones y el abandono de las madrigueras, y afectar otras poblaciones de organismos acuáticos que son parte de la dieta de *P. clarkii*. La temperatura también pudo tener un efecto sobre las poblaciones debido al aumento de su actividad metabólica (**Rodríguez-Almaraz**, 2001). El peso y la talla de los especímenes recolectados fueron menores que los de estudios en otras poblaciones (**Dörr et al.**, 2006; **Aly et al.**, 2020), lo que sugiere que en el lugar no se presentaron las condiciones adecuadas para el desarrollo de la especie. Sin embargo, estos valores fueron semejantes a los reportados en varios ecosistemas de la zona (**Campos**, 2005; **Pedraza**, 2017). Si bien los valores de temperatura puntuales fueron relativamente altos, el promedio de los valores históricos de la dársena está por debajo de los 20 °C, lo que es propicio para el desarrollo de la especie (**Paglianti & Gherardi**, 2004).

La distribución de las tallas evidenció que los individuos más capturados fueron los de mayor talla, lo cual es esperable si se tiene en cuenta que los organismos más activos en

la búsqueda de comida son adultos y generalmente machos. Por el contrario, los juveniles son más cuidadosos y se ocultan entre las macrófitas y el sustrato (**Rodríguez-Almaraz, 2001**). Por otro lado, el tipo de trampas usadas podría haber favorecido la captura de individuos adultos.

Los resultados sugieren una baja densidad poblacional (0,032 ind/m² o 300 ind/ha). La cobertura de las macrófitas influye positivamente en el crecimiento y muda, especialmente de los juveniles de la langostilla (**Yu et al., 2020**). En estudios realizados en cultivos de *P. clarkii* se ha encontrado que las densidades podrían llegar hasta los 50 ind/m² (**Yu et al., 2020**). Nuestros resultados sugieren que durante el periodo estudiado la dársena no presentaba condiciones óptimas para el desarrollo de una población de langostillas. Por otro lado, la captura con dos tipos de trampa permitió establecer que las trampas Accesotech fueron más efectivas en la recolección de individuos en la dársena de Tibitoc (**Tablas S3 y S4**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>). Por ello, se recomiendan capturas pasivas de frecuencia anual con trampas Accesotech (o de diseño parecido) para controlar la población de esta especie en la dársena de la planta Tibitoc. Estas trampas podrían complementar otras acciones, como la remoción de las plantas acuáticas y el control de la vegetación litoral, con el fin de reducir los posibles refugios de la especie.

Procamburos clarkii presentó un ligero dimorfismo sexual que se observó especialmente en la variación del tamaño. Las hembras fueron ligeramente más grandes que los machos, como se ha corroborado en estudios previos (**Gutiérrez-Yurrita & Montes, 1998; Dörr et al., 2006; Mistri et al., 2019; Aly et al., 2020**), ya que requieren un cefalotórax grande, pues allí se produce la fecundación y luego se almacenan los huevos.

La relación entre las tallas y el peso de los individuos tuvo una variación ligada al tiempo, y fluctuó entre el crecimiento alométrico negativo y el positivo. Estos cambios podrían responder a las condiciones inadecuadas para el crecimiento de la langostilla durante los meses del muestreo, o ser una consecuencia del ciclo reproductivo. Lamentablemente, el tiempo de muestreo de este estudio fue muy corto para arrojar resultados concluyentes en este sentido. El desove o el cambio del exoesqueleto pueden llevar a la pérdida de peso en las hembras. Además, las hembras de *P. clarkii* deben destinar energía para el desarrollo de los huevos y el cuidado parental de las crías en los pleópodos (**Ricker, 1975**), mientras que los machos pueden mantener un crecimiento constante.

Pese al periodo limitado del estudio, se estimó de manera muy preliminar el tiempo máximo de supervivencia y se concluyó que la langostilla podría vivir en la dársena alrededor de 2,3 años. En este sentido, algunos autores reportan tiempos de vida hasta de cuatro a cinco años, con cinco a seis cohortes reproductivas, cada una de aproximadamente un año (**Mistri et al., 2019; Veroli et al., 2021**). El periodo de vida estimado para la población de la dársena corrobora los resultados de múltiples estudios, los cuales indican que pueden tener varios eventos reproductivos, por lo que la población tendría un potencial de crecimiento rápido cuando se presenten las condiciones óptimas.

El IGS inferior a uno sugiere que las hembras ovígeras no se encontraban en un estado óptimo para la reproducción debido a estas condiciones o por no estar en la etapa reproductiva idónea. Las hembras maduras de esta especie se pueden reproducir dos veces al año, aunque en condiciones favorables pueden llegar a tener hasta tres generaciones al año (**Huner & Barr, 1991; Rodríguez-Almaraz, 1992**). Sin embargo, la escasa presencia de hembras C4 (hembras postovígeras) podría estar relacionada no solo con las malas condiciones para su reproducción, sino con su comportamiento, ya que se refugian en madrigueras para desovar e incubar los huevos y, por lo tanto, son más difíciles de capturar (**Huner & Barr, 1991**).

El registro de todos los estadios de maduración en las hembras capturadas refleja la gran capacidad reproductiva de la especie y su adaptación a diferentes ambientes (**Arias-Pineda et al., 2020**). La presencia de ovarios con estados diferentes de maduración de los huevos puede indicar desoves consecutivos a lo largo del año y un posible aumento

de la densidad poblacional en la dársena de Tibitoc. Estudios realizados en otros decápodos sugieren que algunos ovocitos crecen rápidamente al incorporar vitelina (proteína indispensable para el desarrollo embrionario), mientras que otros permanecen inactivos (**Rodríguez-González et al.**, 2006). La ausencia de huevos en algunas de las hembras analizadas con tamaños superiores a 60 mm (hembras maduras), puede estar condicionada por factores como la finalización de la etapa reproductiva o el cambio del exoesqueleto. La alta demanda energética durante la muda puede generar un fenómeno de reabsorción de las gónadas que se encuentran en la fase de vitelogénesis (**Rodríguez-Almaraz**, 2001).

En cuanto al número de huevos producidos por las hembras, el valor obtenido es bajo comparado con otros estudios que reportan hasta más de 600 (**Alcorlo et al.**, 2008). El número de huevos no estuvo directamente relacionado con el tamaño de las hembras. Algunos autores sugieren que otros factores pueden influir en el desarrollo gonadal, entre ellos, la temperatura y la disponibilidad de alimento (**Arias-Pineda & Rodríguez**, 2012).

El IHS sugiere que durante la muda y la vitelogénesis hay un mayor aprovechamiento de las reservas energéticas por parte del hepatopáncreas. *P. clarkii* presenta diferentes estrategias de aprovechamiento de las reservas de energía, dándose que las hembras invierten más energía para la vitelogénesis y el crecimiento, en tanto que los machos invierten mayor energía en el crecimiento (**López & Rodríguez**, 1999). Por otro lado, la presencia de mayores reservas energéticas en las hembras inmaduras C1 y las hembras ovígeras C3 mayores de 6 cm, podría relacionarse con el metabolismo y la asimilación de reservas que sirven de soporte a los procesos de muda, desove y mantenimiento de la masa embrionaria (**Medina et al.**, 2019). Dado que *P. clarkii* no muda antes de que el ciclo reproductivo esté terminado, es posible que durante el estudio las hembras se encontraran almacenando energía para el proceso reproductivo (**Rodríguez-Almaraz**, 2001). Aparentemente, en los ecosistemas tropicales no existe una sincronía entre el IGS y el IHS. Varios autores indican que a medida que en los crustáceos las gónadas de las hembras presentan una mayor madurez, el hepatopáncreas reduce su tamaño (**López & Rodríguez**, 1999; **Peruzza et al.**, 2015) debido a los requerimientos energéticos requeridos en la etapa de vitelogénesis. Los datos registrados en la dársena de Tibitoc no mostraron una correlación aparente entre los dos índices evaluados, lo que sugiere la ausencia de sincronía.

Los datos de los estómagos de *P. clarkii* analizados indicaron que los detritus y el tejido vegetal fueron los alimentos más representativos por su frecuencia y volumen. Este resultado es comúnmente reportado para la langostilla (**Sanchez-Saavedra et al.**, 1993; **Loureiro et al.**, 2019) y respalda el papel primordial de la langostilla en la estructura trófica de las comunidades acuáticas al contribuir a los ciclos de la materia y la transferencia de energía (**Gherardi & Micheli**, 1989). En un estudio en Colombia se analizaron los contenidos estomacales de organismos de *P. clarkii* capturados en el Valle del Cauca entre 2003 y 2005. Los resultados indicaron que esta especie es omnívora: detritívora y filtradora en las épocas de aguas altas y vegetariana en períodos de aguas bajas (**Flórez-Brand & Espinosa-Beltrán**, 2011).

Conclusiones

Nuestros resultados indican que en la dársena de la planta Tibitoc existe una población de *P. clarkii* ya establecida, con una proporción entre hembras y machos semejante, pero con una gran variabilidad en sus características morfológicas y reproductivas. Si bien las hembras presentaron características reproductivas indicativas de una población en crecimiento, algunos de los rasgos reproductivos y morfológicos indican que la población estudiada no se encontraba en condiciones de elevado crecimiento, lo que abriría una oportunidad para su control. No obstante, es necesario profundizar en los aspectos de la biología de la langostilla estudiados aquí, de tal manera que pueda entenderse su respuesta a las condiciones ambientales y predecir su comportamiento en los próximos años. Por último, los resultados sugieren que un tipo de trampa con solo dos entradas (del tipo Accesotech) sería suficiente para capturar un mayor número de individuos en la dársena de Tibitoc y más útil para controlar las poblaciones de la langostilla.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2557/3980>

Agradecimientos

Este estudio fue realizado mediante contrato 1-2-26200-0398-2021 entre la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y la Organización Luis Fernando Romero Sandoval Ingenieros S.A.S. Agradecemos a Julián David Wilches Moreno, Julian Ricardo Benavides Gil, Nanny Rocio Lizcano, Jenny Patricia Silva Uribe, Rosaneth Angarita Gómez y Valentina Romero González, por su apoyo en las actividades de campo y laboratorio.

Contribución de los autores

Diseño del estudio o consecución de recursos: CR, AZ, EJ-C, DV-P, WV, NL-L. Desarrollo del trabajo de campo: IG-G, MP-O, AS-T, FM-R, GR-G. Desarrollo de los análisis de laboratorio: IG-G, MP-O, AS-T, FM-R, GR-G. Provisión de datos para el estudio: IG-G, MP-O, AS-T, FM-R, GR-G, LM-B, DV-P, WV, NL-L. Análisis de la información: CR, AZ, IG-G, MP-O, AS-T, FM-R, EJ-C, GR-G, LM-B, DV-P, WV, NL-L. Escritura y corrección de manuscritos preliminares: IG-G, MP-O, AS-T, FM-R, EJ-C, GR-G. Revisión y correcciones en profundidad del manuscrito sometido a la revista: CR, AZ, IG-G, MP-O.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses relacionado con la publicación de este artículo.

Referencias

- Alcorlo, P., Geiger, W., Otero, M.** (2008). Reproductive biology and life cycle of the invasive crayfish *Procambarus clarkii* (Crustacea: Decapoda) in diverse aquatic habitats of South-Western Spain: Implications for population control. *Fundamental and Applied Limnology*, 173(3), 197. DOI: 10.1127/1863-9135/2008/0173-0197
- Álvarez-León, R., Gutiérrez-Bonilla, F.** (2007). Situación de los invertebrados acuáticos introducidos y trasplantados en Colombia: antecedentes, efectos y perspectivas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 31(121), 557-574. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/12946>
- Aly, W., El-Far, A., Fetouh, M.A.** (2020). Some Fisheries and Biological Aspects of the Crayfish *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) in the River Nile, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 24(4), 33-42. <https://doi.org/10.21608/ejabf.2020.94125>
- Anastácio, P. M., Leitão, A. S., Boavida, M. J., Correia, A. M.** (2009). Population dynamics of the invasive crayfish (*Procambarus clarkii*, Girard, 1852) at two marshes with differing hydroperiods. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 45, 4, 247-256. <https://doi.org/10.1051/limn/2009025>
- Arias-Pineda, J. Y. & Rodríguez, W. D.** (2012). First record of the invasive species *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* (Girard 1852) (Crustacea, Decapoda, Cambaridae) from the Colombian Eastern Cordillera. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, 51, 313-315.
- Arias-Pineda, J.Y. & Pedroza-Martínez, D.R.** (2018). Presencia del cangrejo rojo *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) en la sabana de Bogotá, Colombia. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa (S.E.A.)*, 62, 283-286.
- Arias-Pineda, J.Y., Sánchez, J.S.G., Castillo, N.S.** (2020). Diferencias morfométricas entre dos poblaciones de cangrejo rojo *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* (Crustacea, Decapoda, Cambaridae). *The Biologist*, 18(2), 213-222.
- Baird, R. & Bridgewater, L.** (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd edition.* American Public Health Association.
- Bondar, C. A., Bottriell, K., Zeron, K., Richardson, J. S.** (2005). Does trophic position of the omnivorous signal crayfish (*Pacifastacus leniusculus*) in a stream food web vary with life history stage or density? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62(11), 2632-2639. <https://doi.org/10.1139/f05-167>

- Camacho-Portocarrero, R. F., Duarte-Gándica, I., Altamiranda-Saavedra, M.** (2021). Áreas en riesgo de invasión por *Procambarus clarkii* (Decapoda: Cambaridae), un cangrejo de río introducido en Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 77-89. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i1.41493>
- Campos, M.** (2005). *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* (Girard 1852) (Crustacea: Decapoda: Cambaridae). Una langostilla no nativa de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 291(111), 295-302.
- Chucholl, C.** (2013). Feeding ecology and ecological impact of an alien “warm-water” omnivore in cold lakes. *Limnologia - Ecology and Management of Inland Waters*, 43(4), 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2012.10.001>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca- CAR.** (2016). *Plan de Manejo y Control del Cangrejo Rojo Americano (Procambarus Clarkii) en la jurisdicción CAR.* Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca- CAR.
- Cruz, M. J. & Rebelo, R.** (2007). Vulnerability of Southwest Iberian amphibians to an introduced crayfish, *Procambarus clarkii*. *Amphibia-Reptilia*, 26(3), 293-303. <https://doi.org/10.1163/156853805774408577>
- Delsinne, T., Lafontaine, R.M., Beudels, R.C., Robert, H.** (2013). *Risk analysis of the Louisiana Crayfish Procambarus clarkii (Girard, 1852). Risk analysis report of non-native organisms in Belgium from the Royal Belgian Institute of Natural Sciences for the Federal Public Service Health, Food chain safety and Environment.* <http://ias.biodiversity.be/species/risk>
- Dörr, A.J.M. & Scalici, M.** (2013). Revisiting reproduction and population structure and dynamics of *Procambarus clarkii* eight years after its introduction into Lake Trasimeno (Central Italy). *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 408, 10. <https://doi.org/10.1051/kmae/2013045>
- Dörr, A.J.M., La Porta, G., Pedicillo, G., Lorenzoni M.** (2006). Biology of *Procambarus clarkii* (girard, 1852) in lake Trasimeno. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 380-381, 1155-1168. <https://doi.org/10.1051/kmae:2006018>
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB** (2020). *Norma técnica NS-013. Seguimiento limnológico de reservorios y fuentes superficiales de abastecimiento de agua. Subcomité de Gestión Ambiental Acueducto – Alcantarillado. Versión 4.1.* Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB
- Fernández-Cardenete, J.R., Hernández-Gómez, J., Benavides, J.** (2013). Un caso de depredación de *Procambarus clarkii* sobre *Pelophylax perezii* no larvaria. *Boletín de la Asociación Herpetológica Española*, 24(2): 68-70.
- Flórez-Brand, P. E. & Espinosa-Beltrán, J. O.** (2011). Presencia y dispersión del cangrejo rojo americano (*Procambarus clarkii*; Girard, 1852) (Decápoda: Cambaridae) en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*, 12(2), 57-62. <http://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/252>
- Gayanilo Jr. F.C., Sparre, P., Pauly, D.** (2005). *FAO ICLARM stock assessment tools II (FiSAT II). User's guide. FAO Computerized Information Series (Fisheries)*, 8.
- Gherardi, F.** (2006). Crayfish invading Europe: the case study of *Procambarus clarkii*. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 39(3), 175-191. <https://doi.org/10.1080/10236240600869702>
- Gherardi, F. & Acquistapace, P.** (2007). Invasive crayfish in Europe: the impact of *Procambarus clarkii* on the littoral community of a Mediterranean lake. *Freshwater Biology*, 52(7), 1249-1259. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01760.x>
- Gherardi, F. & Micheli, F.** (1989). Relative growth and population structure of the freshwater crab, *Potamon potamios palestiniensis*, in the Dead Sea area (Israel). *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 36(3-4), 133-145.
- Gherardi, F., Tricarico, E., Ilhéu, M.** (2002). Movement patterns of an invasive crayfish, *Procambarus clarkii*, in a temporary stream of southern Portugal. *Ethology Ecology & Evolution*, 14, 183-197.
- Guerra, J.L. & Niño, A.E.** (1996). Ecology of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*, Girard) in the central meseta of Spain. *Freshw. Crayfish*, 8, 179-200.
- Gutiérrez-Yurrita, P. J., Sancho, G., Bravo, M.A., Baltanas, A., Montes, C.** (1998). Diet of the red swamp crayfish *Procambarus clarkii* in natural ecosystems of the Doñana National Park temporary fresh-water marsh (Spain). *Journal of Crustacean Biology*, 18(1), 120-127. <https://doi.org/10.1163/193724098X00124>

- He, M., Liu, F., Wang, F.** (2021). Quantitative analysis of density dependent resource utilization, cannibalism, and competition of the red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) in rice-crayfish cocultures without supplementary food. *Aquaculture*, 543, 736966. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736966>
- Huner, J.V. & Barr, J.E.** (1991). *Red swamp crayfish: biology and exploitation. The Louisiana Sea Grant College Program, Center for Wetland Resources*. Louisiana State University.
- López, L. S. & Rodríguez, E. M.** (1999). Annual reproduction and growth of adult crabs *Chasmagnathus granulata* (Crustacea, Brachyura, Grapsidae). *Cahiers de Biologie Marine*, 40(2), 155-164.
- Loureiro, T. G., Anastácio, P.M., Siqueira-Bueno, S.L., Wood, T., Araujo, P.B.** (2019). Food matters: Trophodynamics and the role of diet in the invasion success of *Procambarus clarkii* in an Atlantic Forest conservation area. *Limnologica* 79, 125717. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.125717>
- Medina, M., Espinoza, Y., Reyes, W.** (2019). Índices gonadosomático y hepatosomático en relación con la maduración y muda del camarón *Cryphiops caementarius* del río Pativilca (Perú). *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 30(3), 1018-1029. <https://doi.org/10.15381/rivep.v30i3.16613>
- Mistri, M., Sfriso, A., Sfriso, A. A., Munari, C.** (2019). Distribution and population structure and dynamics of the red swamp crayfish *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) in the eastern Po Valley and its Delta (northeastern Italy). *BioInvasions Record*, 8(1): 142-153. <https://doi.org/10.3391/bir.2019.8.1.16>
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA.** (2023). *March 2023 ENSO update: no more La Niña!* Climate.gov. <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/march-2023-enso-update-no-more-la-nina>
- Nunes, A.L., Hoffman, A.C., Zengeya, T.A., Measey, G.J., Weyl O.L.** (2017) Red swamp crayfish, *Procambarus clarkii*, found in South Africa 22 years after attempted eradication. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 27, 1334-1340. <https://doi.org/10.1002/aqc.2741>
- Paglianti, A. & Gherardi, F.** (2004). Combined Effects of Temperature and Diet on Growth and Survival of Young-of-Year Crayfish: A Comparison between Indigenous and Invasive Species. *Journal of Crustacean Biology*, 24(1),140-148 <https://doi.org/10.1651/c-2374>
- Pedraza, D.** (2017). *Estudio de la estructura poblacional de Procambarus clarkii (Girard, 1852), en la laguna de Fúquene, Cundinamarca*. Trabajo de Investigación - Innovación para optar al título de Licenciado en Biología. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. 130p.
- Oliva, M. Á. H.** (2008). *Efecto de los ácidos grasos altamente insaturados (HUFA) en la reproducción del ostión de placer Crassostrea corteziensis (Hertlein, 1951)*. <http://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/325>
- Ordax, J.** (2003). Tularemia posiblemente transmitida por cangrejos. *Gaceta Sanitaria*, 17(2), 164-165.
- Phillips, G., Hudson, D. M., Chaparro-Gutiérrez, J. J.** (2019). Presence of *Paragonimus* species within secondary crustacean hosts in Bogotá, Colombia. *Revista Colombiana De Ciencias Pecuarias*, 32 (2), 150–157. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v32n2a08>.
- Peruzza, L., Piazza, F., Manfrin, C., Bonzi, L. C., Battistella, S., Giulianini, P. G.** (2015). Reproductive plasticity of a *Procambarus clarkii* population living 10 °C below its thermal optimum. *Aquatic Invasions*, 10 (2), 199-208. <https://doi.org/10.3391/ai.2015.10.2.08>
- Pineda, J. Y. A. & Rodríguez, W. D.** (2012). First record of the invasive species *Procambarus (Scapulicambarus) clarkii* (Girard 1852) (Crustacea, Decapoda, Cambaridae) from the Colombian Eastern Cordillera. *Boletín de la SEA*, (51), 313-315.
- Re-Araujo, A. D. & Bückle-Ramírez, L. F.** (1985). Growth and Survival Of *Procambarus Clarkii* Girard (Crustacea, Decapoda) With Different Temperatures And Isocaloric Diets. *Ciencias Marinas*, 11 (2), 39-68. <https://doi.org/10.7773/cm.v11i2.468>
- Ricker, W. E.** (1975). Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, 191, 1-382.
- Rodríguez-Almaraz, G.A.** (1992). *Tamaño poblacional, morfometría y crecimiento de Procambarus clarkii (Girard) (Crustácea: Cambaridae) del área central de Nuevo León, México* (Doctoral dissertation). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Rodríguez-Almaraz, G. A.** (2001). *Fisiología reproductiva del acocil rojo Procambarus clarkii (Crustacea: decapoda): establecimiento del ciclo de maduración gonadal y evaluación de su potencial reproductivo*. (Doctoral dissertation). Universidad Autónoma de Nuevo León.

- Sánchez-Saavedra, M., Re-Araujo, A. D., Voltolina, D.** (1993). Tasa de crecimiento y contenido estomacal en una población natural de *Procambarus clarkii* (Crustacea: Cambaridae) de Baja California, México. *Revista de biología tropical*, 41(3A), 591-597. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/23976>
- Scalici, M., Chiesa, S., Scuderi, S., Celauro, D., Gibertini G.** (2010) Population structure and dynamics of *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) in a Mediterranean brackish wetland (Central Italy). *Biological Invasions*, 12, 1415-1425. <https://doi.org/10.1007/s10530-009-9557-6>
- Scalici, M. & Gherardi F.** (2007) Structure and dynamics of an invasive population of the red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) in a Mediterranean wetland. *Hydrobiologia*, 583, 309-319. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-0615-8>
- Souty-Grosset, C., Anastácio, P.M., Aquiloni, L., Banha, F., Choquer, J., Chucholl, C., Tricarico E.** (2016). The red swamp crayfish *Procambarus clarkii* in Europe: Impacts on aquatic ecosystems and human well-being. *Limnologica*, 58, 78-93. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.03.003>
- Sun, Y., Cooper, R., Graff, J., Cooper, R.** (2012). The acute and chronic effect of low temperature on survival, heart rate and neural function in crayfish (*Procambarus clarkii*) and prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) species. *Open Journal of Molecular and Integrative Physiology*, 2, 75-86. <https://doi.org/10.4236/ojmip.2012.23011>
- Svoboda, J., Mrugała, A., Kozubíková-Balcarová, E., Petrušek, A.** (2017). Hosts and transmission of the crayfish plague pathogen *Aphanomyces astaci*: a review. *Journal of Fish Diseases*, 40 (1), 127-140. <https://doi.org/10.1111/jfd.12472>
- Veroli, M., Martinoli, M., Caprioli, R., Angelici, C., Pulcini, D., Capoccioni, F.** (2021). Population structure and dynamics of the invasive *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) in a Tiber River Ramsar site, Central Italy. *International Journal of Aquatic Biology*, 9 (1), 23-32. <https://doi.org/10.22034/ijab.v0i0.1006>
- Yu, J., Xiong, M., Ye, S., Li, W., Xiong, F., Liu, J., Zhang, T.** (2020). Effects of stocking density and artificial macrophyte shelter on survival, growth and molting of juvenile red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) under experimental conditions. *Aquaculture*, 521, 735001. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735001>
- Zhu, G.-L., Tang, Y.Y., Limpanont, Y., Wu, Z.D., Li, J., Lv, Z.Y.** (2019). Zoonotic parasites carried by invasive alien species in China. *Infectious Diseases of Poverty*, 8 (1), 2. <https://doi.org/10.1186/s40249-018-0512-6>

Artículo original

Impacto del tráfico ilegal de mamíferos en Colombia con enfoque en los análisis de biodiversidad

Impact of illegal mammal trade in Colombia with a focus on biodiversity analyses

Edison D. Bonilla-Liberato^{1,*}, Tatiana E. Lozano-Suárez²,
Melissa F. Forero-Castellanos³, Edwin O. López-Delgado⁴

¹Fort Lauderdale Research and Education Center, Institute of Food and Agricultural Science, University of Florida, Davie, Florida, United States of America

²Grupo de investigación para conservación y manejo de los recursos ambientales (NATURATU), Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia

³Programa de Biología Ambiental, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia

⁴Grupo de estudios en biodiversidad (GEBIO), Universidad Industrial de Santander-UIS, Bucaramanga, Colombia

Resumen

El tráfico ilegal de fauna silvestre es una problemática subestimada, lo que ha facilitado su persistencia y ha impedido la adopción de acciones para la conservación de grupos taxonómicos como el de los mamíferos, el cual constituye un desafío significativo dada su considerable diversidad en Colombia. Además, el desconocimiento sobre las especies y áreas del país más afectadas agrava la situación. En este sentido, el presente estudio responde a la necesidad de conocer la dinámica del tráfico ilegal de mamíferos, teniendo en cuenta los grupos taxonómicos más afectados y la forma en que varía la presión sobre estos taxones a nivel espacial. Para ello se hicieron análisis de diversidad a partir de los registros de incautaciones de las autoridades ambientales del país. Durante el periodo 2018-2022 se incautaron 1.584 individuos de 79 especies, distribuidas en 11 órdenes y 29 familias. Los primates y los roedores fueron los órdenes más confiscados. Se detectaron los puntos críticos de tráfico ilegal en ciertas regiones y departamentos del país y se encontró que la mayor diversidad de especies traficadas correspondía a los departamentos de la región Andina. Los datos revelaron subestimaciones en los registros de incautación, lo que sugiere que es aún mayor el número y variedad de mamíferos afectados. Se encontraron falencias en la manera en que se clasifica y reporta este tipo de información, lo que apunta a la necesidad de acciones coordinadas que permitan minimizar esos errores y establecer medidas de control más efectivas para disminuir el impacto sobre las poblaciones silvestres de mamíferos colombianos.

Palabras clave: Biodiversidad; Comercio ilegal; Conservación; Mamíferos; Tráfico.

Abstract

Illegal wildlife trade is a problem that has been underestimated and, thus, facilitated its persistence preventing the adoption of conservation actions to protect taxonomic groups such as mammals, which is a significant challenge given their considerable diversity in Colombia. Additionally, the lack of knowledge about the species and areas of the country most affected aggravates the situation. In this context, it is essential to understand the dynamics of illegal mammal trafficking, especially those taxonomic groups subject to the greatest pressure, and how it varies at a spatial level by using diversity analyses of the seizure records kept by Colombian environmental corporations and entities. From 2018 to 2022, the authorities seized 1,584 individuals from 79 species distributed in 11 orders and 29 families. Primates and rodents were the most confiscated orders. We identified critical points of illegal trafficking in certain regions and departments of the country, with the departments in the Andean region recording the greatest diversity of trafficked species. The data revealed underestimates

Citación: Bonilla-Liberato ED, *et al.* Impacto del tráfico ilegal de mamíferos en Colombia con enfoque en los análisis de biodiversidad. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):508-522, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2660>

Editor: Martha Patricia Ramírez

***Correspondencia:**

Edison D. Bonilla-Liberato;
bonillali.edison@ufl.edu

Recibido: 17 de junio de 2024

Aceptado: 17 de julio de 2024

Publicado en línea: 5 de agosto de 2024



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

in seizure records, suggesting that an even greater number of mammals are affected. We found errors in the way the information is classified and reported, pointing to the need for coordinated actions to minimize them and establish more effective control measures to reduce the impact of illegal trafficking on wild populations of mammals in the country.

Keywords: Biodiversity; Illegal trade; Conservation; Mammals; Traffic.

Introducción

La funcionalidad y el desempeño de una gran variedad de ecosistemas se relacionan directamente con los mamíferos que los habitan y los roles ecológicos y funcionales que desempeñan en ellos (Krebs, 2020). Sin embargo, factores como el tráfico ilegal, el cambio climático, la pérdida de hábitat y la deforestación (estos últimos asociados con los cambios en el uso del suelo) están amenazando la supervivencia de este grupo taxonómico (Lacher *et al.*, 2019). La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) ha identificado más de 1.300 especies de estos taxones que se encuentran en alguna categoría de amenaza para su conservación (UICN, 2024), por lo que es crucial actuar para garantizar la supervivencia de las especies y, con ello, la salud de los ecosistemas (Bowyer *et al.*, 2019).

América es uno de los continentes con mayor diversidad de mamíferos en el mundo (Greenspoon *et al.*, 2023) y acoge la región con la mayor densidad y diversidad de especies del planeta, el Neotrópico, la cual abarca Centroamérica, Suramérica y el Caribe insular (Burgin *et al.*, 2018). En Suramérica sobresale Colombia, país que ocupa el quinto lugar en cuanto a la diversidad de este grupo taxonómico gracias a su elevada relación entre territorio y diversidad (Santini *et al.*, 2022).

En nuestro país hay reportes de 548 especies de mamíferos distribuidas por todo el territorio nacional; de estas, 70 están en alguna categoría de amenaza y 82 son objeto de tráfico ilegal (Ramírez-Chaves *et al.*, 2022). Aunque se tiene una aproximación de la cantidad de especies traficadas ilegalmente, se desconoce la cantidad de especímenes que son comercializados. Por otro lado, hay información sobre especies clave y sombrilla y hay programas de protección y conservación del jaguar, el puma, la danta y el oso de anteojos. De manera indirecta, estos programas contribuyen a mantener, proteger y conservar las poblaciones de mamíferos potencialmente afectadas por el tráfico de especies mediante las acciones que implementan (Racero-Casarrubia & Reyes-Cogollo, 2022).

El tráfico ilegal de especies abarca desde la captura de los individuos hasta su transporte, venta, mantenimiento o sacrificio. El tráfico tiene diversos fines, siendo uno de los más importantes el comercio de mascotas exóticas (Johnston, 2022;). Entre los mamíferos afectados por esta actividad ilícita a nivel mundial se encuentran animales carismáticos como osos, tigres, elefantes, primates y rinocerontes, pero muchas especies que no son tan carismáticas ni populares también se están viendo afectadas. Pese a que los mamíferos no son el grupo taxonómico más afectado en comparación con las aves y los reptiles, las medidas para evitar su tráfico son muy limitadas (Mozer & Prost, 2023).

Esta situación se repite en Colombia, lo que genera presión en las poblaciones de mamíferos debido a la inadecuada gestión y control del tráfico ilegal de especies en el país. El desconocimiento de esta problemática facilita su persistencia y ha impedido que se tomen acciones encaminadas a la conservación de este grupo taxonómico. En este contexto, se adelantaron análisis orientados a comprender la dinámica del tráfico ilegal de mamíferos a partir de los registros de incautaciones reportados en los últimos años por las autoridades ambientales del país. Nos propusimos analizar cuáles eran los grupos taxonómicos más afectados por esta actividad ilícita y cómo la diversidad de especies traficadas variaba a nivel espacial. Esperamos que los resultados obtenidos sirvan para una mejor comprensión de esta problemática y para el diseño de estrategias efectivas por parte de las autoridades pertinentes que ayuden a disminuir el número de especies e individuos que se trafican en el país.

Metodología

Área de estudio

Colombia se encuentra ubicado en el extremo noroccidental de Suramérica (**Figura 1**); tiene una superficie de 1.141.415 km², cuenta con costas en el océano Pacífico y el Atlántico y limita con Venezuela, Brasil, Panamá, Perú y Ecuador. El territorio colombiano se divide en seis regiones naturales: Insular, Caribe, Pacífico, Andina, Orinoquia y Amazonia, y su organización político-administrativa incluye 32 departamentos subdivididos en municipios. Cabe mencionar, que dada la baja cantidad de registros de la región insular, siendo estos del departamento de San Andrés, se decidió incluirlos dentro de la región caribe. Su localización en la franja ecuatorial influye significati-vamente en la distribución espaciotemporal de las variables climatológicas del país. Las características naturales excepcionales y complejas de Colombia han contribuido a que sea reconocido por su biodiversidad.

Obtención de la información

Se solicitó a la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, al área metropolitana del Valle de Aburrá y a 33 corporaciones autónomas regionales del país la información sobre las incautaciones y entregas voluntarias ocurridas entre el 2011 y el 2022 (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2660/4381>), pero solo se tuvieron en cuenta los registros del 2018 al 2022 porque algunas corporaciones únicamente disponían de la información de este periodo. Los datos de Bogotá se analizaron separadamente, dada la relevancia que tiene la capital del país dentro de la dinámica del tráfico ilegal de especies (**Izquierdo-Páez, 2021**). En el caso de algunos registros que reportaban el peso total de carne encontrado, y no el número de individuos decomisados, el valor total se dividió por el peso promedio reportado para esas especies en el país, con el fin de obtener una aproximación que permitiera los análisis.

Asimismo, se consideraron solo los especímenes incautados, ya que las entregas voluntarias no reflejan completamente la dinámica real del problema por la falta de precisión sobre el departamento y el lugar exacto donde los individuos fueron entregados

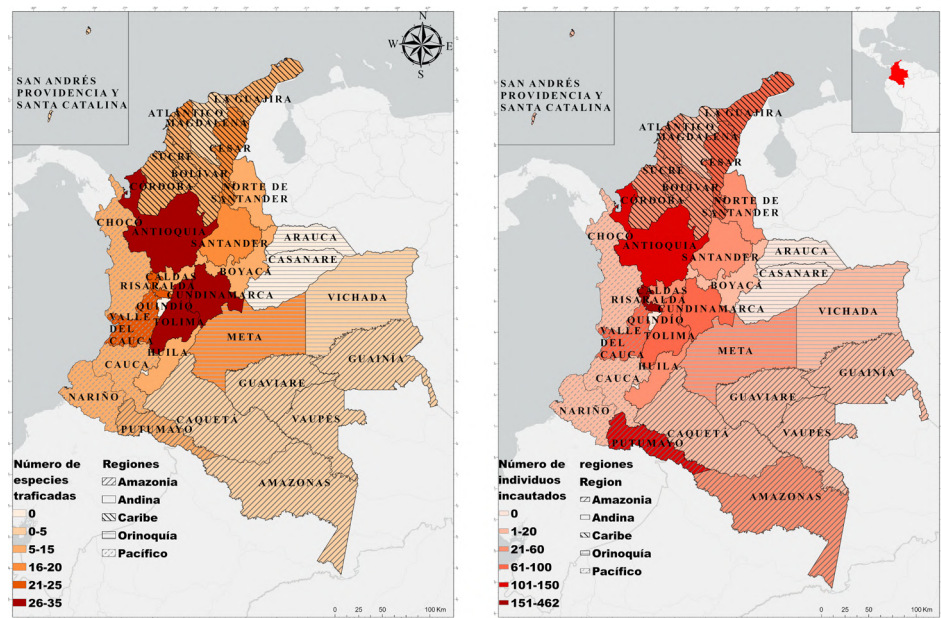


Figura 1. Mapa de Colombia que destaca los departamentos con mayor cantidad de especies y especímenes de mamíferos registradas en las incautaciones debido al tráfico ilegal entre 2018 y 2022. La codificación de colores refleja la cantidad de registros, lo que ofrece una visualización clara de los departamentos más afectados.

a las autoridades (**Lozano-Suárez et al.**, 2024). Además, parte de los registros podrían corresponder a otras categorías (por ej., rescates y hallazgos), y muchos responden a reportes de miembros de la comunidad que alertan e informan a las autoridades ambientales sobre la presencia de los animales, principalmente en áreas urbanas y residenciales, información que los funcionarios a veces reportan como entrega voluntaria, lo cual se traduce en falta de certeza sobre los datos y, por consiguiente, sesgo en su interpretación.

Se usaron las herramientas Name Parser y Species matching del Sistema Global de Información sobre Biodiversidad (<https://www.gbif.org/>) para detectar errores en la identificación de las especies reportadas y obtener la información taxonómica completa. Cabe resaltar que, pese a que la identificación de algunas especies incautadas pudo ser consecuencia de una mala determinación taxonómica por parte de las autoridades competentes, se tuvieron en cuenta la totalidad de taxones registrados, con el fin de no generar resultados sesgados a partir del criterio de los autores.

Para conocer la categoría de amenaza de las especies a nivel internacional y nacional, se consultó la base de datos de la lista roja de la UICN (<https://www.iucnredlist.org/>) y la resolución 126 del 2024 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. También se verificó si las especies reportadas se encontraban en alguno de los apéndices de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres – CITES (<https://checklist.cites.org/#/en>).

Análisis de los datos

Una vez organizada la información por departamentos y regiones geográficas (**Figura 1**), se graficó la cantidad de individuos incautados en cada uno utilizando el programa estadístico R (**R Core Team**, 2021). Asimismo, se graficaron las abundancias obtenidas para los distintos órdenes, al igual que la cantidad de familias, géneros y especies, con el paquete ggplot2 (**Wickham**, 2016). Se calculó, además, la frecuencia relativa de incautaciones de cada especie dividiendo la cantidad de individuos por el total de reportes en cada departamento. Cabe recalcar que los registros de las regiones fueron una aproximación, ya que muchos no consignaban el municipio donde había ocurrido el hecho y algunos departamentos pertenecen a más de una región. Es por ello que se representan las regiones biogeográficas de Colombia teniendo en cuenta solo los límites departamentales.

Se analizó la representatividad de las especies reportadas en cada región usando los registros de cada año como una réplica y elaborando curvas de acumulación de especies con los modelos no paramétricos Chao 2, Jacknife del primer orden y Jacknife del segundo orden (**Moreno**, 2001) mediante el paquete EstimateS 9.1.0 (**Colwell**, 2019). Estos modelos solo tienen en cuenta la presencia o ausencia de las especies; con los modelos Chao 2 y Jacknife del segundo orden se estima la cantidad de especies esperadas en relación con el número de especies que aparecen en una y dos muestras (*singletons* y *doubletons*), a diferencia del Jacknife de primer orden, el cual tiene en cuenta solamente el número de *singletons* (**Villareal et al.**, 2004). El Chao 2 resulta óptimo para muestras pequeñas, en tanto que los estimadores Jacknife presentan un mejor desempeño con datos de muestreos incompletos (**Béguinot**, 2022).

Se evaluaron los números de **Hill** (1973), con el fin de conocer la variación de la diversidad de mamíferos a nivel departamental y regional. Se estimaron los órdenes q_0 (riqueza de especies), q_1 (exponencial del índice de Shannon – índice de diversidad) y q_2 (inverso del índice de Simpson – índice de dominancia relativa). Además, para comparar los ensamblajes de mamíferos presentes en cada departamento y región, se generaron curvas de acumulación con la rarefacción y extrapolación obtenidas para cada departamento y región (**Chao et al.**, 2014) utilizando la librería iNEXT (**Hsieh et al.**, 2024).

Para analizar la composición de mamíferos incautados en cada departamento y región, se ejecutó un escalamiento multidimensional no métrico (*non-metric multidimensional scaling*, nMDS) utilizando el coeficiente de similitud de Jaccard en la librería Vegan. Se escogió este análisis porque no se basa en la abundancia registrada de las distintas especies, sino en su presencia o ausencia, lo que disminuye el sesgo que puede generar la cantidad

de individuos reportados por cada autoridad ambiental. Las autoridades difieren en cuanto a la cantidad de recursos de que disponen y las estrategias de control del tráfico ilegal (Sollund, 2017), lo que repercute en la cantidad de individuos que logran incautar. También se identificaron las especies indicadoras utilizando el método de valor indicador (Dufrière & Legendre, 1997) y la librería labdsv (Roberts, 2023). Para determinar diferencias significativas en la comunidad y la composición de las especies de mamíferos en los departamentos y regiones, se aplicó un análisis de similitud (ANOSIM).

Por otro lado, los métodos tradicionales de análisis de la diversidad beta (β) suelen ser limitados porque solamente toman en cuenta la similitud o las medidas de distancia entre los ensamblajes bajo análisis y no dan cuenta detallada de su patrón de cambio (Calderón-Patrón & Moreno, 2019). Por ello utilizamos el paquete *etapart* (Baselga et al., 2023) para estimar el recambio (*turnover*) y el anidamiento (*nestedness*) entre los distintos ensamblajes presentes a nivel regional por medio del coeficiente de disimilitud de Jaccard. El recambio refleja cómo varía la composición de especies entre diferentes grupos, en tanto que el anidamiento se refiere a los conjuntos de especies que pueden ser subconjuntos de otros ensamblajes (Baselga, 2010).

Resultados

Entre 2018 y 2022 se incautaron 1.584 individuos pertenecientes a 11 órdenes, 29 familias, 51 géneros y 79 especies. Entre estas, *Didelphis marsupialis* (Zarigüeya-Chucha), *Pecari tajacu* (saíno), *Cuniculus paca* (guagua-lapa), *Dasyopus novemcinctus* (armadillo nueve bandas), *Cebus albifrons* (mono capuchino), *Hydrochoerus hydrochaeris* (chiguero), *Alouatta seniculus* (mono aullador), *Saguinus oedipus* (tití cabeciblanco), *Atelerix albiventris* (erizo) y *Sciurus granatensis* (ardilla de cola roja) fueron las especies con mayor número de reportes (Tabla 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2660/4381>). Asimismo, estas especies presentaron las mayores frecuencias relativas en gran parte de los departamentos, con excepción de Bolívar, Chocó, Huila, Meta, Norte de Santander, San Andrés y Providencia y Vichada, donde sobresalieron las especies *Nasua nasua*, *Cebus leucocephalus*, *Dasyopus sabanicola* y *Odocoileus virginianus* (Tabla 3S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2660/4381>).

El 30,38 % de las especies reportadas se encuentra en alguna categoría de amenaza de conservación a nivel internacional (vulnerable, en peligro y peligro crítico), y el 3,8 % de ellas tiene datos deficientes que han impedido determinar su estado actual. *Lagothrix lagothricha* aparece en dos categorías de amenaza (VU/CR), pues dos de sus subespecies (*Lagothrix lagothricha* ssp. *Lugens* y *Lagothrix lagothricha* ssp. *Lagothricha*) responden a estas categorías y no es posible determinar a cuál de ellas pertenecían los individuos incautados. El 31,65 % de las especies aparece en el listado oficial de la resolución 126 del 2024 relativa a especies silvestres amenazadas a nivel nacional. Además, el 53,16 % se encuentra en alguno de los apéndice de la CITES, sobre todo en el apéndice II, con el 31,65 % (Figura 2).

A nivel espacial, el departamento de Risaralda presenta la mayor cantidad de incauciones (29,17 %), seguido de Antioquia (8,46 %), Putumayo (7,2 %), Valle del Cauca (4,99 %) y Tolima (4,55 %). Los departamentos restantes representan entre el 4,48 % y el 0,13 % de los registros (Figura 3a). En cuanto a la cantidad de órdenes, familias y especies, las regiones Andina y Caribe tuvieron la mayor representatividad, en tanto que la región Amazónica ocupó el último lugar (Figura 3b).

Se observó que el número de especies reportadas por año en la mayoría de las regiones no formó una asíntota (Figura 4), lo que indica que en dichas regiones no se incautan todas las especies de mamíferos que están siendo víctimas de tráfico ilegal (Figura 4), es decir, hay una subestimación en los registros. Asimismo, el porcentaje de especies estimadas presentó una amplia variación, aunque no se superó el 80 % (Tabla 4S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2660/4381>). En todas las regiones el estimador Jackknife de segundo orden sobreestimó la cantidad de especies en comparación con los otros dos índices.

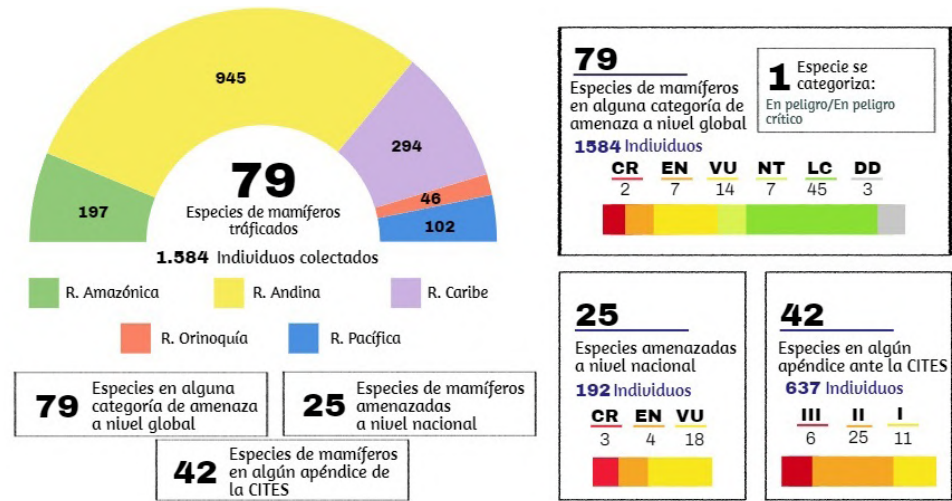


Figura 2. Resumen gráfico de la abundancia y riqueza de mamíferos traficados ilegalmente, su categoría de amenaza a nivel nacional e internacional, y especies de interés comercial presentes en los apéndices de la CITES

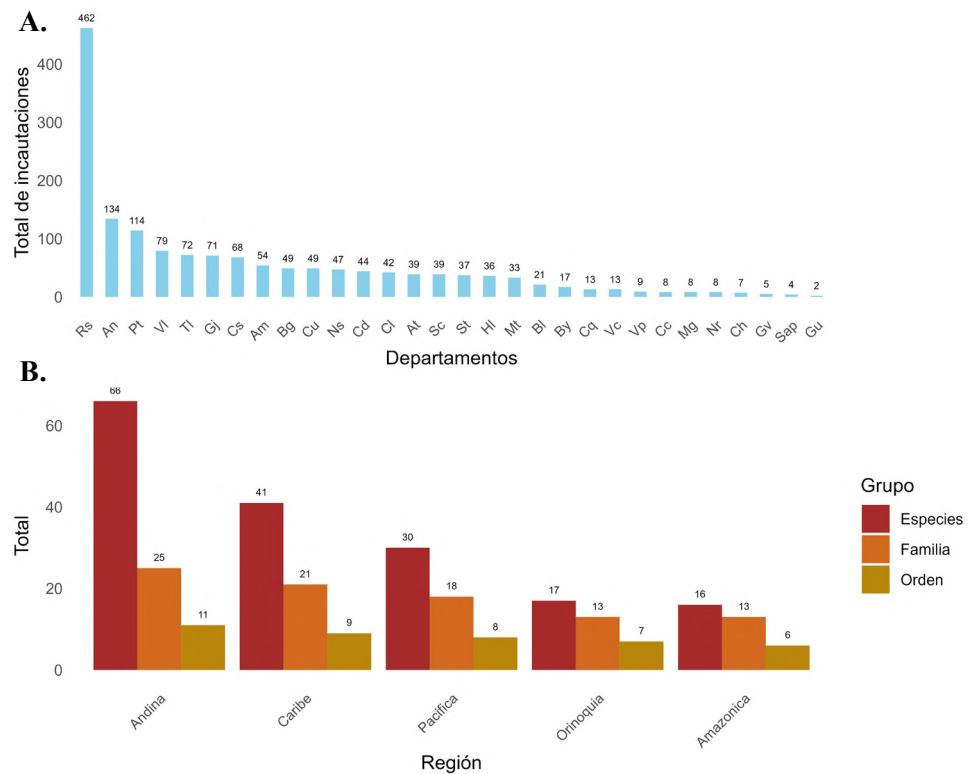


Figura 3. A) Total de incautaciones reportadas entre el 2018 y el 2022 en los departamentos del país (Amazonas: Am, Antioquia: An, Atlántico: At, Bogotá: Bg, Bolívar: Bl, Boyacá: By, Caldas: Cl, Caquetá: Cq, Cauca: Cc, Cesar: Cs, Chocó: Ch, Córdoba: Cd, Cundinamarca: Cu, Guainía: Gu, Guajira: Gj, Guaviare: Gv, Huila: Hl, Magdalena: Mg, Meta: Mt, Nariño: Nr, Norte de Santander: Ns, Putumayo: Pt, Risaralda: Rs, San Andrés y Providencia: Sap, Santander: St, Sucre: Sc, Tolima: Tl, Valle del Cauca: Vi, Vaupés: Vp, Vichada: Vc). **B)** Cantidad de órdenes, familias y especies incautadas en cada región de Colombia.

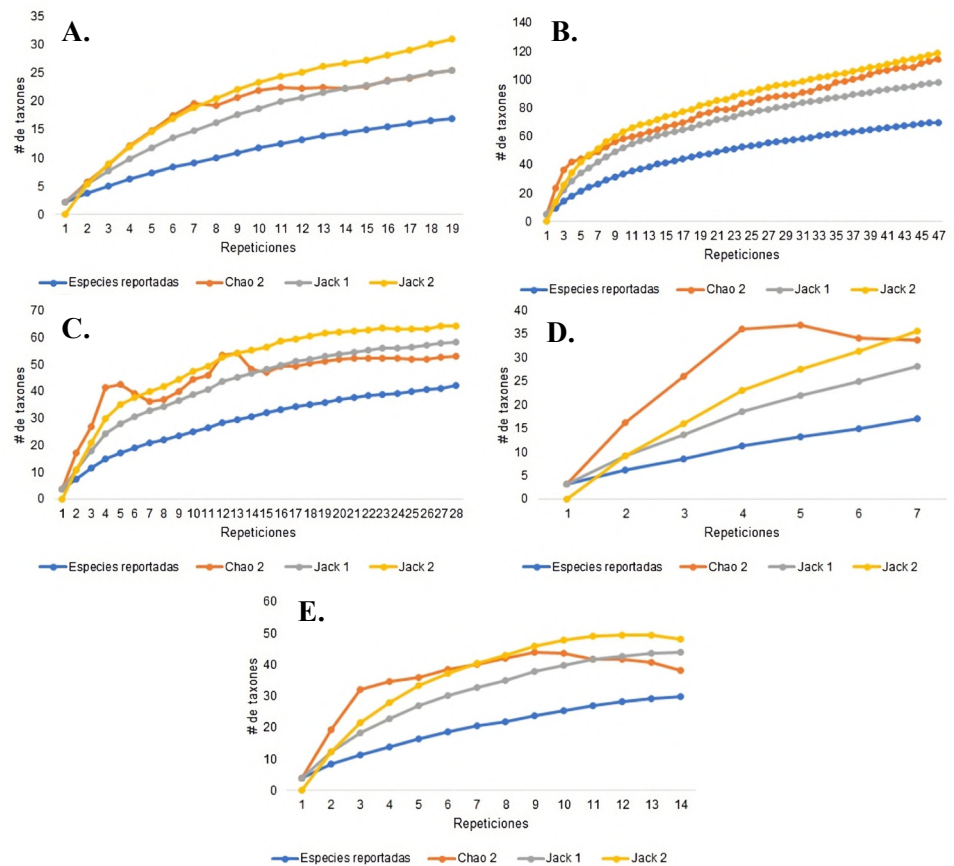


Figura 4. Curvas de acumulación generadas para las regiones de Amazonia (A), Andina (B), Caribe (C), Orinoquía (D) y Pacífico (E), donde # de taxones corresponde al número de especies, y las repeticiones hacen referencia a los registros reportados cada año por los departamentos de las diferentes regiones

A nivel departamental, Antioquia, Valle del Cauca y Atlántico registraron la mayor riqueza de especies (q_0) en el estudio, a diferencia de la región Amazónica, la cual registró el menor número de especies (**Figura 5a**). En cuanto a los órdenes de diversidad q_1 y q_2 , hubo mayor diversidad y menor dominancia relativa de especies traficadas en Atlántico y Antioquia. Por el contrario, Risaralda presentó una baja diversidad y una fuerte dominancia en sus registros. Dada la cantidad de departamentos analizados, fue difícil establecer diferencias significativas entre ellos.

A nivel regional se observaron diferencias entre las regiones Andina, Caribe y Pacífica y la Amazonia, siendo esta última la que menor riqueza presentó (**Figura 5b**). Según la q_1 , hubo una mayor diversidad de especies traficadas en las regiones Caribe y Pacífica que en las regiones Andina y Orinoquía. La menor diversidad de especies traficadas se observó en la región Amazónica. En cuanto al orden q_2 , se encontró una mayor dominancia en la Amazonia, seguida por la región Andina. La región Caribe presentó la menor dominancia relativa. En lo que se refiere al nMDS, se observó un solapamiento entre las regiones (**Figura 6**), pero no se observaron diferencias estadísticamente significativas en la composición de la comunidad de mamíferos entre las regiones evaluadas (ANOSIM, valor de $p < 0,05$).

Con relación a la diversidad β , la disimilitud fue baja (0,374), lo que sugiere que las regiones comparten un gran número de especies traficadas. La baja disimilitud observada se debe principalmente al recambio de especies (71,12 - 0,266 %), el cual fue mayor que

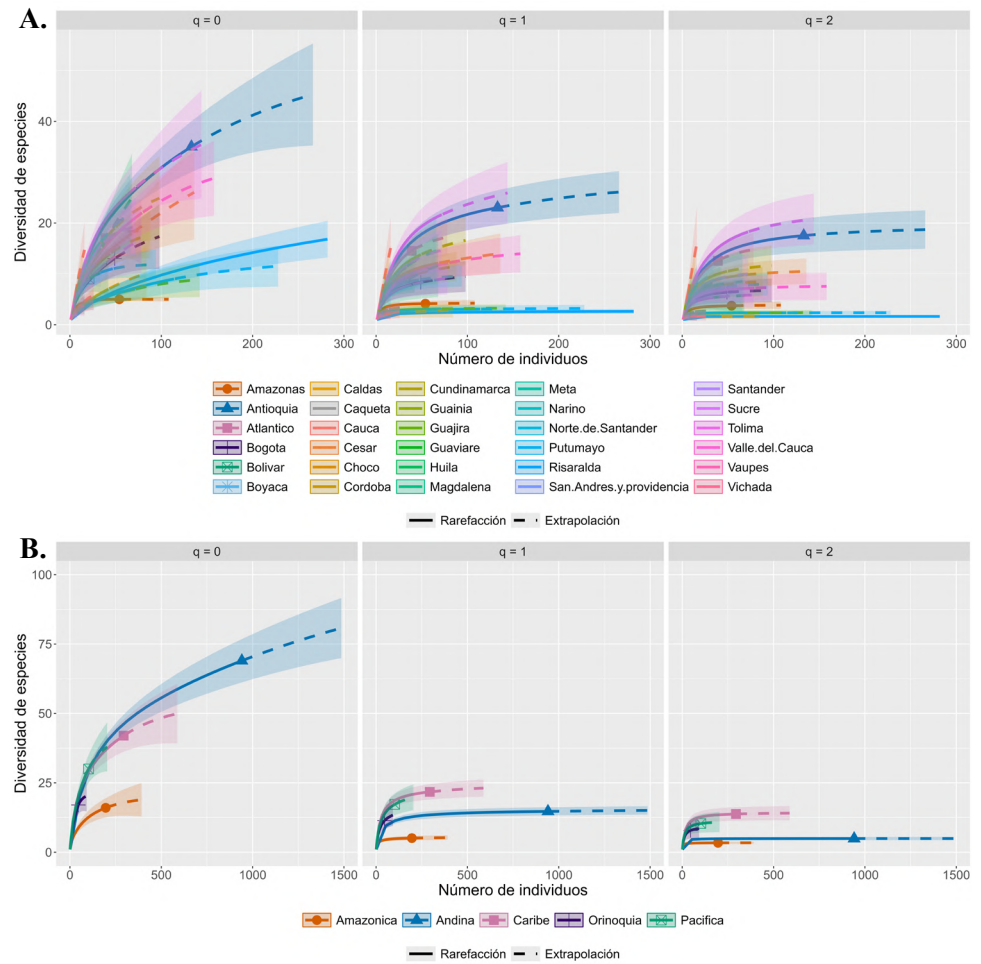


Figura 5. Diversidad de especies de mamíferos traficados en los departamentos (A) y regiones (B) del país. q_0 = riqueza de especies, q_1 = exponencial del índice de Shannon – índice de diversidad, q_2 = inverso del índice de Simpson – índice de dominancia relativa. Es de resaltar que a nivel departamental se limitó la gráfica en el eje X (número de individuos), con el fin de visualizar mejor las diferencias obtenidas

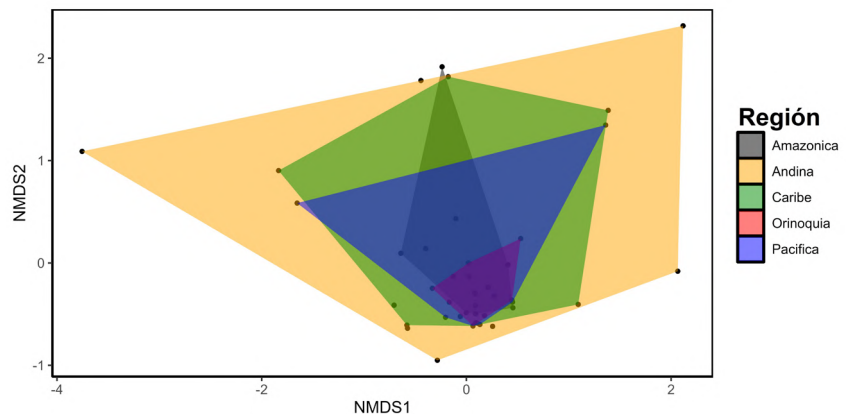


Figura 6. Análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) de los distintos órdenes reportados en las regiones geográficas que conforman el país

el anidamiento (28,88 – 0,108 %). Esto se debe principalmente a que en algunas regiones aparecen nuevas especies traficadas, por ejemplo, las regiones Andina y Caribe reportaron las especies *Ateles belzebuth*, *Callithrix pygmaea*, *Caluromys lanatus*, *Hydrochoerus isthmius*, *Hystrix cristata*, entre otras.

Discusión

Los primates y roedores fueron los grupos más incautados entre el 2018 y el 2022 en el territorio nacional según los registros proporcionados por las autoridades ambientales. Estos grupos representan uno de los principales focos de interés para la comercialización ilegal, dada la facilidad con la que se compran y venden como mascotas y para el consumo (Cabrejo, 2010; López-Flores et al., 2020; Crespo-Gascón et al., 2022). Más de la mitad de los primates distribuidos en el país se encuentran en algún nivel de amenaza; se estima que en Colombia hay entre 30 y 34 especies de primates, de las cuales 21 están catalogados en peligro de extinción (Defler, 2013), y algunas otras en peligro crítico, según la UICN (IUCN, 2024). Estas cifras concuerdan con las de estudios llevados a cabo en varios departamentos del país (Izquierdo-Páez, 2021): Boyacá (Cabrejo, 2010; Suárez-Giorgi, 2016), Cundinamarca (Suárez-Giorgi, 2016), Bogotá D.C. (Ruiz-García et al., 2020) y Amazonas (Patiño-Escobar, 2020), en los que se ha constatado que dichos órdenes de mamíferos, principalmente el de los primates, son los más afectados por el tráfico ilegal en Colombia.

El caso de los primates es preocupante, ya que Colombia está dentro de los diez países del mundo con mayor cantidad de especies traficadas y capturadas ilegalmente (Garber et al., 2024). Además, se estima que para el final de este siglo, gran parte de las especies del mundo se extinguirán o ya habrán desaparecido (Estrada et al., 2017), y el tráfico ilegal aparece como una de las causas de dicha situación (Garber et al., 2024). Se sabe que la mayor demanda de estos especímenes se da para satisfacer el mercado de mascotas exóticas, pero también para la alimentación, la medicina tradicional y los estudios de investigación (Alves et al., 2010; Badihi et al., 2024), lo que evidencia la necesidad de buscar alternativas que garanticen su preservación en el país.

En Colombia varían espacialmente los propósitos por los cuales se trafican y capturan los primates, siendo sus usos como alimento y mascotas los más recurrentes (Link et al., 2023; Valencia-Parra & De La Ossa, 2016; Gómez-Herrera et al., 2023a). Llama la atención el caso de la Amazonia, departamento con una gran diversidad de especies de este orden (Hena-Díaz et al., 2020). En el periodo analizado, específicamente en el 2021, solo se reportaron siete individuos de *Aotus nancymae* y *Aotus vociferans*, especies que se comercializan ilegalmente para estudios biomédicos. Teniendo en cuenta la cantidad reportada en otros años, los siete individuos representarían alrededor del 1 % de especímenes traficados (Maldonado-Rodríguez, 2011). Debe recalarse, sin embargo, que en los últimos años se han buscado estrategias alternativas para cambiar la dinámica económica basada en la extracción por una de turismo sostenible (Maldonado & Waters, 2020), por lo que la cantidad reportada en el 2021 podría reflejar dichas estrategias, aunque el porcentaje de monos nocturnos traficados en el departamento sea mucho mayor al 1 %. Ello reflejaría la eficacia de este tipo de estrategias para la conservación de especies y constituiría una ruta a seguir para la conservación de otros primates en el país.

En el caso del orden Rodentia, la cantidad real de especímenes traficados puede ser mucho mayor si se tienen en cuenta dos aspectos: primero, el tráfico de especies ocurre en diferentes niveles de comercio que engloban desde los mercados locales hasta los internacionales (Sas-Rolfes et al., 2019), y se ha evidenciado que géneros como *Cuniculus*, *Dasyprocta* e *Hydrochoerus* presentan una alta demanda y consumo en áreas rurales y pueblos pequeños (Valencia-Parra & De La Ossa, 2016; Hernández-Coronado, 2018; Gómez Herrera et al., 2023a), donde la presencia de las autoridades ambientales y de control es limitada, lo que impide determinar la cantidad de especies que se comercializan en esos espacios y aplica para otros órdenes. En segundo lugar, Rodentia presentó la mayor

cantidad de registros (32) en los que se consignó solamente el peso de la carne incautada: 771,5 kg para *H. hydrochaeris* y 195,7 kg para *C. paca*, hecho que puede haber resultado en la subestimación de la cantidad real de especímenes traficados.

Se destaca que estos órdenes, junto con los taxones restantes, se reportaron principalmente en el departamento de Risaralda (29,17 %), seguido de Antioquia (8,46 %), lo cual coincide con lo encontrado en el marco de la Estrategia nacional para la prevención y control del tráfico ilegal de especies silvestres (**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**, 2022). Este fenómeno se atribuye a la gran demanda que se da allí para la comercialización de especímenes, así como a su posición estratégica como lugar de paso y extracción (**Izquierdo-Páez**, 2021), lo que la convierte en una de las principales rutas del tráfico ilegal de especies en el país (**Delgado-Serna**, 2018). Además, este departamento conecta con el Chocó, lo que facilita el transporte hacia el exterior (**Osorio Ramírez & Zuluaga Restrepo**, 2018). Es importante destacar que Risaralda constituye un centro de acopio y destino de muchas de las especies incautadas (**Arroyave**, 2015).

Pese a que en ambos departamentos se evidenció un alto número de especímenes incautados, Antioquia registró la mayor riqueza de taxones incautados. Este departamento se considera un nodo crucial de acopio de especies traficadas en Colombia (**Arroyave**, 2015; **Restrepo-Rodas & Pulgarín-Restrepo**, 2021), ya que hay evidencia de los fuertes flujos provenientes de Bolívar, Cesar, Sucre y otros departamentos de la costa Caribe. Además, es un centro intermediario y consumidor final de especies traficadas (**Izquierdo-Páez**, 2021; **Restrepo-Rodas & Pulgarín-Restrepo**, 2021). Por otra parte, cabe recalcar que la extensión de Risaralda equivale aproximadamente al 6,5 % del área de Antioquia y que, pese a que en este último departamento hay tres entidades ambientales más que en Risaralda, el control, la prevención y la mitigación del comercio ilegal de fauna silvestre son más limitados, lo que conllevaría una subestimación de la cantidad de especies e individuos que se comercializan en ese departamento.

Según nuestros análisis, en Bogotá D.C. no hay un tráfico ilegal de mamíferos que sea significativo. Sin embargo, varios autores afirman que esta ciudad también es uno de los principales destinos de las especies traficadas y un gran mercado de recepción y distribución, ya que funciona como un punto de conexión aérea y terrestre para destinos nacionales e internacionales (**Patiño-Escobar**, 2020; **Izquierdo-Páez**, 2021; **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**, 2022). Por ello es pertinente analizar la dinámica de las incautaciones de otros grupos taxonómicos para aclarar la relevancia de la capital del país en este sentido.

Por otro lado, la región Andina tuvo la mayor representatividad de especies, seguida de la región Caribe, con el mayor número y diversidad de especies incautadas en Colombia. Esta región, conjuntamente con la Amazonia (**Gómez-Herrera et al.**, 2023b), es una de las más estudiadas y más afectadas por el tráfico ilegal de fauna en el país (**Jiménez-Velandia**, 2021), lo que se explica por su posición geográfica en el centro del país, la confluencia de las tres cordilleras, y su variedad de pisos térmicos, lo que la convierte en la región de mayor riqueza faunística del país (**Baena Salazar et al.**, 2020; **Rangel-Ch**, 2015). Por el contrario, la región Caribe, a pesar de registrar la mayor diversidad de especies incautadas, es la zona menos estudiada y con menos información sobre el tráfico de especies (**Gómez-Herrera et al.**, 2023b).

Las curvas de acumulación evidenciaron una amplia variación en los porcentajes de especies; esto como resultado de varios factores: la subestimación de los registros por parte de las autoridades ambientales regionales a causa de la limitada capacidad institucional, y la gestión de las acciones de control, las cuales dependen de la disponibilidad de recursos y la inversión presupuestal (**Izquierdo-Páez**, 2021). También el tamaño de cada departamento y región puede influir en la cantidad de especímenes reportados, ya que en regiones como la Orinoquia y la Amazonia la gran extensión de los departamentos dificulta mucho más el control de las autoridades. Estos resultados sugieren que un número significativamente mayor de especies es objeto de tráfico ilegal y que los valores reportados no reflejan la verdadera magnitud de esta problemática, pues los informes proporcionados

por las autoridades ambientales no están unificados y no son uniformes (Arroyave, 2015; Cáceres-Martínez *et al.*, 2017; Patiño-Escobar, 2020). A pesar de que se estableció un formato para el reporte de esta información en el marco de la Estrategia nacional para la prevención y control del tráfico ilegal de especies (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022), la falta de cumplimiento de este estándar dificulta la toma de decisiones y el manejo de las especies después del decomiso (Cáceres-Martínez *et al.*, 2017). A ello se suma el desconocimiento de la forma de operar de las redes de tráfico de mamíferos en regiones y departamentos, lo cual supone un reto al momento de focalizar los esfuerzos en las posibles rutas de transporte y exige nuevos estudios sobre el rango de distribución y análisis genéticos en busca de las razones por las que ciertas poblaciones de especies se ven especialmente presionadas por esta actividad ilícita.

Asimismo, se evidenció una debilidad institucional que puede ser consecuencia de la limitada capacidad logística o presupuestaria de las entidades y de la poca prioridad que se le otorga al tema (Güiza-Suárez & Correa-Muñoz, 2020; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022), lo que se refleja en la falta de control y seguimiento en la recopilación de la información (Cáceres-Martínez *et al.*, 2017; Patiño-Escobar, 2020). Además, hay una inadecuada clasificación taxonómica de las especies incautadas debido a que algunos taxones son de difícil identificación o morfológicamente similares a los de otras especies (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022), como es el caso de la ardilla *Sciurus niger*, pero también a la falta de suficiente personal capacitado para llevar a cabo esta tarea (Güiza-Suárez & Correa-Muñoz, 2020). Debe aclararse que estas limitaciones pudieron sesgar de alguna manera los resultados obtenidos, ya que las abundancias reportadas pueden no reflejar la verdadera problemática de esta actividad ilícita, lo que demuestra la necesidad de aunar esfuerzos en la capacitación del personal encargado del control, la identificación y la recepción de fauna silvestre en las distintas entidades para así disminuir la imprecisión de los datos en futuros estudios.

Las imprecisiones desembocan en la subestimación del impacto real sobre las especies, lo que podría significar un aumento de la presión sobre algunas poblaciones de mamíferos, especialmente aquellas vulnerables a la extinción (Cáceres-Martínez *et al.*, 2017), y la consecuente amenaza a la biodiversidad del país (USAID, 2021). Un ejemplo de estas posibles imprecisiones se encuentra en los reportes de incautación del oso bezudo o perezoso *Melursus ursinus*, especie categorizada como vulnerable a nivel internacional y que se distribuye únicamente en tres países de Asia (Dharaiya *et al.*, 2020). Este úrsido, coloquialmente llamado oso perezoso, no guarda relación alguna con los perezosos del suborden de los folívoros, lo que podría indicar que la identificación del individuo no se basó en caracteres taxonómicos, sino más bien en características fácilmente confundibles, como podrían ser los nombres comunes o vernáculos.

Por otro lado, teniendo en cuenta el recambio y anidamiento de especies observados en la partición de la diversidad β , se esperaría un mayor anidamiento entre regiones cercanas, ya que una mayor cantidad de especies tendría similitudes al compartir características ecológicas, geográficas y climáticas. En este sentido, la región Andina sobresalió debido al papel relevante que tiene en el comercio de mamíferos traficados en el país, lo que se repite para otros grupos taxonómicos como los reptiles (Arroyave, 2015).

Dada la relevancia diferenciada de cada región del país en la red de tráfico ilegal de especies, resulta imperativo implementar medidas para mitigar y contrarrestar este fenómeno en un esfuerzo colaborativo entre las entidades ambientales y los organismos de control. De todas maneras, deben desarrollarse estrategias de control y prevención en todas las regiones y departamentos sin importar su rol específico dentro de esta red ilícita, pues todos tienen un impacto potencial en esta problemática y pueden afectar positiva o negativamente la conservación de las especies (Arroyave, 2015; Patiño-Escobar, 2020). También deben identificarse y entender la operación de las distintas redes de transporte ilegal de especies a nivel nacional e internacional, ya que se ha evidenciado que muchos mamíferos, por ejemplo, los félidos, son extraídos del país para suplir la demanda en otros países y continentes (Morcatty *et al.*, 2020).

Conclusión

El análisis del tráfico ilegal de mamíferos en Colombia entre el 2018 y el 2022 a partir de la información proporcionada por las autoridades ambientales nos permitió una aproximación a la dinámica actual de esta actividad en el país. De los 1.584 individuos incautados, la mayoría de incautaciones se registraron en el departamento de Risaralda, seguido de Antioquia y Putumayo. El 30,38 % de las especies incautadas a nivel nacional se encuentra dentro de alguna categoría de amenaza de conservación a nivel internacional y el 53,16 % está incluido en alguno de los apéndices de la CITES. Las regiones Andina y Caribe registraron la mayor diversidad de especies incautadas. La zarigüeya, junto con el saíno, la guagua y el armadillo de nueve bandas, han sido las especies más demandadas en el mercado. Estas cifras ponen en evidencia la situación del tráfico ilegal de mamíferos en Colombia y el riesgo que representa para la biodiversidad del país.

Es fundamental que las autoridades ambientales intensifiquen sus esfuerzos para controlar y disminuir el tráfico ilegal de mamíferos en el país, principalmente en aquellas zonas en que se facilita el transporte de especímenes hacia otras partes del país o hacia el exterior para su comercialización. Asimismo, es necesario implementar medidas no solo de vigilancia, sino también de educación, con el fin de promover la conservación y la protección de la biodiversidad, especialmente de aquellas especies amenazadas. Este estudio proporciona una base para promover la adopción de decisiones y el desarrollo de políticas efectivas y destaca la importancia de continuar evaluando y monitoreando la dinámica del tráfico ilegal de especies en Colombia. A partir de los resultados, se recomienda la elaboración de un formato único que permita caracterizar las especies incautadas y recolectadas, de modo que se puedan obtener datos precisos. La acción coordinada de las autoridades ambientales a nivel nacional es esencial para mejorar el control del tráfico ilegal de especies en el país.

Agradecimientos

A todas las autoridades ambientales de Colombia por su colaboración y por proporcionar la información necesaria para la realización de este estudio.

Contribución de los autores

E.D.B.L.: solicitud de información. E.D.B.L., T.E.L.Z y M.F.F.C: análisis de la información, discusión de los resultados y redacción del documento. E.O.L.D.: análisis y discusión de los resultados, coordinación de la redacción y revisión final del documento.

Conflicto de intereses

Declaramos que no existe ningún conflicto de intereses con relación a los resultados, el análisis y los objetivos de la investigación. No contamos con aportes financieros para el presente estudio, ni tenemos intereses comerciales o cualquier otro tipo de relación que pueda influir en la objetividad de los hallazgos presentados en este trabajo.

Referencias

- Alves, R., Souto, W., Barboza, R. (2010). Primates in traditional folk medicine: a world overview. *Mammal Review*, 40(2), 155-180.
- Arroyave, F. (2015). *El tráfico ilegal de reptiles en Colombia: una aplicación del análisis de redes a las relaciones ambientales* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55854>
- Badihi, G., Nielsen, D., Garber, P., Gill, M., Jones-Engel, L., Maldonado, A., Dore, K., Danzy-Cramer, J., Lappan, S., Dolins, F., Sy, E., Fuentes, A., Nijman, V., Friis-Hanses, M. (2024). Perspectives on conservation impacts of the global primate trade. *International Journal of Primatology*. <https://doi.org/10.1007/s10764-024-00431-9>
- Baena-Salazar, D., Fuentes-Hernández, J., Pino-Reyes, L., Marín-Durán, S., Horta-Pérez, S., Fonseca-González, W. (2020). *Contexto Regional Andina*. Observatorio Regional ODS. <http://hdl.handle.net/1992/47782>

- Baselga, A.** (2010). Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 19(1), 134-143. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00490.x>
- Baselga, A., Orme, D., Villeger, S., De Bortoli, J., Leprieur, F., Logez, M., Martínez, S., Martín, R., Gomez, C., Crujeiras, R., Henriques, R.** (2023). betapart: Partitioning Beta Diversity into Turnover and Nestedness Components. The comprehensive R Archive Network. <https://CRAN.R-project.org/package=betapart>.
- Béguinot, J.** (2022). A Universal Key to Rationally Select Which, Among Nonparametric Species Richness Estimators, Performs Best According to Each Particular Incomplete Sampling. *Annual Research & Review in Biology*, 37(4), 30-46. <https://doi.org/10.9734/arrb/2022/v37i430500>
- Bowyer, R., Boyce, M., Goheen, J., Rachlow, J.** (2019). Conservation of the world's mammals: Status, protected areas, community efforts, and hunting. *Journal of Mammalogy*, 100(3), 923-941. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyy180>
- Burgin, C., Colella, J., Kahn, P., Upham, N.** (2018). How many species of mammals are there? *Journal of Mammalogy*, 99(1), 1-14. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyx147>
- Cabrejo, A.** (2010). Tráfico y tenencia ilegal de fauna silvestre en el departamento de Boyacá. *Cultura Científica*, 8, 17-23. https://revista.jdc.edu.co/index.php/Cult_cient/article/view/231/252
- Cáceres-Martínez, C., Villamizar, M., Arias-Alzate, A.** (2017). Diagnóstico sobre el tráfico de fauna silvestre en el departamento de Norte de Santander, Colombia. *Revista Biodiversidad Neotropical*, 7(3), 189-199. <https://doi.org/10.18636/BIONEOTROPICAL.V7I3.652>
- Calderón-Patrón, J. & Moreno, C.** (2019). Diversidad beta basada en índices de disimilitud: Su partición en componentes de recambio y diferencias en riqueza. En Moreno C. (Ed.), *La biodiversidad en un mundo cambiante: Fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio* (pp. 203-222). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo/Libermex.
- Chao, A., Gotelli, N., Hsieh, T., Sander, E., Ma, K., Colwell, R., Ellison, A.** (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*, 84(1), 45-67. <https://doi.org/10.1890/13-0133.1>
- Colwell, R.** (2019). *EstimateS: statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 9.1.0.* <https://osf.io/su57f/>
- Coronado, A.** (2018). Usos de fauna silvestre en el trapecio amazónico colombiano y aportes hacia su gestión integral en el departamento de Amazonas. *Folia Amazónica*, 27(2), 163-178. <https://doi.org/10.24841/fa.v27i2.434>
- Crespo-Gascón, S., Solórzano, C., Guerrero-Casado, J.** (2022). Tráfico nacional de fauna silvestre y especies amenazadas: Un estudio descriptivo en Manabí (Ecuador). *Revista de Ciencias de La Vida*, 35(1), 33-44. <https://doi.org/10.17163/LGR.N35.2022.03>
- Defler, T.** (2013). Aspectos sobre la Conservación de los Primates Colombianos: ¿Cuál es el futuro? En T. Defler, P. Stevenson, M. Bueno y D. Guzmán (Eds.), *Primates Colombianos en peligro de extinción* (pp. 2-21). Asociación Primatológica Colombiana.
- Delgado-Serna, V.** (2018). *Caracterización del uso de la fauna silvestre como mascota y las zonas con mayor tráfico en Pereira, Risaralda* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional Javeriano. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/36819>
- Dharaiya, N., Bargali, H.S., Sharp, T.** (2020). *Melursus ursinus* (amended version of 2016 assessment). The IUCN Red List of Threatened Species 2020: e.T13143A166519315. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-1.RLTS.T13143A166519315.en>
- Estrada, A., Garber, P., Rylands, A., Roos, C., Fernandez-Duque, E., Di Fiore, A., Nekaris, K., Nijman, V., Heymann, E., Lambert, J., Rovero, F., Barelli, C., Setchell, J., ... Li, B.** (2017). Impending extinction crisis of the world's primates: Why primates matter. *Science Advances*, 3(1), 26. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600946>
- Garber, P., Estrada, A., Shanee, S., Svensson, M., Arregoitia, L., Nijman, V., Shanee, N., Gouveia, S., Nekaris, K., Chaudhary, A., Bicca, J., Hansen, M. F.** (2024). Global wildlife trade and trafficking contribute to the world's nonhuman primate conservation crisis. *Frontiers in Conservation Science*, 5, 1400613. <https://doi.org/10.3389/fcosc.2024.1400613>
- Gómez-Herrera, R., García-Rico, C., Racero-Casarrubia, J.** (2023b). Comercio de carne de monte en el mercado urbano de Plato, Magdalena, Colombia. *Intropica: Revista Del Instituto de Investigaciones Tropicales*, 18(1), 107-112. <https://doi.org/10.21676/23897864.4563>
- Gómez-Herrera, R., Racero-Casarrubia, J., Ballesteros-Correa, J.** (2023a). Uso de fauna silvestre por comunidades campesinas en Plato, Magdalena, región caribe colombiana. *Acta Biológica Colombiana*, 28(1), 49-56. <https://doi.org/10.15446/abc.v28n1.94140>

- Greenspoon, L., Krieger, E., Sender, R., Rosenberg, Y., Bar-On, Y., Moran, U., Antman, T., Meiri, S., Roll, U., Noor, E., Milo, R.** (2023). The global biomass of wild mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(10), e2204892120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2204892120>
- Güiza-Suárez, L. & Correa-Muñoz, L.** (2020). Panorama de la deforestación y el tráfico de especies silvestres en Colombia: una mirada desde la experiencia de los funcionarios públicos. En L. Güiza, E. Suárez, y Salas & L. Correa (Eds.), *Herramientas para controlar los delitos contra la fauna y flora en Colombia* (pp. 3–48). Universidad del Rosario.
- Henao-Díaz, F., Stevenson, P., Carretero-Pinzón, X., Castillo-Ayala, C., Chacón-Pacheco, J., Deffer, T., García-Villalba, J., Guzmán Caro, D., Galvis Ramírez, N., Link, A., Maldonado, A., Moreno, M., Palacios, E., Rodríguez Rodríguez, A., Roncancio Duque, N., Soto Calderon, I., Soto, L., Valencia, L. M., Velásquez Tibatá, J., Olaya-Rodríguez, M., Cruz-Rodríguez, C., Noguera-Urbano, E.** (2020). *Atlas de la biodiversidad de Colombia. Primates*. 51 pp. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Hernández-Coronado, A.** (2018). Usos de fauna silvestre en el trapezio amazónico colombiano y aportes hacia su gestión integral en el departamento de Amazonas. *Folia Amazónica*, 27(2), 163-178.
- Hill, M. O.** (1973). Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54(2), 427-432. <https://doi.org/10.2307/1934352>
- Hsieh, T., Ma, K., Chao, A.** (2024). iNEXT: Interpolation and Extrapolation for Species Diversity. R package version 3.0.1. The Comprehensive R Archive Network. http://chao.stat.nthu.edu.tw/wordpress/software_download/.
- IUCN.** (2024). IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/es/>
- Izquierdo-Páez, J.P.** (2021). *Caracterización de la dinámica del tráfico ilegal de fauna silvestre en Colombia y en el Distrito Capital entre los años 2005 y 2019* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/59462>
- Jiménez-Velandia, J.** (2021). *Evolución del tráfico y tenencia ilegal de fauna silvestre en la Región Andina Colombiana* [Tesis de tecnólogo, Unidades Tecnológicas de Santander]. Repositorio Institucional RI-UTS. <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/7834>
- Johnston, C. L.** (2022). ANIMAL TRAFFIC: Lively Capital in the Global Exotic Pet Trade. *Geographical Review*, 112(4), 611-613. <https://doi.org/10.1080/00167428.2021.1933774>
- Krebs, C.** (2020). Whither mammalian ecology? *Journal of Mammalogy*, 101(5), 1224-1230. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyaa072>
- Lacher, T., Davidson, A., Fleming, T., Gómez, E., McCracken, G., Owen-Smith, N., Peres, C., Vander, S.** (2019). The functional roles of mammals in ecosystems. *Journal of Mammalogy*, 100(3), 942-964. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyy183>
- Link, A., De Luna, A., Burbano, J.** (2013). Estado de conservación de uno de los primates más amenazados con la extinción: el mono araña café (*Ateles hybridus*). En T. Deffer, P. R. Stevenson, M. L. Bueno y D. Guzmán (Eds.) *Primates colombianos en Peligro de Extinción* (pp. 88-118). Asociación Primatológica Colombiana.
- López-Flores, M., García-Orduña, F., Palestino-Sánchez, R., Juárez-Portilla, C., Zepeda-Hernández, R., Rovirosa-Hernández, M.** (2020). Primates en cautiverio: uso en la ciencia, tráfico ilegal y consideraciones para su bienestar y conservación. *Divulgación de La Ciencia Educativa*, 3(5), 25-42. <http://educscientia.com/index.php/journal/article/download/65/48>
- Lozano-Suárez, T. E., Bonilla-Liberato, E. D., López-Delgado, E. O.** (2024). ¿Cómo ha evolucionado el tráfico ilegal de fauna en el Tolima? Análisis multitemporal de una amenaza para la biodiversidad. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 48(186), 94-108. <https://doi.org/10.18257/racecefyn.2223>
- Maldonado-Rodríguez, Á. M.** (2011). Tráfico de monos nocturnos *Aotus spp.* en la frontera entre Colombia, Perú y Brasil: Efectos sobre sus poblaciones silvestres y violación de las regulaciones internacionales de comercio de fauna estipuladas por CITES. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35(135), 225-242.
- Maldonado, A. & Waters, S.** (2020). Ethnoprimatology of the Tikuna in the Southern Colombian Amazon. En B. Urbani y M. Lizarralde (Eds.) *Neotropical Ethnoprimatology* (pp. 89-107). Springer.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible** (2022). *Estrategia nacional para la prevención y control del tráfico ilegal de especies silvestres*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Estrategia-Nacional-para-la-Prevención-y-Control-del-Tráfico-Ilegal-de-Esp.pdf>

- Morcatty, T., Bausch Macedo, J., Nekaris, K., Ni, Q., Durigan, C., Svensson, M., Nijman, V.** (2020). Illegal trade in wild cats and its link to Chinese-led development in Central and South America. *Conservation biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, 34(6), 1525-1535. <https://doi.org/10.1111/cobi.13498>
- Moreno, C.** (2001). *Métodos para medir la biodiversidad*. M&T–Manuales y Tesis SEA. <http://entomologia.rediris.es/sea/manytes/metodos.pdf>
- Mozer, A. & Prost, S.** (2023). An introduction to illegal wildlife trade and its effects on biodiversity and society. *Forensic Science International: Animals and Environments*, 3, 100064. <https://doi.org/10.1016/j.fsiae.2023.100064>
- Osorio-Ramírez, M. & Zuluaga-Restrepo, N.** (2018). Implementación del artículo 164 de la Ley 1801 de 2016: incautación de fauna silvestre con ocasión al tráfico ilegal en el Departamento de Risaralda Colombia 2017. *Cuaderno de Investigaciones: Semilleros Andina*, 9(9), 142. <https://revia.areandina.edu.co/index.php/vbn/article/view/820/685>
- Patiño-Escobar, P. C.** (2020). *Tráfico ilegal de fauna silvestre en el sur de la Amazonia colombiana. Estrategias contextualizadas para su prevención y control* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional Javeriano. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/50990?locale-attribute=fr>
- R Core Team** (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Racero-Casarrubia, J., & Reyes-Cogollo, K.** (2022). Mamíferos carismáticos emblemas de la conservación de Colombia. *Therya Ixmana*, 1(3), 111113. https://doi.org/10.12933/therya_ixmana-22-263.
- Ramírez-Chaves, H., Morales-Martínez, D., Rodríguez-Posada, M., Suárez-Castro, A.** (2022). Checklist of the mammals (Mammalia) of Colombia. *Mammalogy Notes*, 7(2), 253. <https://doi.org/10.47603/mano.v7n2.253>
- Restrepo-Rodas, D. C. & Pulgarín-Restrepo, P. C.** (2021). Dinámicas de los loros en cautiverio en Colombia: tráfico, mortalidad y liberación. *Ornitología Colombiana*, 16, 1-23. <https://asociacioncolombianadeornitologia.org/ojs/index.php/roc/article/view/373/390>
- Roberts, D.W.** (2023). labdsv: Ordination and Multivariate Analysis for Ecology. R package version 2.1-0, <<https://CRAN.R-project.org/package=labdsv>>.
- Ruiz, M., Leguizamón, N., Bello, A., Pinedo, M., Ortega, J., Jaramillo, M.** (2020). Determinación de los orígenes geográficos de los mamíferos silvestres decomisados por la Secretaría Distrital del Ambiente (SDA) en Bogotá (Colombia) mediante análisis moleculares durante 2017-2018. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 114, 111-136. <https://doi.org/10.29077/bol.114.e03>
- Santini, L., Benítez, A., Dormann, C., Huijbregts, M.** (2022). Population density estimates for terrestrial mammal species. *Global Ecology and Biogeography*, 31(5), 978-994. <https://doi.org/10.1111/geb.13476>
- Sas-Rolfes, M. t, Challender, D. W., Hinsley, A., Veríssimo, D., Milner-Gulland, E. J.** (2019). Illegal wildlife trade: Scale, processes, and governance. *Annual Review of Environment and Resources*, 44(1), 201-228.
- Sollund, R.** (2017). The use and abuse of animals in wildlife trafficking in Colombia: Practices and injustice. En D. Rodríguez, H. Mol, A. Brisman y N. South (Eds.) *Environmental crime in Latin America: The theft of nature and the poisoning of the land* (pp. 215-243), Springer.
- Suárez-Giorgi, C. A.** (2016). *Diagnóstico del tráfico ilegal de fauna silvestre en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), Departamentos de Cundinamarca y Boyacá, Colombia* [Tesis de especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio UMNG. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/15235>
- IUCN.** (2024). Estadísticas de Resumen. IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/es/resources/summary-statistics>
- USAID.** (2021). *Tráfico ilícito de especies: Crimen organizado contra la vida silvestre*. <https://hdl.handle.net/20.500.14150/2743>
- Valencia-Parra, E. & De La Ossa, V. J.** (2016). Patrones de uso de fauna silvestre en el bajo río San Jorge, Sucre, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 8(s), 276-282. <https://doi.org/10.24188/recia.v8.n0.2016.382>
- Villareal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., Umaña A. M.** (2004). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Wickham, H.** (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer. <https://ggplot2.tidyverse.org>.

Artículo original

Modulación metabólica a temperaturas crecientes: un enfoque ontogenético en la rana tropical de alta montaña *Dendropsophus molitor* (Hylidae)

Metabolic modulation under increasing temperatures: an ontogenetic approach in the high mountain tropical frog *Dendropsophus molitor* (Hylidae)

Juliana Poveda-Cantini*, Edgar Cristancho

Universidad Nacional de Colombia, Laboratorio de fisiología animal, Bogotá, Colombia

Resumen

Se ha previsto que en los ambientes tropicales de alta montaña aumentarán los extremos térmicos en los próximos años debido a los efectos del cambio climático. En este escenario, las especies endémicas de distribución limitada pueden presentar afectaciones poblacionales, principalmente debido a las altas temperaturas, por lo que resulta importante conocer las respuestas fisiológicas de estos organismos frente a tales condiciones ambientales. Por ello, en el presente estudio nos propusimos estimar el efecto de la temperatura sobre la respiración en la rana de alta montaña *Dendropsophus molitor*, determinando el consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$) a temperaturas crecientes (18 a 28 °C) en larvas en estadios de desarrollo de Gosner 31–40, en juveniles en estadio de Gosner 43–45 y en adultos. En las larvas se midió el $\dot{V}O_2$ mediante una sonda de oxígeno disuelto (OD), en tanto que en los juveniles y adultos se utilizó un sensor de oxígeno gaseoso dotado de una cámara cerrada. Los individuos en estadios juveniles de la metamorfosis y los adultos presentaron un aumento del $\dot{V}O_2$ en función de la temperatura, en tanto que en los estadios larvales el $\dot{V}O_2$ presentó una tendencia monótonica frente al tratamiento térmico evaluado, con un aumento de 18 a 23 °C y una disminución de 23 % entre los 23 y los 28 °C. Esto sugiere una vulnerabilidad en la función respiratoria de las larvas de esta especie frente a las temperaturas elevadas, lo que indicaría que esta es la fase del desarrollo más sensible en un escenario de calentamiento global.

Palabras clave: Calentamiento global; Consumo de oxígeno; Anfibios; Ecofisiología; Tasa metabólica estándar.

Abstract

High-mountain tropical environments are predicted to present greater thermal extremes due to climate change in the coming years. In this scenario, endemic species with limited distribution may have population impacts. Therefore, it is important to study the physiological responses of these organisms in such environmental conditions. In this context, our objective was to estimate the effect of temperature on the respiration of the high mountain frog *Dendropsophus molitor* by determining oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) at increasing temperatures (18°C to 28°C) in Gosner development stages 31–40 larvae, Gosner stage 43–45 juveniles, and adults. $\dot{V}O_2$ in larvae was measured using a dissolved oxygen (DO) probe and in juveniles and adults using a gaseous oxygen sensor in a closed chamber. Juvenile individuals and adults had a $\dot{V}O_2$ increase as a function of temperature and larval-stage individuals' $\dot{V}O_2$ presented a monotonic trend in response to the thermal treatment evaluated, with an increase from 18 to 23°C followed by a decrease of 23% from 23 to 28°C. This suggests that the respiratory function of this species' larvae is vulnerable to high temperatures, so this would be the most susceptible development phase before a global warming scenario.

Keywords: Global warming; Oxygen consumption; Amphibians; Eco physiology; Standard metabolic rate.

Citación: Poveda-Cantini J, Cristancho E. Modulación metabólica a temperaturas crecientes: un enfoque ontogenético en la rana tropical de alta montaña *Dendropsophus molitor* (Hylidae). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):523-536, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2655>

Editor: Martha Patricia Ramírez

***Correspondencia:**

Poveda-Cantini Juliana;
jupovedaca@unal.edu.co

Recibido: 27 de mayo de 2024

Aceptado: 26 de julio de 2024

Publicado en línea: 12 de agosto de 2024



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

Introducción

Dendropsophus molitor es un anfibio de alta montaña endémico de la cordillera oriental de Colombia; su hábitat se ubica entre los 2.000 y los 3.600 m. y está presente en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Santander y Norte de Santander (Guarnizo *et al.*, 2014). La especie tiene hábitos heliotérmicos (Valdivieso & Tamsitt, 1974; Navas, 2006) y es frecuente en cuerpos de agua lénticos y poco profundos, así como en zonas intervenidas y centros poblados. La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) la cataloga como de preocupación menor (LC) (Guarnizo *et al.*, 2014).

Como la mayoría de los anfibios a nivel mundial, *D. molitor* se enfrenta a amenazas como el uso elevado de pesticidas, el cambio de uso del suelo, la fragmentación de las coberturas naturales y el calentamiento global (Pounds *et al.*, 2006; Bernal *et al.*, 2009; Triana-Velásquez *et al.*, 2013; Alves-Ferreira *et al.*, 2022), siendo este último factor especialmente preocupante dado que el aumento de la temperatura amenaza principalmente a organismos ectotermos, cuya tasa metabólica está sujeta a la temperatura ambiental (Paaijmans *et al.*, 2013). Los organismos ectotermos tropicales de alta montaña se ven particularmente afectados por el calentamiento debido a su efecto sobre la temperatura corporal, además de los retos de la altura, entre ellos, la radiación ionizante (IR y UV) y las variaciones extremas de la temperatura diaria. La confluencia de dichos factores aumenta el riesgo de que estos organismos estén expuestos a temperaturas cercanas a sus límites térmicos (Nowakowsky *et al.*, 2017), lo que dificulta el desarrollo óptimo de sus funciones e historia de vida.

En este sentido, la conservación de tetrápodos ectotermos como los anfibios es prioritaria, ya que hacen parte esencial de los ecosistemas al controlar las poblaciones de invertebrados y constituir el alimento de otros vertebrados (Galeano *et al.*, 2006). En el caso de los anfibios, el panorama no es optimista, ya que en los últimos años se ha registrado la desaparición de un gran número de especies, así como el descenso de sus poblaciones a nivel mundial (Galeano *et al.*, 2006; Whitfield *et al.*, 2007; Catenazzi *et al.*, 2014; Nowakowsky *et al.*, 2017).

En este contexto deben emplearse herramientas de predicción y prevención para conocer el impacto de diversas variables ambientales en los organismos y poblaciones de interés y adoptar decisiones anticipadas para su conservación. La mayoría de modelos utilizados para calcular la tasa de desaparición de una especie se basan en la tendencia de las temperaturas de los ecosistemas y en la tasa de deforestación o de cambio de uso de la tierra (Agudelo *et al.*, 2019; Nowakowski *et al.*, 2017). El realismo de los escenarios de cambio de la composición de las especies propias de ambientes sujetos a crecientes factores de estrés aumenta a medida que se agregan a los modelos datos de ajustes fisiológicos individuales, procesos adaptativos a nivel de poblaciones y, en general, datos sobre su funcionamiento, por ejemplo, el rendimiento metabólico de los organismos en diferentes escenarios.

El rendimiento metabólico es una variable que se evalúa frecuentemente mediante el consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$) (Rowe & Crandall, 2018), ya que la función de la respiración es suplir los requerimientos de oxígeno y eliminar el dióxido de carbono (CO_2), ajustándose a los requerimientos del organismo en ambientes de diferentes características (Shelton *et al.*, 1986). El metabolismo también puede evaluarse con otros métodos, como la actividad de enzimas (Storey, 2002), el nivel de sustratos energéticos utilizados en la respiración (Jørgensen, 1988), la emisión de CO_2 (Donohoe *et al.*, 1998) y la calorimetría directa o indirecta (Lighton, 2008). El $\dot{V}O_2$ se ha empleado como medida de la tasa metabólica en adultos de *Rana pipiens*, *Xenopus laevis* y *Rhinella marina* (Hillman, 1976; de Andrade & Abe, 1997). Los estudios en estadios larvales son escasos, conocemos únicamente los aportes de Colmenares *et al.* (1980) y Rowe & Randall (2018) en las larvas de anfibios comunes en la región del Atlántico medio de Norteamérica.

Dado que los estudios predictivos en especies tropicales de alta montaña en general no se han apoyado en la respuesta fisiológica de las especies frente al calentamiento global, el alcance de los modelos específicos para ellas podría mejorarse mediante la inclusión

de información sobre las funciones afectables por la temperatura, como la búsqueda de alimento, la digestión, la función cardíaca y el desarrollo. Debido al heterogéneo efecto de la temperatura sobre el metabolismo, resulta conveniente diferenciar entre la tasa metabólica basal (TMB) y la tasa metabólica estándar (TME). Ambas cuantifican el metabolismo en reposo de un organismo, pero la TMB se aplica al metabolismo de los endotermos, en tanto que la TME se usa para los ectotermos. En el presente estudio utilizamos la TME para determinar el metabolismo aeróbico mediante el consumo de oxígeno en fases larvales, juveniles y adultas de *D. molitor* bajo condiciones térmicas superiores a las habituales en su hábitat.

Materiales y métodos

Ejemplares

En enero del 2018 se capturaron ocho ejemplares (2 hembras y 6 machos) de *D. molitor* en el campus de la Universidad Nacional de Colombia, con el objeto de generar descendencia. Los animales fueron transferidos a un terrario (0,10 m³) con especies vegetales y humedad adecuada, el cual se dejó a la intemperie para no alterar la intensidad de la luz ni el fotoperiodo. Las temperaturas diarias mínimas y máximas del terrario en los meses del estudio fueron 2,5 y 23,4 °C, respectivamente. Los ejemplares se reprodujeron entre los meses de mayo y noviembre de 2018 y fueron alimentados cada tercer día con insectos capturados en su ambiente natural. Después de cada postura y del desarrollo de los huevos a larvas de estadio 22 aproximadamente (Gosner, 1960), 12 individuos se transfirieron a un acuario (0,16 m³) en el laboratorio donde se les alimentaba cada tercer día con alimento comercial para peces de marca Aquarela (composición: harina de pescado, hígado animal, aceite de pescado, germen de trigo, levadura, vitaminas A, D y E, riboflavina, niacina, óxido de manganeso, óxido de hierro, óxido de cobre, óxido de zinc, yoduro de potasio, carbonato de calcio y lisina). El agua del acuario se cambiaba cada tercer día por agua libre de cloro, permaneciendo a temperatura ambiente (18° C) durante el tiempo de experimentación.

Determinación del consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$).

El consumo de oxígeno se midió en tres estadios diferentes de desarrollo según la escala de Gosner (1960): larvas (estadios 31-40), individuos juveniles (estadios 43-45) y adultos y en cinco temperaturas diferentes (18, 20, 23, 25 y 28 °C), controladas en baño de agua termostático, cuya lectura se verificó con un termómetro de mercurio (Brixco, Colombia, precisión de $\pm 1,0^\circ$ C). En las larvas el $\dot{V}O_2$ se determinó mediante el cambio del oxígeno disuelto en el agua (OD), en tanto que en los juveniles y adultos se hizo mediante el cambio porcentual en el oxígeno atmosférico, utilizando en ambos casos sensores de O₂ (Vernier®, Reid Suply, USA) en un sistema cerrado. Los juveniles y adultos (estadios de respiración aérea) se envolvieron en gasa húmeda para evitar su movimiento y que interfirieran en los datos del sensor. Para asegurar el estado de calma de los animales, la cámara de medición fue cubierta con papel de aluminio (Figura 1). Las mediciones se hicieron en animales en ayuno y bajo observación constante para registrar señales de incomodidad (movimientos bruscos, giros constantes y, en el caso de las larvas, buscar la superficie).

Determinación del $\dot{V}O_2$ en larvas

El $\dot{V}O_2$ se midió en 12 larvas utilizando una sonda de oxígeno disuelto (Vernier® Go Direct, modelo VER- GDX-O₂, Reid Suply, USA). Cada individuo se transfirió desde el acuario a una cámara de medición de 50 ml de agua. Para evitar el equilibrio de la presión parcial de oxígeno entre el agua y el aire atmosférico, se vertió glicerina sobre la superficie del agua hasta formar una película de 3 mm después de meter a cada individuo en la cámara de medición, para posteriormente introducir la sonda. Debido a la incomodidad mostrada por los animales, posiblemente debido a la temperatura del agua, el cambio en el OD se registró durante 20 min, dando 15 min previamente para el ajuste del animal a la cámara de medición. La duración de la medición se estableció siguiendo el protocolo de

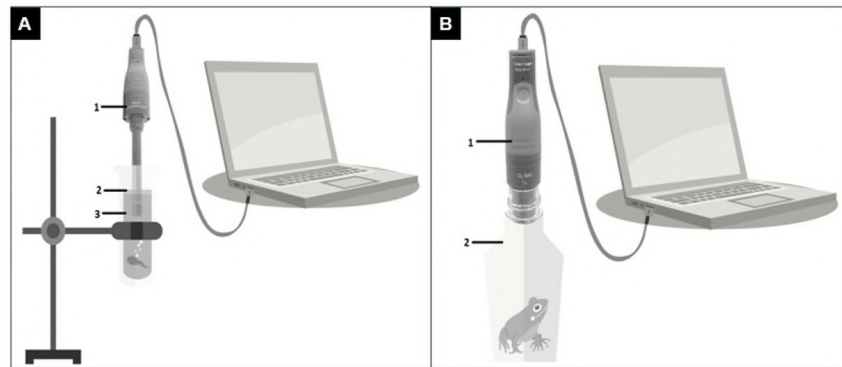


Figura 1. Montajes para la medición de $\dot{V}O_2$: **A.** Montaje para larvas, en donde 1 es el sensor de oxígeno disuelto, 2 señala la película de glicerina y 3 el medio acuoso de volumen conocido. **B.** Montaje para juveniles y adultos, en donde 1 señala el sensor de oxígeno gaseoso y 2 el medio aéreo de volumen conocido

Mueller & Semyour (2011) utilizado en huevos y larvas de *Pseudophryne bibronii*. Ya que los adultos no mostraron este comportamiento, el tiempo de registro se fijó en 30 min. Antes de cada medición los individuos fueron pesados en balanza analítica (Adventurer Ohaus, Estados Unidos). El $\dot{V}O_2$ se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\dot{V}O_2 = \left[\frac{\left(\frac{O_{2i} - O_{2f}}{\rho O_2} \right) V}{\frac{t}{w}} \right],$$

donde O_{2i} y O_{2f} corresponden, respectivamente, a la concentración inicial y final de oxígeno en la cámara de medición; ρO_2 a la densidad del oxígeno en el agua ($1,43g \cdot mL^{-1}$); V al volumen del medio (mL); t al tiempo de medición (min), y w a la masa del animal (g).

Determinación del $\dot{V}O_2$ en adultos y juveniles

El $\dot{V}O_2$ en juveniles y adultos (7 y 8 individuos, respectivamente) se midió determinando el cambio en la concentración del oxígeno con un sensor de oxígeno gaseoso Vernier Go Direct (Canadá). Los animales se introdujeron en un recipiente con capacidad de 50 mL para juveniles y 250 mL para adultos. La medición se prolongó por 30 min; se registró la concentración de oxígeno en la cámara cada 10 min dando 15 min previos para el ajuste del animal a la cámara. Antes de cada medición los individuos fueron pesados en balanza analítica (Adventurer Ohaus, Estados Unidos). El consumo de oxígeno se calculó utilizando la siguiente ecuación, cuyos resultados se expresaron en mL de $O_2 \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$:

$$\dot{V}O_2 = \left(\frac{\left(\frac{O_{2i} - O_{2f}}{t} \right) V}{w} \right).$$

Las cantidades y unidades fueron las mismas de la ecuación utilizada para la determinación de $\dot{V}O_2$ en larvas. La señal originada en los sensores se registró con una tasa de muestreo de 0,033 Hz y posteriormente se transfirió al computador usando el *software* del fabricante (Vernier Graphical Analysis®).

Coefficiente de temperatura Q_5

El coeficiente de temperatura (Q_5), se calculó con intervalos de 5° C para todos los estadios utilizando la ecuación de Van't Hoff:

$$Q_5 = \left(\frac{[\dot{V}O_2]_2}{[\dot{V}O_2]_1} \right)^{\frac{5}{T_2 - T_1}}$$

donde $[\dot{V}O_2]_1$ y $[\dot{V}O_2]_2$ denotan el consumo de oxígeno del individuo a las temperaturas T_1 y T_2 , respectivamente, con una diferencia entre las dos de 5° C.

Análisis estadístico

Los valores de $\dot{V}O_2$ corregidos por masa corporal y por estadio y temperatura se reportan como promedio y desviación estándar. La normalidad y la homocedasticidad de los datos obtenidos se comprobaron mediante la prueba de Shapiro-Wilk y el test de Bartlett, respectivamente. El consumo de oxígeno de un mismo estadio a diferentes temperaturas se comparó mediante un análisis de varianza de las medidas repetidas o test de Friedman para valores paramétricos o no paramétricos según el caso. Las diferencias en el consumo de oxígeno de los distintos estadios a igual temperatura se compararon mediante un análisis de varianza de una vía para datos paramétricos y mediante la utilización de un modelo de regresión lineal y pruebas pareadas de t Student para los datos no paramétricos. Las comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey o de Wilcoxon se hicieron para muestras pareadas según fuera necesario. La hipótesis nula fue rechazada con un nivel de significación de 0,05. En el análisis se utilizaron los programas R y Past 3.19.

Aspectos éticos

El grupo de investigación no posee permiso de captura, pero el estudio recibió aval del comité de ética de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia (Acta 10-2018), ya que en el estudio no se utilizaron partes ni tejidos de los animales y tampoco se requirieron moléculas en la ruta del dogma de la genética. Además, los individuos fueron liberados en su hábitat natural después del estudio (medio urbano adyacente al laboratorio donde este se realizó).

Resultados

Los tamaños y pesos de los individuos en sus diferentes etapas de desarrollo se resumen en la **tabla 1**, este último expresado en promedios, rangos y desviación estándar del peso.

Consumo de oxígeno en larvas

El consumo promedio de los individuos larvales en las distintas temperaturas se presenta en la **figura 2A**. Se puede observar que en el rango de 18 a 23 °C el $\dot{V}O_2$ aumentó de 0,0025 mL·min⁻¹·g⁻¹ a 0,0035 mL·min⁻¹·g⁻¹, pero a partir de los 23 °C disminuyó a 0,0027 mL·min⁻¹·g⁻¹. Las diferencias en el consumo de oxígeno entre los 18 y los 23 °C, así como entre los 23 y los 25 °C fueron significativas según la prueba de Friedman ($p < 0,05$); el coeficiente de temperatura (Q_5) para este estadio fue positivo en el rango de 18 a 23 °C,

Tabla 1. Rango de peso, promedio y desviación estándar en diferentes estadios de desarrollo de *D. molitor*

Estadio	Rango (g)	Promedio ± SD (g)
Larvas	0,71 - 2,00	1,27 ± 0,34
Juveniles	0,87 - 2,32	1,61 ± 0,51
Adultos	2,65 - 9,55	4,65 ± 2,45

evidenciando un aumento de 1,35 veces (40 %) con un incremento de la temperatura de 5 °C, en tanto que a partir de los 23 °C, el valor de Q_{10} se hizo negativo, lo que implicó una disminución del $\dot{V}O_2$ en 0,80 veces (23 %) con el mismo cambio de temperatura.

Consumo de oxígeno en juveniles

El $\dot{V}O_2$ en los juveniles aumentó en función de la temperatura sin diferencias estadísticas con respecto a la temperatura ambiente (**Figura 2B**). El coeficiente de la temperatura tuvo un aumento similar en los rangos de 18 a 23 °C y 23 a 28 °C, aumentando éste entre 1,25 y 1,34 veces cada 5 °C.

Consumo de oxígeno en adultos

Al igual que en los juveniles, el aumento en consumo de $\dot{V}O_2$ en los adultos ocurrió al aumentar la temperatura, aunque, en general, el valor promedio de $\dot{V}O_2$ en este estadio fue menor en 21,7 % al de los juveniles (**Figura 2C**). El metabolismo incrementó de forma significativa ($p=0,002$, Anova) solo cuando la temperatura del ensayo aumentó a 28 °C. Los

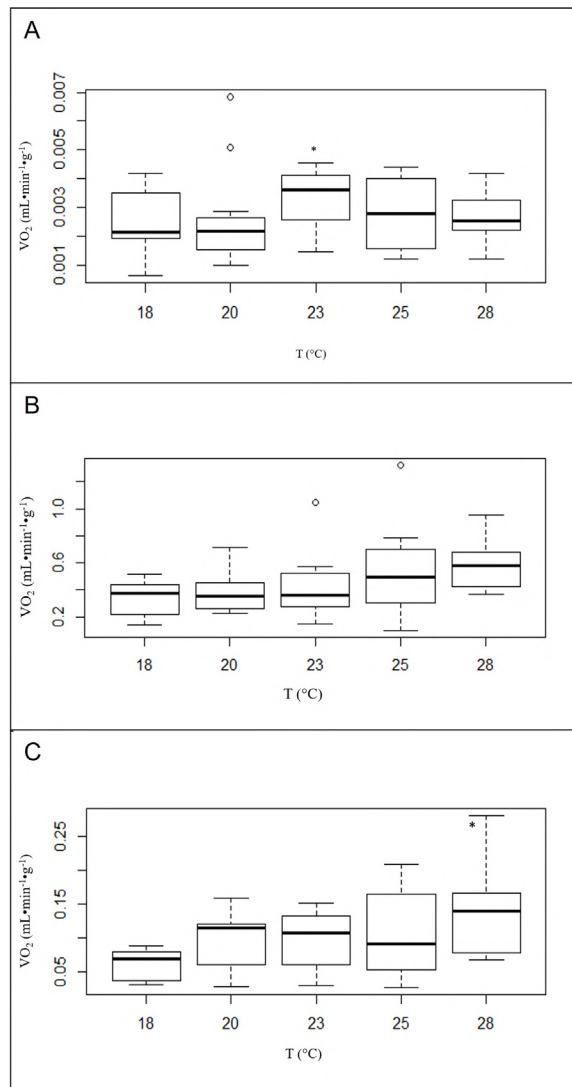


Figura 2. Valor promedio ± desviación estándar de $\dot{V}O_2$ en (A) larvas, (B) juveniles y (C) adultos de *D. molitor* con temperatura creciente. * Indica diferencias estadísticas con $p<0,05$ con respecto a las demás temperaturas en (A) y a 18 °C en (C)

datos presentaron una alta dispersión, posiblemente por el reducido número de individuos evaluados. El coeficiente de la temperatura calculado indica que el metabolismo aumentó entre 1,40 y 1,58 veces cada 5 °C, lo que indica un aumento similar al registrado en los estadios larvales y juveniles.

Comparación del $\dot{V}O_2$ entre estadios

Los resultados de la aplicación de las pruebas estadísticas se asumieron como acertados, a pesar de que no se cumplieron los supuestos necesarios, ya que los valores de p obtenidos fueron muy bajos (entre $1,226 \times 10^{-5}$ y $2,107 \times 10^{-5}$), con lo cual la posibilidad de incurrir en un error de tipo I era mínima.

En la **figura 3** se muestra el $\dot{V}O_2$ de los individuos en los diferentes estadios de desarrollo con cada una de las temperaturas evaluadas. Se observa que en todas las temperaturas se repitió el mismo patrón, es decir, los individuos juveniles presentaron un metabolismo aeróbico significativamente más alto que el de las larvas y los adultos, siendo el $\dot{V}O_2$ de estos dos últimos estadios muy similar en todas las temperaturas.

Discusión

La temperatura corporal es una variable crucial de los animales ectotermos, ya que los afecta a nivel fisiológico y comportamental (Angilletta *et al.*, 2002; Paaijmans *et al.*, 2013; Perotti *et al.*, 2018). En general, las tasas metabólicas de estos organismos se aceleran con temperaturas ambientales altas, lo que se refleja en el metabolismo aeróbico basal, el cual puede medirse a través del $\dot{V}O_2$. El metabolismo aeróbico ha recibido gran

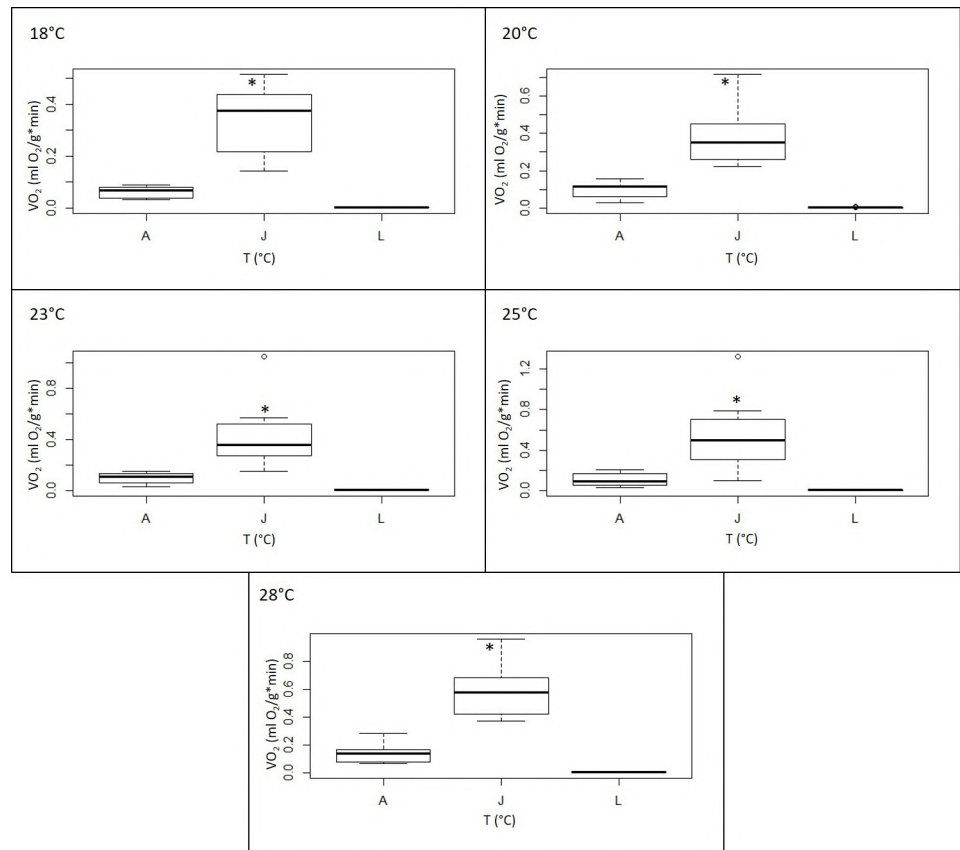


Figura 3. Promedio \pm desviación estándar del $\dot{V}O_2$ en adultos (A), juveniles (J) y larvas (L) de *D. molitor* con temperatura creciente. * Indica diferencias estadísticas con $p < 0,05$ con respecto a los demás estadios

atención en la última década porque es un rasgo clave para entender la respuesta térmica al cambio climático (Shulte, 2015). Este parámetro proporciona información directa de la cantidad de energía que un organismo requiere para llevar a cabo las funciones necesarias para su supervivencia (Blem *et al.*, 1986).

Las especies de anuros de alta montaña están adaptadas a fluctuaciones dramáticas de la temperatura en cortos periodos (Navas, 1997; Gutiérrez-Pesquera, 2015), lo que significa que pueden llevar a cabo funciones metabólicas con normalidad en un rango amplio de temperaturas. El presente estudio se enfocó en la actividad metabólica de estados larvarios en anuros tropicales de alta montaña, cubriendo así el desarrollo ontogénico mediante el análisis del $\dot{V}O_2$ como medida de referencia.

El incremento de la temperatura no produjo una tendencia marcada en el $\dot{V}O_2$ de las larvas: entre los 18 y los 20 °C el metabolismo se mantuvo cercano a niveles basales, pero se elevó al valor máximo en el marco del experimento con una temperatura de 23 °C (Figura 2A), lo cual se concuerda con lo reportado en anuros por Blem *et al.* (1986), Angilletta *et al.* (2002) y Rowe & Crandall (2018), quienes registraron el incremento del $\dot{V}O_2$ con la elevación de la temperatura dentro de los límites térmicos de las especies evaluadas. El incremento superior a 28 °C resultó en una disminución en un 20 % en la intensidad del metabolismo, lo que sugeriría que se alcanzó la temperatura máxima crítica para el $\dot{V}O_2$ de la especie en el estadio larval, valor que se refiere a la temperatura a partir de la cual las funciones aeróbicas del organismo empiezan a fallar debido al exceso de calor, que perjudica las funciones enzimáticas y, en consecuencia, ralentiza las reacciones metabólicas necesarias para el funcionamiento de los organismos (Navas, 1997; Angilletta, 2009).

Los resultados del $\dot{V}O_2$ para el estadio larval son comparables con los obtenidos por Rowe & Crandall (2018), quienes registraron entre 0,001 y 0,006 mg O₂·g⁻¹·min⁻¹ para larvas en estadio 25 de cuatro especies de anuros en un gradiente similar de temperaturas (16 - 30 °C). En este caso, el metabolismo de todas las especies aumentó en función de la temperatura, sin que se presentara su disminución; sin embargo, debe tenerse en cuenta que las especies evaluadas en nuestro estudio son propias de zonas templadas, donde las variaciones de temperatura son estacionales y mínimas en relación con las variaciones diarias de la alta montaña tropical enfrentadas por *D. molitor*.

Ya que la oxidación completa de ácidos grasos requiere mayor suplemento de oxígeno que la de carbohidratos (Hargreaves & Spriet, 2018), la elevación de la temperatura debería haber causado un incremento del $\dot{V}O_2$. La razón de que el aumento del metabolismo no sucediera es que, a pesar del amplio cambio en la temperatura diaria ambiental (aprox. 21 °C), la actividad de las enzimas de la β -oxidación en la especie podría haberse adaptado a un rango estrecho y frío. Las enzimas adaptadas al frío normalmente presentan valores elevados de la constante de Michaleis–Menten (Somero, 1995); por lo tanto, el aumento de la temperatura obstaculiza la formación del complejo enzima–sustrato, elevando la concentración necesaria para alcanzar $\frac{1}{2}V_{\max}$. Lo anterior sugiere que existe un rango térmico estrecho en la actividad de las enzimas que sostienen el metabolismo durante la metamorfosis en *D. molitor*.

La metamorfosis se asocia principalmente a modificaciones anatómicas en la transición del medio acuático al terrestre, pero también trae consigo enormes modificaciones moleculares y bioquímicas. Los estudios al respecto han demostrado ajustes adaptativos en las propiedades de la asociación Hb:O₂ de las especies al ambiente que habitan y dependientes del estado de desarrollo en el cual se encuentren. En la Hb de *Rana catesbeiana* McCutcheon (1936) estableció que el P₅₀ de la Hb larval es menor que en el adulto. Así, la Hb en los adultos es más adecuada para un animal que respira aire, es más activo y debe sostener el metabolismo muscular (Broyles, 1981). De otro lado, la hipoxia causa poco efecto en el P₅₀ de la Hb de larvas de *R. catesbeiana*, en tanto que, en adultos, este disminuye en aproximadamente 10 mm Hg (Pinder & Burggren, 1983). Meirelles *et al.* (1979) establecieron en *Pipa carvalhoi*, una especie netamente acuática, que la unión Hb:O₂ era independiente a los cambios de pH tanto en adultos como en larvas. Weber *et al.* (2002) establecieron que en comparación con *Xenopus leavis*, *Telmatobius*

peruvianus dispone de una modulación de Cl en la afinidad de la Hb por O₂. En cuanto al efecto de la temperatura en la afinidad de Hb por O₂, **Gahlenberck & Bartels** (1968) encontraron que la sangre de *Rana esculenta* aclimatada a 5,0 °C evidenció una afinidad similar a la de individuos aclimatados a 20 °C, lo cual demuestra indirectamente una baja dependencia del pH, ya que la temperatura incrementa la tasa de disociación del agua, aumentando la concentración de protones [H⁺] en la sangre. Por último, las poblaciones de *Bufo gargarizans* que habitan sobre los 3.400 m presentan un típico desplazamiento a la izquierda en la curva de disociación Hb:O₂ comparadas con las poblaciones de control (500 m), lo cual implica ajustes en la captura y liberación de O₂ dependientes de la oferta ambiental de O₂ (**Pu et al.**, 2021). El conocimiento de los moduladores de la asociación de Hb con O₂ en distintas especies, poblaciones y estados de desarrollo permite suponer que la Hb de *D. molitor* podría exhibir el mismo comportamiento registrado en larvas y adultos de *R. catesbeiana*.

La película de glicerina aplicada a la superficie del agua en el ensayo representó una barrera para la eliminación del CO₂ desde la sangre hacia el agua. Si asumimos una baja sensibilidad de la unión Hb:O₂ al pH, la acumulación de CO₂, pudo haber desplazado la curva de disociación en una magnitud reducida hacia la izquierda, con aumento de la afinidad de Hb por O₂. El aumento en la captación de O₂ no implica en forma directa una mejora en la capacidad de la proteína para entregar el oxígeno a los tejidos. Así, la disminución del P₅₀ pudo haber causado la del $\dot{V}O_2$ cuando la temperatura del medio fue superior a 23 °C (**Figura 2A**).

Rowe & Crandall (2018) encontraron que el consumo de oxígeno en *Hyla chrysoscelis* se dobla con el aumento de la temperatura ambiental en 10 °C (Q₁₀ = 2,03), el cual resulta ser moderadamente inferior al resultado obtenido al doblar el valor de Q₅ (1,35) para *D. molitor*, lo que puede obedecer a diferencias específicas de la especie y a la procedencia de los individuos utilizados en cada estudio. **Navas et al.** (2010) reportaron un desarrollo normal de la mayor parte de una muestra de renacuajos de *D. molitor* mantenida en temperaturas entre los 12 y los 30 °C, lo que concuerda con los resultados de nuestro estudio. Si bien a partir de los 23 °C hay reducción del metabolismo aeróbico, las temperaturas superiores no resultan deletéreas para llevar a término el desarrollo, a pesar de la caída del $\dot{V}O_2$. Por otro lado, **Cupp** (1980) menciona que en los estadios larvales 32 y 42, *Rana temporaria* usualmente tiene una mayor tolerancia térmica que en los demás. Aunque no fue el propósito de nuestro estudio determinar la temperatura crítica máxima, el cambio de tendencia en el $\dot{V}O_2$ entre 23 y 25 °C insinúa un límite térmico para la función respiratoria.

En individuos juveniles el $\dot{V}O_2$ mostró una tendencia clara en función de la temperatura. Las temperaturas de 25 y 28 °C produjeron incrementos del 30 y el 50 %, respectivamente, en comparación con la temperatura ambiente. Aunque estos incrementos son considerables, no son estadísticamente distintos, quizás por el bajo tamaño muestral (n=7) o la gran variabilidad biológica de la función respiratoria. Las formas juveniles han abandonado el agua para respirar aire y el medio aéreo representa ventajas notables frente al agua para la respiración: el contenido de oxígeno es mayor, el esfuerzo ventilatorio es menor y la disipación de calor evaporativo es más favorable, lo cual se refleja en un aumento continuo del $\dot{V}O_2$ a partir de los 23 °C sin que disminuya con temperaturas superiores (**Figura 2B**). En el estadio juvenil el $\dot{V}O_2$ presentó variación entre los 0,3 y 0,6 mL O₂·g⁻¹·min⁻¹ en todas las temperaturas, lo cual representa, en todos los casos, un valor significativamente mayor a de los estadios larvales y adultos (**Figura 3**). A partir del estadio 40 de desarrollo se producen los cambios más dramáticos en la metamorfosis, como la reabsorción de la cola y las branquias, la formación de extremidades y pulmones y la remodelación de órganos como el intestino y el cerebro (**Brown & Cai**, 2007). Estos cambios suponen elevar la intensidad del metabolismo, lo que se logra aumentando el suministro de oxígeno evidenciado en el incremento del $\dot{V}O_2$ (**Figura 3**).

Son escasos los estudios que miden el $\dot{V}O_2$ en individuos juveniles (estadios 43–45), y la mayoría de las investigaciones se concentran en la etapa adulta de los anfibios o en estadios larvales más tempranos (alrededor del estadio 25) (**Rowe & Randall**, 2018;

Perotti et al., 2018). Por esta razón el conocimiento de la relación del metabolismo con la temperatura ha sido escaso y nuestros datos deben contrastarse con los de otras especies para establecer si la tendencia obtenida es típica para la especie o existen variaciones en el parámetro. Dada la gran variedad de estrategias reproductivas y de nichos ocupados por los anfibios, es posible suponer que la sensibilidad a la temperatura depende bastante de estos aspectos y que una misma temperatura genera diferentes respuestas en diferentes estadios (**Figura 3**).

Las mediciones de $\dot{V}O_2$ permitirían establecer que, aparentemente, este estadio no muestra vulnerabilidad aeróbica frente a la temperatura y que este aspecto no se vería alterado con el calentamiento global. Las larvas, sin embargo, tienen una tendencia a la disminución del metabolismo aeróbico en temperaturas superiores a los 23 °C. En un sistema de recursos limitados, esto podría reducir el crecimiento y disminuir la energía disponible para funciones vitales para la especie como la defensa contra patógenos (**Rowe & Crandall**, 2018), afectando la aptitud física de la especie.

En los adultos se observó un aumento del $\dot{V}O_2$ entre 1,40 y 1,58 veces con un incremento de 5 °C en la temperatura, lo que supone un aumento del metabolismo. En este estadio el $\dot{V}O_2$ cambió de 0,061 a 0,13 mL O₂•g⁻¹•min⁻¹ en el rango de temperatura registrado, lo que representa una diferencia estadísticamente significativa del $\dot{V}O_2$ con respecto a los juveniles más no a los renacuajos (**Figura 3**).

Otros estudios han medido el consumo de oxígeno en función de la temperatura en individuos de otras familias, géneros y especies de anuros. Así, **Hillman** (1976) reporta que a los 25 °C el $\dot{V}O_2$ de *X. laevis*, *R. pipiens*, *Anaxirus cognatus* y *Scaphiopus couchii* estuvo entre los 0,54 y 1,91 mL O₂•g⁻¹•h⁻¹ (0,009 mL O₂•g⁻¹•min⁻¹ y 0,032 mL O₂•g⁻¹•min⁻¹), lo que corresponde a un rango similar al comprobado en el presente estudio a igual temperatura. En especies de la misma familia de *D. molitor* (Hylidae), **de Andrade & Abe** (1997) reportaron que el $\dot{V}O_2$ de *Aparaphenodon brunoi* y *Corythomantis greeningi* osciló entre 47,9 y 60,3 mL O₂•kg⁻¹•h⁻¹ (0,000798 mL O₂•g⁻¹•min⁻¹ y 0,001 mL O₂•g⁻¹•min⁻¹) a temperaturas de 20 y 30 °C, respectivamente. Este resultado es notablemente menor al obtenido aquí, toda vez que las especies en cuestión son endémicas de las sabanas y bosques tropicales de tierras bajas de Brasil (altitud <500 m), donde el aporte de oxígeno en el aire atmosférico es mayor al existente a 2.600 m y el metabolismo puede tener mayor intensidad. Los valores de $\dot{V}O_2$ de *Aparaphenodon brunoi* y *Corythomantis greeningi* en este estudio fueron validados a partir de ecuaciones alométricas, más no mediante la contrastación con otras especies. La concordancia de nuestros resultados con los obtenidos por **Hillman** (1976) es indicio de la gran variabilidad del metabolismo dentro del mismo grupo de organismos debida a las fluctuaciones diarias de temperatura.

Davison (1955) encontró una relación logarítmica e inversa entre el $\dot{V}O_2$ y la masa corporal en anuros de varias familias, lo que indica que los ejemplares más pesados consumen menos oxígeno por unidad de peso y de tiempo. Los ejemplares de *D. molitor* tuvieron un peso promedio 3,7 veces menor al de sus contrapartes de tierras bajas. La regresión indica que el aumento en 3,7 veces en la masa corporal está acompañado de la disminución del 40 % en el $\dot{V}O_2$. A pesar de la corrección del metabolismo por la masa corporal, los valores de $\dot{V}O_2$ siguen siendo bastante disímiles. A pesar de que las ecuaciones de regresión realizadas por **Davison** (1955) incluyen datos de varias familias (Ranidae, Pipidae, Hylidae) con un amplio rango de masa corporal (1 a 350 g), la tendencia no necesariamente describe la relación de la masa corporal y el $\dot{V}O_2$ en *D. molitor*. A pesar de que las determinaciones de $\dot{V}O_2$ en el estudio de **de Andrade & Abe** (1997) se basan en la disminución registrada por sensor del contenido de oxígeno en un sistema cerrado, como en nuestro estudio, las diferencias en los valores no se pueden explicar a partir de las metodologías distintas sino de aspectos ambientales y ecológicos de las especies que pueden estar condicionando la expresión de los genes y productos proteicos involucrados en el metabolismo, lo cual no fue objeto de este estudio, pero que sin duda deben ser considerados en la interpretación del metabolismo aeróbico.

Los valores de $\dot{V}O_2$ en estadio adulto no evidencian que se haya alcanzado un límite de tolerancia térmica, lo cual concuerda con la determinación directa del máximo térmico crítico de 38 °C en *D. molitor* registrado por **Mahoney & Hutchison** (1969). A pesar de la tendencia del $\dot{V}O_2$ en estadios juveniles y adultos, la especie no se encuentra libre del riesgo del calentamiento global, ya que el $\dot{V}O_2$ es un proceso multifactorial, resultado de la función cardiorrespiratoria, del metabolismo muscular y de la actividad enzimática, entre otros. Por otro lado, las mediciones no incluyeron estadios de desarrollo como el de mórula o gástrula, debido a la dificultad de aislar en nuestro laboratorio los huevos de la capa gelatinosa que los envuelve y asegurar su funcionalidad. En resumen, los hallazgos del presente estudio no permiten establecer si la fragilidad de la respiración al elevarse la temperatura se manifiesta en etapas del desarrollo más tempranas que el estadio larval.

Limitaciones del estudio

El estudio se hizo en un límite de temperatura que supera el valor más alto registrado en Bogotá (24,9 °C, enero de 1995) por nuestro interés de medir la respuesta respiratoria en los límites térmicos ambientales y la tendencia al aumento en la temperatura como efectivamente sucedió (25,4 °C, enero de 2024) y porque consideramos que el estudio de variables fisiológicas aporta un criterio adicional a los modelos utilizados para predecir el tiempo de extinción de una especie con base en la tendencia de la temperatura y la deforestación. Sin embargo, los valores de temperatura podrían haber sido excesivos, de allí las señales de incomodidad de los animales durante la medición, las cuales podrían interpretarse como agotamiento del oxígeno en la cámara de medición.

Los ejemplares juveniles presentaron el valor de $\dot{V}O_2$ más elevado (aprox. 1,2 ml•g⁻¹•min⁻¹, caso aislado a 25 °C) (**Figura 3**). El volumen de la cámara de medición es de 250 ml, de los cuales el 21 %, o 52,5 ml, corresponde a O₂, lo que indica que a la tasa metabólica que se muestra en la **Figura 2B**, el O₂ se hubiera agotado completamente en 43 min. El mismo cálculo en el caso de las larvas involucra el coeficiente de solubilidad (α) del O₂ en agua (34 ml•L⁻¹) y su fracción porcentual en el aire atmosférico (0,21 %). Así, la cantidad de oxígeno disuelto por litro de agua sería 34 ml•L⁻¹ x 0,21 = 7,14 ml, y en una cámara de medición de 50 ml, sería de 0,36 ml. El valor más elevado de $\dot{V}O_2$ fue 0,007 ml•g⁻¹•min⁻¹ (caso aislado a 20 °C) (**Figura 2**), con lo que el oxígeno hubiera alcanzado para 51 min. En todos los estadios de desarrollo el tiempo de medición fue tan solo de 30 min. Si los niveles decrecientes de O₂ producen un comportamiento estereotipado, no fue posible establecerlo en nuestro estudio. Por otra parte, este comportamiento no ha sido documentado ampliamente; nuestra búsqueda bibliográfica produjo un solo resultado (**Meza-Parral et al.**, 2020). Los movimientos de incomodidad muy posiblemente fueron causados más por el cautiverio o por la temperatura que por el agotamiento del O₂. Para evitar la radiación directa y el sobrecalentamiento, los animales pueden buscar microambientes frescos de acuerdo con el estadio de desarrollo en que se encuentren. Sin embargo, las condiciones dentro de la cámara de medición pudieron haber resultado estresantes, lo que llevó a las señales de incomodidad registradas ocasionalmente.

El tamaño relativamente reducido de la muestra y el diseño estadístico sin réplicas pueden ser una debilidad del estudio, sin embargo, los valores de $\dot{V}O_2$ a temperaturas elevadas tuvieron diferencias estadísticas con aquellos registrados a temperatura ambiente, lo cual indica una clara tendencia.

Los ejemplares fueron producto del mismo cruce, es decir, tienen los mismos orígenes parentales, lo que puede suponer una variabilidad nula en la respuesta. Sin embargo, este no es el caso dada la recombinación de caracteres genéticos durante la meiosis, comprobada igualmente en anfibios (**Carroll**, 1996; **Rodríguez et al.**, 2018) y respaldada por la dispersión de los valores de $\dot{V}O_2$.

Conclusiones

El aumento de la temperatura ambiental tiene un efecto sobre el metabolismo de *D. molitor* dependiente del estadio de desarrollo. Las temperaturas superiores a los 23 °C redujeron la

tasa del metabolismo aeróbico en el estadio larval (31–40), lo que indica que es una fase particularmente vulnerable al aumento de la temperatura que también afecta los cuerpos de agua donde se desarrollan los individuos de esta especie (**Guarnizo *et al.*, 2014**). Los individuos juveniles y adultos se mostraron menos susceptibles: en los estadios juveniles (43–45) y en adultos el $\dot{V}O_2$ aumentó con la temperatura sin alcanzarse el límite de tolerancia térmica para este parámetro. A la luz de los resultados, cabe suponer que a largo plazo los efectos del calentamiento global sobre esta especie podrían incluir la disminución del reclutamiento terrestre, la reducción del crecimiento y la disminución de la energía disponible para la defensa contra patógenos ambientales contaminantes. El estudio de la temperatura sobre el metabolismo en los huevos puede establecer si la susceptibilidad térmica de la especie inicia en los estadios larvales o en fases tempranas del desarrollo como las de la mórula y la gastrulación.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia por aportar el laboratorio, los equipos y los implementos necesarios para el desarrollo del estudio.

Contribución de los autores

ECM: aportes a la idea y diseño del estudio, dirección de su ejecución y colaboración con el análisis de datos, redacción del artículo y revisión de su contenido. JPC: aportes al diseño del estudio, ejecución y análisis de datos, colaboración en la redacción del artículo y revisión de su contenido.

Conflicto de intereses

Los autores no presentan conflictos de intereses.

Referencias

- Alves-Ferreira, G., Talora, D.C., Solé, M., Cervantes-López, M.J., Heming, N.M.** (2022). Unraveling global impacts of climate change on amphibians distributions: A life-history and biogeographic-based approach. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.987237>.
- Angilletta, M.** (2009). *Thermal adaptations, a theoretical and empirical synthesis*. Oxford University Press Inc.
- Angilletta, M., Nierwirowski, P., Navas, C.A.** (2002). The evolution of thermal physiology in ectotherms. *Journal of Thermal Biology*, 27(4), 249-268. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(01\)00094-8](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(01)00094-8)
- Bernal, M.H., Solomon, K.R., Carrasquilla, G.** (2009). Toxicity of formulated Glyphosate (Glyphos) and Cosmo-Flux to larval juvenile Colombian frogs 2. Field and laboratory microcosm acute toxicity. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, 72, 966-973. <https://doi.org/10.1080/15287390902929717>
- Blem, C.R., Ragan C.A., Scott L.S.** (1986). The thermal physiology of two sympatric treefrogs *Hyla cinerea* and *Hyla chrysoscelis* (Anura: Hylidae). *Comparative Biochemistry & Physiology Part A*, 85A(3), 563- 570. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(86\)90447-0](https://doi.org/10.1016/0300-9629(86)90447-0)
- Brattstrom, B.H.** (1963). A preliminary review of the thermal requirements of amphibians. *Ecologica*, 44(2), 238-255. <https://doi.org/10.2307/1932171>
- Brown, D.D. & Cai, L.** (2007). Amphibian metamorphosis. *Developmental Biology*, 306, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2007.03.021>
- Broyles R. H.** (1981). Changes in the Blood during Amphibian Metamorphosis. In L. I. Gilbert & E. Frieden (Eds) *Metamorphosis: A problem in developmental biology*. Springer. USA.
- Catenazzi, A., Lehr, E., Vredenburg, V.T.** (2014). Thermal physiology, disease and amphibian declines on the Eastern slopes of the Andes. *Conservation Biology*, 28(2), 509-517. <https://doi.org/10.1111/cobi.12194>.
- Costanzo, J.P., Lee R. E., Wright M.F.** (1991). Effect of cooling rate on the survival of frozen wood frogs, *Rana sylvatica*. *Journal of Comparative Physiology B*, 161, 225-229. <https://doi.org/10.1007/BF00262302>

- Cupp, P.V.** (1980). Thermal tolerance of five salientian amphibians during development at metamorphosis. *Herpetologica*, 36(3), 234-244. <http://www.jstor.org/stable/3891820>
- de Andrade, D. V. & Abe, A. S.** (1997). Evaporative water loss and oxygen uptake in two casque-headed tree frogs, *Aparasphenodon brunoii* and *Corythomantis greeningi* (Anura, Hylidae). *Comparative Biochemistry & Physiology Part A*, 118(3), 685-689. [https://doi.org/10.1016/s0300-9629\(96\)00481-1](https://doi.org/10.1016/s0300-9629(96)00481-1).
- Donohoe P. H., West T., Boutillier R. G.** (1998). Respiratory, metabolic, and acid-base correlates of aerobic metabolic rate reduction in overwintering frogs. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 274, R704-R710.
- Galeano, S.P., Urbina, J.C., Gutiérrez-C, P.D.A., Rivera-C, M., Páez, V.** (2006). Los anfibios de Colombia, diversidad y estado del conocimiento. En: M.E. Chávez y M. (Santamaría Ed). *Informe Nacional sobre el avance en el conocimiento y la información de la biodiversidad 1998-2004*. (106-118). Instituto de Investigaciones Biológicas Alexander von Humboldt, Bogotá.
- Gahlenberck H. & Bartels H.** (1968). Temperaturadaptation der Sauerstoffaffinität des Blutes von *Rana esculenta* L. *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, 59, 232 -240.
- Gosner, K.L.** (1960). A simplified table for staging anuran embryos and larvae with notes on identification. *Herpetologica*, 16(3), 183-190. <http://www.jstor.org/stable/3890061>
- Guarnizo, C., Armesto, O., Acevedo, A.** (2014). *Dendropsophus labialis* (Peters, 1863). En V. Paez (Ed). *Catálogo de anfibios y reptiles de Colombia, Asociación Colombiana de Herpetología*, 2(2), 56-61.
- Gutiérrez-Pesquera, L.M.** (2015). *Una valoración macrofisiológica de la vulnerabilidad al calentamiento global: Análisis de los límites de tolerancia térmica en comunidades de anfibios en gradientes latitudinales y altitudinales*. Informe final Becas de postgrado para proyectos de investigación para cooperación al desarrollo, Gobierno de España. Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador. <https://www.researchgate.net/profile/Luis-Miguel-Gutierrez-Pesquera/publication/306240109>
- Hargreaves M. & Spriet L. L.** (2018). Exercise Metabolism: Fuels for the Fire. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 8, a029744.
- Hillman, S.S.** (1976). Cardiovascular correlates of maximal oxygen consumption rates in anuran amphibians. *Journal of Comparative Physiology*, 109(2), 199-207. <https://doi.org/10.1007/BF00689418>
- Jørgensen B.** (1988). Metabolic costs of growth and maintenance in the toad, *Bufo bufo*. *Journal of Experimental Biology*, 138, 319-331.
- Kern P., Crampa R.B., Franklin C.E.** (2015). Physiological responses of ectotherms to daily temperature variation. *Journal of Experimental Biology*, 218, 3068-3076.
- Lighton J. R. B.** (2008). *Measuring Metabolic Rates. A Manual for Scientists*. Oxford University Press Inc. New York.
- Mahoney, J.J. & Hutchinson, V.H.** (1969). Photoperiod acclimation and 24-hour variations in the critical thermal maxima of a tropical and temperate frog. *Oecologia*, 2, 143- 161. <https://doi.org/10.1007/BF00379157>
- McCutcheon, F.H.** (1936). Hemoglobin function during the life history of the bullfrog. *Journal Cellular Comparative Physiology*, 8, 63-81. <https://doi.org/10.1002/jcp.1030080107>
- Meza-Parral Y., García-Robledo C., Pineda E., Escobar F., Donnelly M.A.** (2020). Standardized ethograms and a device for assessing amphibian thermal responses in a warming world. *Journal of Thermal Biology*, 89, 102565. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102565>
- Meirelles N.C., Vieira M., Airoidi. L. Focesi A. Jr.** (1979). Some larval properties of *Pipa carvalhoi* adult hemoglobins. *Comparative Biochemistry & Physiology*, 62A, 859-862.
- Mueller C.A. & Seymour R.S.** (2011). The Regulation Index: A New Method for Assessing the Relationship between Oxygen Consumption and Environmental Oxygen. *Physiological and Biochemical Zoology*, 84(5), 522-532.
- Navas, C.A.** (1997). Thermal extremes at high elevation in the Andes: Physiological ecology of the frogs. *Journal of Thermal Biology*, 22(6), 467-477. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(97\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(97)00065-X)
- Navas, C.A., Úbeda, C.A., Logares, R., Jara, F.G.** (2010). Thermal tolerances in tadpoles of three species of Patagonian anurans. *South American Journal of Herpetology*, 5(2), 89 - 96. <https://doi.org/10.2994/057.005.0203>
- Nowakowsky, A.J., Watling, J.I., Whitfield, S.M., Todd, B.D., Kurz, D.J., Donnelly, M.A.** (2017). Tropical amphibians in shifting thermal landscapes under land-use and climate change. *Conservation Biology*, 31(1), 96-105. <https://doi.org/10.1111/cobi.12769>

- Paaijmans, K. P., Heinig, R. L., Seliga, R. A., Blanford, J. I., Blanford, S., Murdock, C. C., Thomas, M. B.** (2013). Temperature variation makes ectotherms more sensitive to climate change. *Global Change Biology*, 19(8), 2373-2380. <https://doi.org/10.1111/gcb.12240>
- Perotti, M., Bonino, M., Ferraro, D., Cruz, F.** (2018). How sensitive are temperate tadpoles to climate change? The use of thermal physiology and niche model tools to assess vulnerability. *Zoology*, 127, 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2018.01.002>
- Pinder A. & Burggren W.** (1983). Respiration during chronic hypoxia and hyperoxia in larval and adult bullfrogs. (*Rana catesbeiana*) II. Changes in respiratory properties of whole blood. *Journal of Experimental Biology*, 10, 205-213.
- Pounds, J.A., Bustamante, M.R., Coloma, L.A., Consuegra, J.A., Fogden, M., Foster, P.N., La Marca E., Masters K.L., Merino-Viteri A., Puschendorf R., Ron S.R., Sánchez-Azofeifa G.A., Still C.J., Young B.E.** (2006). Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, 439(7073), 161-167. <https://doi.org/10.1038/nature04246>
- Pu P., Zhao Y., Niu Z., Cao W., Zhang T., He J., Wang J., Tang X., Chen Q.** (2021). Comparison of hematological traits and oxygenation properties of hemoglobins from highland and lowland Asia. *Journal of Comparative Physiology B*, 191(6), 1019-1029.
- Rowe, C. L. & Crandall, E. A.** (2018). The acute thermal respiratory response is unique among species in a guild of larval anuran amphibians-Implications for energy economy in a warmer future. *Science of the Total Environment*, 618, 229-235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.332>
- Schulte P. M.** (2015). The effects of temperature on aerobic metabolism: towards a mechanistic understanding of the responses of ectotherms to a changing environment. *Journal of Experimental Biology*, 218(12), 1856-1866. <https://doi.org/10.1242/jeb.118851>
- Shelton, G., Jones, D.R., Milsom, W.K.** (2011). Control of breathing in ectothermic vertebrates. En: E. Terjung (Ed.). *Comprehensive Physiology* (pp.857-909). Oxford University Press Inc. New York. <https://doi.org/10.1002/cphy.cp030228>
- Somero G. N.** (1995). Proteins and temperature. *Annual Review of Physiology*, 57, 43-68. <https://doi.org/10.1146/annurev.ph.57.030195.000355>
- Storey K.B.** (2002). Life in the slow lane: molecular mechanisms of estivation. *Comparative Biochemistry & Physiology, Part A* 133, 733-754.
- Triana-Velásquez, T.M., Montes-Rojas, C.M., Bernal M.H.** (2013). Efectos letales y subletales del glifosato (ROUNDUP® Active) en embriones de anuros colombianos. *Acta Biológica Colombiana*, 18(2), 271-278.
- Weber R. E., Ostojic H., Fago A., Dewilde S., Van Hauewaert M-L, Moens L., Monge C.** (2002). Novel mechanism for high-altitude adaptation in hemoglobin of the Andean frog *Telmatobius peruvianus*. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 283, R1052-R1060.
- Whitfield, S. M., Bell, K. E., Philippi, T., Sasa, M., Bolaños, F., Chaves, G., Savage, J. M., Donnelly, M. A.** (2007). Amphibian and reptile declines over 35 years at La Selva, Costa Rica. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(20), 8352-8356. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611256104>
- Zhu, W., Zhang, M., Chang, L., Zhu, W., Li, C., Xie, F., Zhang, H., Zhao, T., Jiang, J.** (2019). Characterizing the composition, metabolism, and physiological functions of the fatty liver in *Rana omeimontis* tadpoles. *Frontiers in Zoology*, 16, 42. <https://doi.org/10.1186/s12983-019-0341-x>

Artículo original

Una nueva especie de *Ageratina* (subg. *Andinia*, Eupatorieae, Compositae) y novedades taxonómicas en *Ageratina gynoxoides* (Wedd.) R.M.King & H.Rob

A new species of *Ageratina* (subg. *Andinia*, Eupatorieae, Compositae), and taxonomic novelties in *Ageratina gynoxoides* (Wedd.) R.M.King & H.Rob

✉ José Aguilar-Cano^{1,*}, ✉ Fabio Andrés Ávila^{1,2}

¹Herbario JBB, Jardín Botánico de Bogotá "José Celestino Mutis", Bogotá D.C., Colombia

²The Graduate Center, City University of New York, New York, USA

Resumen

Se describen e ilustran dos novedades taxonómicas del género *Ageratina* Spach en la cordillera Oriental de Colombia. La primera es la propuesta de *Ageratina laurae* como una nueva especie restringida al suroccidente rural de las localidades de Ciudad Bolívar y Usme en Bogotá D.C. Durante el estudio de ejemplares de herbario, se encontró afinidad morfológica con la especie *Ageratina gynoxoides* (Wedd.) R.M.King & H.Rob., de la cual se diferencia principalmente por presentar hojas con superficie abaxial con indumento aracnoide-adpreso, marrón-leonado (*Vs.* indumento lanuginoso, ferruginoso), margen foliar revoluto (*Vs.* plano) y corolas blancas predominantemente glabras (*Vs.* rosadas densamente indumentadas). La segunda corresponde a la propuesta de dos variedades para *A. gynoxoides* sustentadas en su actual aislamiento geográfico y en caracteres como la densidad del indumento en la vena media de la lámina foliar y la densidad de glándulas en la corola.

Palabras clave: Asteraceae; Ciudad Bolívar; Flora de Bogotá; Usme.

Abstract

Two taxonomic novelties for the genus *Ageratina* Spach in the Colombian Eastern Cordillera are described and illustrated. First, *Ageratina laurae* is proposed as a new species restricted to the southwestern rural areas of Ciudad Bolívar and Usme's administrative localities. Studying herbarium specimens, we found the new taxon resembled *Ageratina gynoxoides* (Wedd.) R.M.King & H.Rob, although it differs mainly by having leaves with arachnoid adpressed indument in the abaxial surface (*vs.* lanuginous-ferruginous indument), revolute margin (*vs.* flattened), and white predominantly glabrous corollas (*vs.* pink with dense indument). Second, we propose two varieties for *A. gynoxoides* based on its current geographic isolation, the differentiated density of the indument in the mid vein of leaves, and the density of glands in the corollas.

Keywords: Asteraceae; Ciudad Bolívar; Flora of Bogotá; Usme.

Introducción

El género *Ageratina* Spach fue propuesto en 1841 (Spach, 1841) con base en tres especies de *Eupatorium* L. previamente publicadas por Linneo: *E. aromaticum* L., *E. ageratum* L. y *E. cordatum* L. Otros autores clásicos, como Humboldt, Bonpland, De Candolle y B.L. Robinson, incluyeron especies de *Ageratina* en el concepto amplio de *Eupatorium* propuesto por Linneo, integrando las especies actualmente circunscritas en *Ageratina*. Algunos estudios en el siglo XX propusieron el restablecimiento del género *Ageratina* separado de *Eupatorium* (King & Robinson, 1970), con un arreglo infragenérico inicial de cuatro subgéneros, principalmente basados en la anatomía floral: *Ageratina*,

Citación: Aguilar-Cano J & Ávila FA. Una nueva especie de *Ageratina* (Subg. *Andinia*, Eupatorieae, Compositae) y novedades taxonómicas en *Ageratina gynoxoides* (Wedd.) R.M.King & H.Rob. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):537-550, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2562>

Editor: Luz Esperanza Guerra González

***Correspondencia:**

José Aguilar-Cano;
jose.aguilarcano@gmail.com

Recibido: 12 de febrero de 2024

Aceptado: 31 de julio de 2024

Publicado en línea: 12 de agosto de 2024



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

Klattiella R.M. King & H. Rob., *Neogreenella* R.M. King & H. Rob. y *Pachythamnus* R.M. King & H. Rob. (= *Pachythamnus crassirameus* (B.L. Rob.) R.M. King & H. Rob.). Posteriormente, en la reorganización de la tribu Eupatorieae, **King & Robinson** (1978, 1987) circunscribieron *Ageratina* con 248 especies y adicionaron dos subgéneros: *Andinia* R.M. King & H. Rob. y *Apoda* R.M. King & H. Rob.

A pesar de que el género no se ha revisado en su totalidad, se registran 315 nombres válidamente publicados que representan especies distribuidas de Norteamérica hasta los Andes de Bolivia y Argentina, con la mayor concentración en la región neotropical (**POWO**, 2024). En Colombia se conocen 43 especies de *Ageratina* agrupadas en tres subgéneros: *Ageratina* subg. *Andinia* con 26 especies; *A. subg. Ageratina* con 16 especies, y *A. subg. Neogreenella* con una única especie, los dos primeros distribuidos en las tres cordilleras de los Andes y la Sierra Nevada de Santa Marta, y el último en la región del Pacífico (**Aguilar-Cano**, 2016). La mayor diversidad del subgénero *Andinia* se encuentra en la cordillera Oriental de Colombia y generalmente corresponde a especies de distribución restringida. En Bogotá, D.C. se han registrado cerca de 20 especies del género, principalmente del subgénero *Andinia*, siendo más frecuentes en las localidades de Sumapaz, Usme y Ciudad Bolívar (**JBB**, 2023).

En la revisión taxonómica de *Eupatorium* para Colombia, **Robinson** (1918) incluyó la mayoría de los miembros de *Ageratina* dentro de *Eupatorium* sección *Eximbricata*. No obstante, *E. gynoxoides* Wedd. fue incluida dentro de la sección *Subimbricata* junto con *E. popayanense* Hieron y *E. tinifolium* Kunth, todas actualmente reconocidas dentro del género de *Ageratina*. Hoy *Ageratina gynoxoides* se incluye dentro del subgénero *Andinia*, caracterizado por presentar especies arbustivas de hojas coriáceas generalmente aserradas, venación pinnada, involucro eximbricado a débilmente subimbricado, flósculos con la porción basal de la corola estrecha y glabra o con glándulas en su cara externa, lóbulos de la corola más cortos que la garganta y en su cara interna densamente papilosos, aquenios glandulosos, a veces cortamente setosos sobre las costillas (**King & Robinson**, 1978).

A partir del estudio de ejemplares depositados en el herbario JBB y como resultado de la investigación titulada “Tratamiento taxonómico de *Ageratina* subgen. *Andinia* (Asteraceae) para la flora de Bogotá” en el marco del programa Flora de Bogotá (**Fajardo-Gutiérrez & Aguirre**, 2020), se identificaron poblaciones morfológicamente atípicas de un arbusto del subgénero *Andinia*, que erróneamente se habían identificado como *A. gynoxoides*. Aquí estos ejemplares se proponen como una nueva especie. Con base en la similitud morfológica de *A. gynoxoides* con la nueva especie que se describe, se analizaron especímenes adicionales que permitieron proponer nuevas categorías infraespecíficas para *A. gynoxoides*.

Materiales y métodos

Diferenciación morfológica

Se hizo una revisión crítica de ejemplares tipo y de colecciones de referencia de *Ageratina* depositados en los herbarios COL, JBB, UDBC, US y NY (**Thiers**, 2023), así como de imágenes de alta resolución de ejemplares tipo de todas las especies del subgénero *Andinia* disponibles en JSTOR Global Plants (<http://plants.jstor.org>) (**Ryan**, 2018). Asimismo, se llevaron a cabo exploraciones mensuales durante el 2022 en diferentes sectores del Parque Nacional Natural Sumapaz para corroborar la presencia del nuevo taxón en las localidades conocidas y hallar nuevas poblaciones. Los ejemplares tipo y de referencia, recolectados con el permiso marco de recolección de especímenes 0791 de 2014 emitido por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) se depositaron en los herbarios JBB, COL y K.

Para identificar los caracteres morfológicos diagnósticos de cada taxón y establecer las diferencias con las demás especies del subgénero, los caracteres morfológicos vegetativos y reproductivos se estudiaron tanto directamente *in vivo* como en ejemplares herborizados. Se registraron sus estados cualitativos y valores cuantitativos de acuerdo con los criterios morfológicos establecidos por **King & Robinson** (1978, 1987), **Font** (1993) y **Grossi**

et al. (2020). Los caracteres cuantitativos se midieron directamente con un calibrador de 0,002 cm de precisión de marca Mitutoyo (Serie 500, Neuss, Alemania) y utilizando microfotografías calibradas mediante el programa ImageJ v.8.1.1 (**Schneider et al.**, 2012).

Los nuevos taxones se reconocieron mediante una combinación única de caracteres morfológicos (**Donoghue**, 1985) y a través de comparaciones con ejemplares que representan especies y poblaciones morfológicamente similares. Además, se revisaron protólogos (**Weddell**, 1855) y tratamientos taxonómicos (**Robinson**, 1918; **King & Robinson**, 1978; **King & Robinson**, 1987). Con base en la información sobre localidades recopilada de las colecciones de herbario y la registrada en campo, se elaboraron los mapas de distribución de los nuevos taxones y sus respectivas afinidades morfológicas.

Área de estudio

Nuestro estudio se desarrolló en el norte de la cordillera Oriental de Colombia, específicamente en el Distrito Capital de Bogotá y sus alrededores (páramo de Sumapaz y Chingaza), así como en el departamento de Boyacá (páramo de Iguaque y La Rusia), en un gradiente de elevación de 2.800 a 4.310 m (**Figura 1**). Dentro del área de estudio se encuentran tres



Figura 1. *Ageratina laurae*. **A.** Rama florífera. **B.** Detalle de la superficie adaxial de la lámina foliar. **C.** Detalle del margen de la lámina foliar. **D.** Detalle de la superficie abaxial de la lámina foliar con el indumento aracnoide-adpreso y glándulas refringentes. **E.** Detalle de la superficie adaxial de la lámina foliar con glándulas incrustadas. **F.** Capítulo. **G.** Filaria externa vista por la cara abaxial. **H.** Filaria intermedia vista por la cara abaxial. **J.** Filaria interna vista por la cara abaxial. **K.** Flósculo. **L.** Corola glabrescente. **M.** Corola con tricomas. **N.** Cípsela. **P.** Antera. **Q.** Pistilo. Ilustrado por Omar Bernal

áreas protegidas: una en el Parque Nacional Natural Sumapaz (PNN Sumapaz), otra en el Parque Nacional Natural Chingaza (PNN Chingaza), y la tercera en el Santuario de Flora y Fauna (SFF) de Iguaque.

Resultados

1. *Ageratina laurae* sp. nov. Aguilar-Cano & F. Ávila

TYPUS: Colombia. Bogotá D.C.: localidad de Usme, vereda Chisacá, margen derecha sobre la vía PNN Sumapaz, 3,8 km delante de la laguna Los Tunjos, 3.609 m, 4,320061, -74,206215, 8 jun 2022, *J. Aguilar-Cano, F. Ávila* 7232 (holotypus JBB-38891; isotypus JBB-41377, COL, K). **Figuras 1 y 2.**

Diagnosis: the combination of the crustaceous leaf blade with apiculate apex and 3-whorled involucre with phyllaries gradually larger inwards resembles *Ageratina gynoxoides*, but the new species differs in having revolute leaves (vs. flattened),

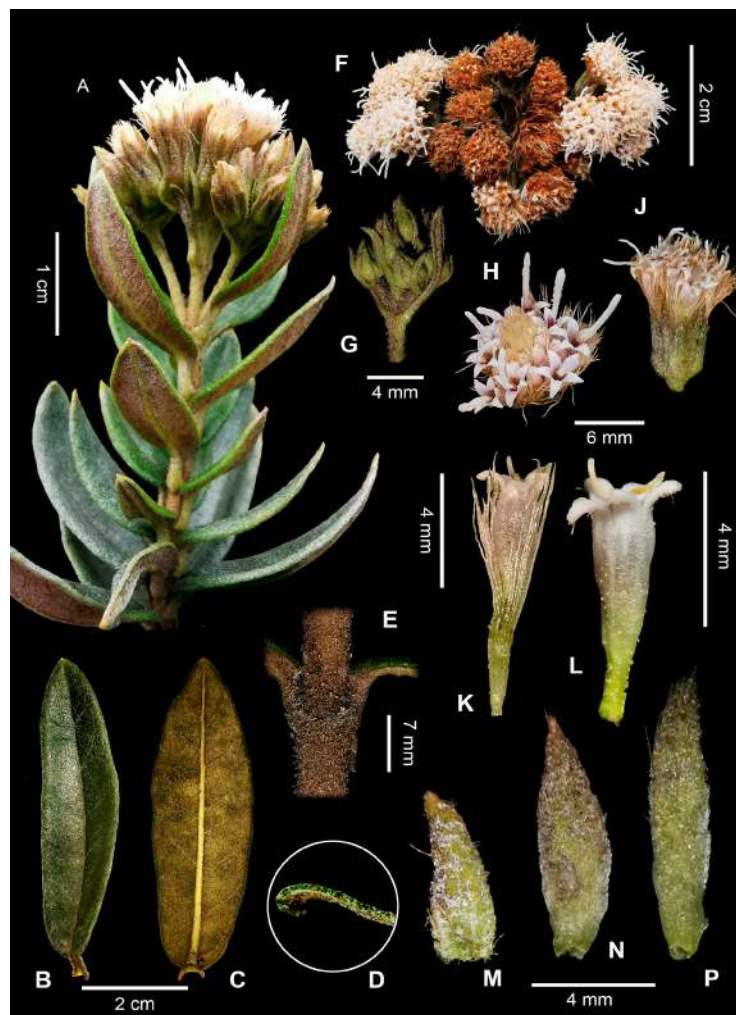


Figura 2. Imágenes de campo de *J. Aguilar-Cano, F. Ávila* 7232 (holotypus JBB-38891) *Ageratina laurae*. **A.** Rama florífera. **B.** Hoja vista por la superficie adaxial. **C.** Hoja vista por la superficie abaxial. **D.** Detalle del margen de la lámina foliar. **E.** Detalle del nodo del tallo. **F.** Sinflorescencia vista desde arriba. **G.** Paracladio de la sinflorescencia inmadura. **H.** Capítulo visto desde arriba. **J.** Capítulo vista lateral. **K.** Flósculo. **L.** Corola. **M.** Filaria externa vista por la cara abaxial. **N.** Filaria intermedia vista por la cara abaxial. **P.** Filaria interna vista por la cara abaxial. Fotografías por J. Aguilar-Cano. Lámina elaborada por Daniel Amaya

abaxial leaf surface with tawny arachnoid indumentum (vs. densely ferruginous wool indumentum); thyrses corymbiform synflorescences with hirtellous branches (vs. dense corymb synflorescences with densely ferruginous woolled branches), corollas white (vs. corollas pink or pinkish), and corolla lobes and throat glabrous, sometimes with scattered simple, short, erect, multicellular uniseriate trichomes (vs. corolla lobes and throat densely pilose towards the apex with simple, long curled, multicellular uniseriate trichomes).

Arbusto de hasta 2 m de altura. **Ramas** teretes, sulcadas, ramificadas hacia el ápice donde se forman las ramas floríferas, glabrescentes proximalmente, hirsutas hacia el ápice, con tricomas multicelulares uniseriados, oscuras; **internodos** de 1,5–3,5 cm de largo. **Hojas** opuestas decusadas, simples, las mediales generalmente de mayor tamaño que las proximales y distales, ascendentes hacia la sinflorescencia, cortamente pecioladas, **pecíolos** de 2,5–5,0 mm de largo, dilatados y unidos por sus bases, ligeramente incurvados, hirsutos en hojas jóvenes, glabrescentes al madurar; **lámina** subconduplicada, lanceolada, las distales elíptico-lanceoladas; 25–65 × 6–20 mm; **base** obtusa, crustácea, discolora, superficie adaxial verde oliva, escasamente glandulosa y glabrescente hacia la vena media, tricomas multicelulares uniseriados; superficie abaxial con indumento aracnoide-adpreso, marrón-leonado; **vena** media impresa y pilosúscula, a veces glabra adaxialmente, prominente, glabra y verde abaxialmente; **venación secundaria** pinnada, casi imperceptible adaxialmente, prominente y pilosa abaxialmente, 8–10 venas por lado que divergen en ángulo ascendente de 35° a 40°, **venación terciaria** finamente reticulada que forma pequeñas areolas irregulares con glándulas incrustadas espaciadamente hacia la margen por la superficie adaxial, impresa con glándulas refringentes amarillentas por la superficie abaxial; margen entera y revoluta; ápice agudo, apiculado. **Sinflorescencias** de 4,0–4,5 cm de largo, terminales y subterminales, formadas por capítulos dispuestos en tirso corimbiformes, con 11 a 21 capítulos, **pedúnculo** y eje principal hirsútulos a glabrescentes, tricomas multicelulares uniseriados, pedúnculo principal con un par de brácteas foliáceas dispuestas en el punto de ramificación, oblongo-lanceoladas, 2,5–3,0 × 0,5–0,7 cm, **pecíolo** de 0,5 mm de largo, **pedúnculos** laterales generalmente con 5 capítulos, dos laterales y tres terminales, los laterales con pedicelos de 1,5–4,5 mm de largo, subtendidos por bractéolas espatuladas, 13–20 × 1,0–2,2 mm, situadas hasta 1 mm por debajo del capítulo, largamente decurrentes a pseudopeciolas, los capítulos terminales sésiles a subsésiles, cada uno subtendido por una bractéola subinvolucral, linear, de 4,7–6,2 × 0,7–0,9 mm, situada ca. 0,2–0,4 mm por debajo del capítulo, ápice reflejo o recto. **Capítulos** de 9,7–11,4 × 3,7–4,3 mm; involucreo sub-campanulado, cerca de la mitad de la longitud de los flósculos; receptáculo de 2,2 × 2,2 mm, ligeramente convexo, glabro; **filarias** 16–18 por capítulo, dispuestas en tres series, subimbricadas y gradualmente mayores hacia el interior; filarias externas ovadas, de 5,1–5,6 × 1,5–2,0 mm, persistentes, cartáceas, superficie abaxial pubérula a glabriúscula, margen escariosa, ápice agudo; filarias intermedias oblonga-lanceoladas, de 5,8–6,4 × 1,2–1,5 mm, persistentes, herbáceas, superficie abaxial pubérula a glabriúscula, margen escarioso y piloso, ápice agudo-ciliado; filarias internas lineares-lanceoladas, de 6,4–6,7 × 0,7 × 1,0 mm, paleáceas y deciduas en capítulos maduros, superficie abaxial glabriúscula a completamente glabra, margen ciliado, subescarioso, ápice agudo-ciliado; todas con venación hifodroma y superficie adaxial glabra. **Flósculos** (23), 30–32 por capítulo, hermafroditas, fértiles; **corola** en anthesis blanco crema, 6,1–6,5 mm longitud, infundibuliforme; **tubo** de 2,0–2,2 mm de largo, con glándulas cortamente pediculadas en la cara externa y escasos tricomas cortos, rectos, multicelulares uniseriados, de 0,2–0,7 mm de largo, garganta de 2,9–3,2 mm de largo, glabra por ambas caras; **lóbulos** de 1,2–1,4 × 0,4–0,5 mm, triangulares, ápice agudo, internamente papilosos hacia el ápice, externamente glabros, a veces algunos lóbulos presentan escasos tricomas cortos, rectos, multicelulares uniseriados, de ca. 0,5 mm de largo y glándulas sésiles esparcidas. **Anteras** de 1,8–2,0 mm de largo, apéndice apical ovado, de 0,3 × 0,2 mm, base de la teca sagitada, aurículas cortamente agudas; conectivo de 1,2–1,4 mm de largo, collar oblongo, 0,4 × 0,1 mm, células del collar subcuadradas proximalmente, oblongas distalmente, células del tejido endotecial subcuadradas, porción libre de los filamentos 1,1 mm de largo, glabros. **Pistilo** de 6,5–7,8 mm de largo, base del

estilo engrosada y glabra, ramas estigmáticas filiformes, de 2,6–3,0 mm de largo, cor-tamente papilosas en toda su extensión. **Cipselas** obcónicas de $2,8 \times 0,6$ mm, con cinco costillas, costillas pilosas, tricomas simples, unicelulares, espacios intercostales glabros, base asimétrica, **carpopodio** simétrico-anular, **papo** de cerdas escábridas-barbeladas, desiguales, de 3,5–5,9 mm de largo, más cortas que la corola.

Especímenes adicionales examinados: Colombia. **Bogotá D.C.: localidad de Ciudad Bolívar:** vereda Las Mercedes, borde de carretera, vía al páramo de la Lechuza, 3.450 m, 4,388092, -74,195372, 17 jul 2013, *F. Fajardo 1566* (JBB-09779); vereda Pasquilla, microcuenca Pasquillita, páramo de la Lechuza, 3.469 m, 4,421194, 74,180528, 28 abr 2014, *F. Fajardo 1690* (JBB-15295). **Localidad de Usme:** microcuenca río Chisacá, 3.603 m, 4,323408, -74,206667, 7 nov 2014, *L. Pinzón 151* (JBB-12113); vereda Chisacá, cerca de la laguna de los Tunjos, 3.700 m, 4,289978, -74,205342, 10 nov 2014, *F. Fajardo 1941* (JBB-19629); margen derecha sobre la vía del Parque Nacional Natural Sumapaz, 3,8 km adelante de la laguna Los Tunjos, 3.609 m, 4,320061, -74,206215, 8 jun 2022, *J. Aguilar-Cano & F. Ávila 7233* (JBB-38892); *J. Aguilar-Cano & F. Ávila 7234* (JBB-38893); *J. Aguilar-Cano & F. Ávila 7235* (JBB-38894, K); *J. Aguilar-Cano, F. Ávila 7236* (JBB-38895, COL); 4,320083, -74,206250, 3.609 m, 2 nov 2022, *J. Aguilar-Cano, J. Bernal 7359* (JBB-38896, K, COL).

Etimología: la nueva especie está dedicada a Laura Pachón Ferreira, esposa del primer autor del artículo, en reconocimiento por su invaluable apoyo y comprensión.

Afinidad: *Ageratina laurae* es un miembro del subgénero *Andinia* y se asemeja a las especies colombianas *A. gynoxoides* y *A. josephensis*. Dentro del subgénero, las tres especies se caracterizan morfológicamente por la lámina foliar crustácea con la margen entera. La nueva especie se separa **claramente** de *A. gynoxoides*, entre otras características (**Tabla 1**), por presentar la lámina foliar revoluta (**Figuras 1C y 2D**) con la superficie abaxial cubierta por indumento aracnoide-adpreso marrón-leonado (**Figura 2A y C**) (*Vs.* lámina foliar plana con la superficie abaxial densamente cubierta por indumento lanoso-ferruginoso) (**Figuras 4C y 6A**), y el color blanco crema de las corolas (**Figura 2L**), generalmente glabras o con tricomas cortos-rectos (**Figura 1L y 1M**) en contraste con las corolas rosadas (**Figuras 4E y 6E**) cubiertas por tricomas largos rizados de *A. gynoxoides* (**Figura 5J y 5K**).

Ageratina josephensis es una especie restringida al páramo de Fontibón en el departamento de Norte de Santander. Esta especie junto con *A. laurae* son las únicas especies del subgen. *Andinia* con la margen foliar revoluta. Sin embargo, la nueva especie difiere de *A. josephensis* por la forma de la lámina foliar, el número de series del involucre (filarias dispuestas en 3 series *vs.* filarias dispuestas en 6 series), así como el color de la corola (blanco crema *vs.* carmín) (**Tabla 1**).

Hábitat y distribución: hasta el momento, *Ageratina laurae* se conoce únicamente en dos localidades, aisladas pero muy cercanas entre sí, al norte del área de amortiguación del Parque Nacional Natural Sumapaz, en zonas rurales de las localidades de Ciudad Bolívar y Usme de Bogotá D.C. (**Figura 3**). Allí sus poblaciones crecen en un patrón de distribución agregada como parte de la cobertura de vegetación correspondiente al herbazal y arbustal abierto de páramo con un bajo grado de transformación (<https://www.ideca.gov.co>), y llegan a formar densos matorrales junto con *A. tinifolia* (Kunth) R.M. King & H. Rob., *Espeletia grandiflora* Bonpl., *Monticalia abietina* (Willd. ex Wedd.) C. Jeffrey y *Miconia salicifolia* Naudin.

2. *Ageratina gynoxoides* (Wedd.) R.M. King & H. Rob. var. *gynoxoides* (Figuras 3,4 y 5C,K).

Eupatorium gynoxoides Wedd., Chlor. Andina 1(7): 216. 1857. TYPUS: “Hab. Nouvelle-Grenade: lieux froids de la province de Bogota” J. Goudot 18 (holotypus: P-00742419!).

Diagnosis (Chloris Andina 1(7): 216. 1857): “Branches thick, rusty-tomentose; leaves petiolate, entire, oblong-lanceolate, long, puberulent-tomentellous and at length glabrate and shining above, covered beneath with a thick coating of rusty wool and inconspicuously reticulated; heads disposed in a dense corymb; scales of the campanulate involucre about 15, in about 3 ranks, linear, sharp-pointed”.

Tabla 1. Tabla comparativa de caracteres morfológicos de *Ageratina laurae* y taxones afines

Carácter	Especies				
	<i>Ageratina laurae</i>	<i>Ageratina gynoxoides</i> var. <i>gynoxoides</i>	<i>Ageratina gynoxoides</i> var. <i>iguazuensis</i>	<i>Ageratina josephensis</i>	
Distribución	BOGOTÁ D.C.	BOGOTÁ D.C., CUN	BOY, SAN	NSA	
Elevación (m)	3450–3700	2900–4306	2800–3930	2600–2750	
Hábitat	Páramo con arbustal-frailejonal	Zona de transición bosque-páramo, páramo con arbustal frailejonal	Páramo con arbustal-frailejonal	Páramo	
Hojas: tamaño de la lámina (largo × ancho, mm)	25–65 × 6–20	23–53 × 8–25	20–40 × 8–21	42–64 × 8–13	
Hojas: forma de la lámina	Oblongo-lanceolada	Elíptica, ovada-elíptica, angosto-elíptica, ovada	Elíptica, angosta-elíptica	Angosto-elíptica	
Hojas: forma base de la lámina	Redondeada	Obtusa, a veces subcordada	Aguda	Aguda	
Hojas: margen de lámina	<i>Entera y revoluta</i>	Plana	Plana	Entera y revoluta	
Hojas: indumento de la lámina	Superficie adaxial	Escasamente glandulosa y glabrescente hacia la vena media	Glabra	Glabra	Glándulas refringentes y pubérulas que se tornan más densas sobre las venas
	Superficie abaxial	<i>Indumento aracnoide, adpreso, marrón-leonado y glándulas refringentes, amarillentas</i>	Densamente lanoso ferruginoso, eglanulosa	Eensamente lanoso ferruginoso, eglanulosa	Densamente lanoso, eglanulosa
Hojas: indumento de la vena media	Superficie adaxial	Pilosúsculo, a veces glabro			
	Superficie abaxial	Glabra	Completamente cubierta por el indumento de la lámina	<i>Parcialmente cubierta por el indumento de la lámina</i>	Glabra
Sinflorescencia	Tipo	Tirsos corimbiformes	Corimbos densos	Corimbos densos	Tirsos corimbiformes
	Indumento	Hirsútulo a glabrescentes	Tomentoso ferruginoso	Tomentoso ferruginoso	Puberulento
	Capítulos #	11–21	6–16	6–11	5–11
Involucro: número de series	3	3	3	6	
Filarias: número total	16–18	13–25	14–20	24	
Filarias: tipo de indumento (superficie abaxial)	Pubérulas a grabriúsculas	Tomentoso ferruginoso	Tomentoso ferruginoso	Glandulosas	
Flósculos: número #	30–32	25–32	12–30	ca. 13	
Flósculos: tipo de indumento (superficie abaxial)	Lóbulos de la corola	<i>Glabros, a veces escasamente hirsútulo-glandulosos</i>	Pilosos y escasamente glandulosos	<i>Pilosos y densamente glandulosos</i>	Puberulentos
	Garganta de la corola	<i>Glabros, a veces escasamente hirsútulo-glanduloso</i>	Pilosa	Pilosa	Pilósula
	Tubo de la corola	<i>Glanduloso- hirsutulo</i>	glanduloso	glanduloso	glabro
Flósculos: tipo de tricomas (superficie abaxial)	Lóbulos de la corola	<i>Cuando están presentes, cortos y rectos, multicelulares uniseriados</i>	Largos y curvados, multicelulares uniseriados	Largos y curvados, multicelulares uniseriados	Cortos y rectos, unicelulares
	Garganta de la corola	<i>Cuando están presentes cortos y rectos, multicelulares uniseriados</i>	Largos y curvados, multicelulares uniseriados	Largos y curvados, multicelulares uniseriados	Cortos y rectos, unicelulares
	Tubo de la corola	<i>Cuando están presentes, cortos y rectos, multicelulares uniseriados</i>	N/A	N/A	N/A
Flósculos: tipo de glándula (superficie abaxial)	Lóbulo de la corola	Glándulas sésiles	Glándulas sésiles	Glándulas sésiles	N/A
	Garganta de la corola	Glándulas sésiles	N/A	N/A	N/A
	Tubo de la corola	Glándulas pediculadas	Glándulas pediculadas	Glándulas pediculadas	N/A
Flósculos: color de la corola	Blanca	Rosada	Rosada	Carmín	

N/A: no aplica la información en este campo. Caracteres diagnósticos de los nuevos taxones en negrilla y cursiva

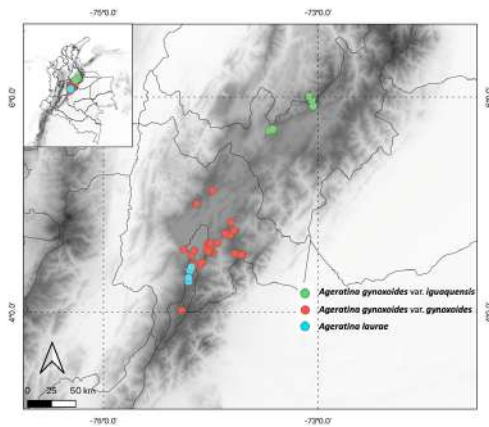


Figura 3. Distribución geográfica de *Ageratina laurae* y taxones afines



Figura 4. Imágenes de campo de J. Aguilar-Cano, 7226 (JBB-37594) *Ageratina gynoxoides* var. *gynoxoides*. **A.** Rama vegetativa (izquierda) y florífera (derecha). **B.** Hojas vistas por la superficie adaxial. **C.** Hoja proximal vista por la superficie abaxial. **D.** Hoja distal vista por la superficie abaxial. **E.** Capítulo inmaduro vista desde arriba. **F.** Capítulos inmaduros vista lateral. **G.** Corola. Flecha abierta en **C** y **D** indica vena media completamente cubierta por el indumento de la lámina foliar. Fotografías por J. Aguilar-Cano. Lámina elaborada por J.J. Aguilar-Pachón y Daniel Amaya

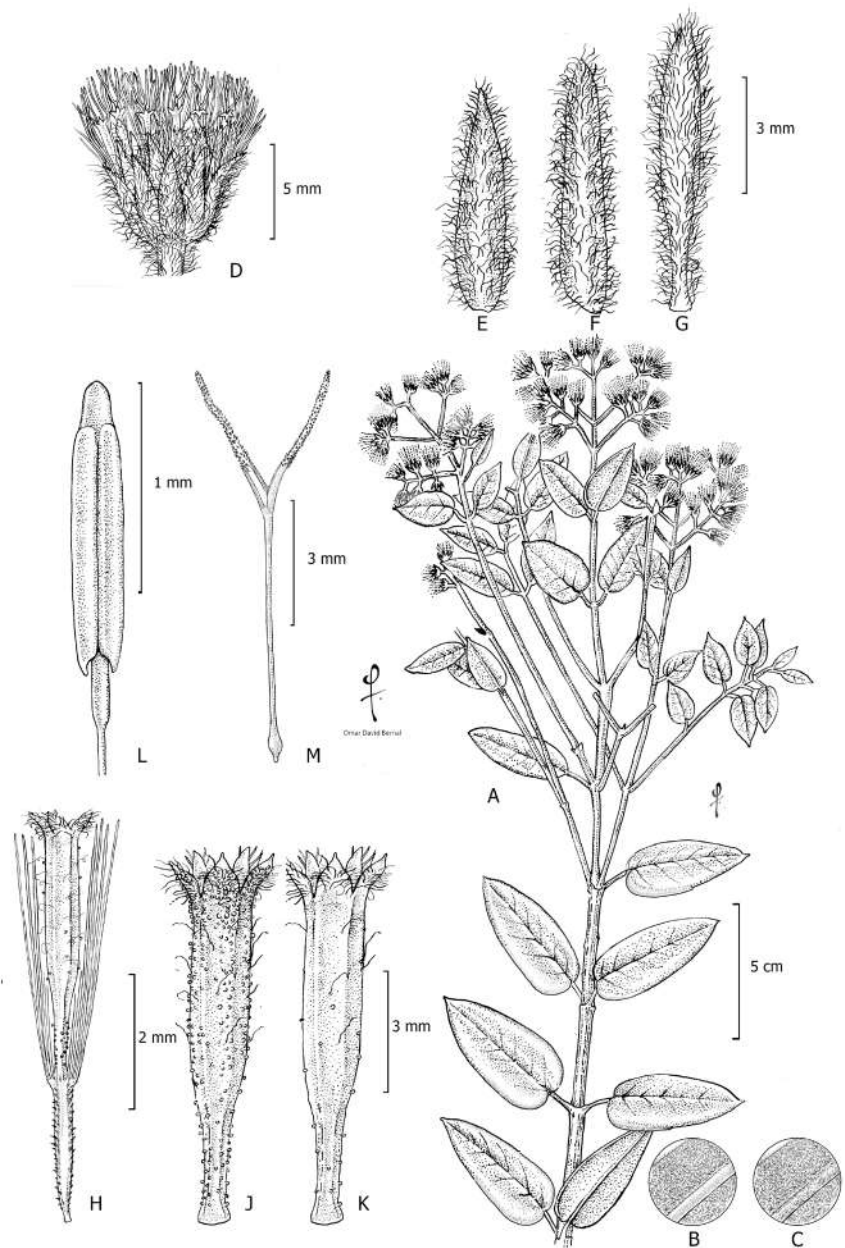


Figura 5. *Ageratina gynoxoides* var. *iguaquensis*. **A.** Rama florífera. **B.** Detalle superficie abaxial de la lámina foliar que muestra la vena media desnuda. **C.** Detalle superficie abaxial de la lámina foliar que muestra vena media completamente cubierta por indumento lanoso en *Ageratina gynoxoides* var. *gynoxoides*. **D.** Capítulo. **E.** Filaria externa vista por la cara abaxial. **F.** Filaria intermedia vista por la cara abaxial. **G.** Filaria interna vista por la cara abaxial. **H.** Flósculo. **J.** Corola con superficie externa densamente glandulosa. **K.** Corola con superficie externa escasamente glandulosa en *Ageratina gynoxoides* var. *gynoxoides* L. Estambre. **M.** Pistilo. Ilustrado por Omar Bernal

Comentarios: *Ageratina gynoxoides* se distingue morfológicamente dentro del género *Ageratina* por ser la única especie que exhibe una lámina foliar con margen entero y una superficie abaxial densamente cubierta por un indumento lanoso-ferruginoso. La nueva variedad que aquí se propone, se ajusta al concepto morfológico original de *A. gynoxoides*., pero exhibe diferencias distintivas (densidad del indumento en la vena media de la lámina foliar por su cara abaxial y variación en la densidad de glándulas en

superficie externa de las corolas) que no alcanzan el grado de diferenciación observado en otras especies relacionadas dentro de *Ageratina*. Además, las poblaciones de la nueva variedad se encuentran geográficamente separadas de las de la variedad típica, lo cual, a su vez, sugiere un flujo genético limitado por barreras geográficas que dan lugar a un patrón de distribución discontinua de la variación morfológica restringida a un área geográfica específica. Por lo tanto, consideramos necesario reconocer y documentar taxonómicamente este conjunto de poblaciones como un taxón infraespecífico distinto del concepto morfológico típico de *A gynoxoides*.

Especímenes representativos: Colombia. Bogotá D.C.: Localidad de Ciudad Bolívar: encenillales de Pasquilla, 3.551 m, 4,410083, -74,187556, 28 sep 2015, *L. Pérez et al.* 120 (JBB-11698); microcuena del río Tunjuelito, 3.495 m, 4,430333, -74,179556, 21 may 2015, *D. Cabrera* 3269 (JBB-14307; JBB-11007); páramo de Pasquilla, 3.256 m, 4,402633, -74,168342, 14 nov 2013, *C. Vargas* 2739 (JBB-08628); vereda Pasquilla, páramo de Sumapaz, 3.406 m, 4,438853, -74,175863, 11 may 2022, *J. Aguilar-Cano* 7225 (JBB-37593); 3.240 m, 4,4307222, -74,1752500, 15 sep 2014, *S. Castañeda* 81B (JBB-14582); vereda Quiba Alto, área rural de Ciudad Bolívar, 3.220 m, [4,533117, -74,177647], 1 abr 2014, *J. Navarro* 209 (JBB-4845, UDBC-18242). **Localidad de Santafé:** páramo de Choachí, near to Bogotá, 3200-3400 m, [4,566215, -74,014183], 27 sep 1917, *F. Pennell* 2268 (US-1042215; NY); páramo de Cruz Verde; along the road from Bogotá to Choachí, km 20, 3.340 m, [4,566215, -74,014183], 1 ene 1976, *J. Grabandt* 136 (COL-160448); páramo de Cruz Verde vía Bogotá-Choachí, 3.300 m, 4.565000,-74.020833, 9 jul 2014, *J. Valencia* 2164 (JBB-3308; UDBC-40120); vereda Hoya Teusaca, páramo de Cruz Verde, carretera Bogotá-Choachí, km 16, 3.360 m, [4,566215, -74,014183], 14 abr 1972, *A. Cleef* 2964 (COL-244438; US-2729043); vereda Parque Nacional Oriental, región de Monserrate, El Granizo, 3.200 m, [4.602676, -74.054634], 20 feb 1980, *S. Zuluaga* 36 (COL-234316); vereda Verjón alto, microcuena Teusacá, 3.404 m, 4,584139, -74,010028, 27 feb 2017, *D. Cabrera* 4197 (JBB-19411). **Localidad de Usme:** vereda Olarte, Los Soches, 3.251 m, 4,451703, -74,089583, 17 oct 2019, *F. Fajardo* 6040 (JBB-27245); 3.010 m, [4,442016, -74,132625], jun-ago 2010, *L. Trujillo* 297 (JBB-7504, UDBC-26789). **Cundinamarca:** municipio de **Chipaque:** vereda Quente, Boquerón de Chipaque, 3.250 m, [4,464379, -74,076476], 18 dic 1948, *M. Schneider* 703 (COL-68320). Municipio de **Choachí:** límite entre Bogotá y Choachí, colecciones en áreas de páramo y subpáramo, sobre el antiguo camino real del llano hacia Bogotá, 3.406 m, 4,557417, -73,979917, 9 jul 2014, *C. Vargas* 2387 (JBB-9087); Parque Ecológico Matarredonda, región norte del páramo de Sumapaz, 3356 m, 4,547250, -74,003000, 28 sep 2014, *C. Garnica* 194 (UDBC-36339); vereda San Francisco, páramo de San Francisco, cerca de la estación meteorológica La Bolsa, 3.362 m, 4,641111, -74,003333, 30 jul 2015, *S. Castañeda* 572 (JBB-13929). Municipio de **Cogua:** vereda Quebrada Honda, páramo entre Cogua y San Cayetano, cordillera central de la Laguna Seca, 1.5 km SW., 3.739 m, [5.133930, -73.983405], 17 nov 1972, *A. Cleef* 6525 (COL-218486, US-2796169, NY). Municipio de **Fómeque:** fondo del valle del río de la Playa, [3.168 m, 4,548010, -73,777023], 5 mar 2001, *P. Pedraza* 937 (COL-468198, COL-468199); PNN Chingaza, ladera oriental de la laguna de Chingaza, 3.150 m, [4,532642, -73,714394], 10 dic 1981, *P. Franco* 877 (COL-232458). Municipio de **Guasca:** páramo de Guasca, 2900-3200 m, [4.841187,-73.811527], 27 nov 1998, *D. Méndez s.n.* (COL-422103); vereda Trinidad, páramo de Chingaza, Piedras Gordas, 3.325 m, [4.735614, -73.846282], 26 feb 2000, *A. Díaz* 652 (COL-510808). Municipio de **La Calera,** vereda El Rodeo, macizo de Bogotá, páramo de Palacio, hacienda La Siberia, 3.200-3260 m, [4.709037, -73.947217], 8 dic 1959, *J. Cuatrecasas* 25542 (COL-85769, US-2342093, NY); vereda Jerusalén, Tierraleja, 3.420 m, [4,645506, -73,934044], 23 nov 2014, *F. Henao-Díaz* 297 (JBB-29903). Municipio de **Soacha:** [4.582063, -74.219667, 2564m], *Goitia, D. s.n.* (UDBC-2131). Municipio de **Subachoque:** cerros al noroccidente de la Pradera, en matorral paramuno, 3.250 m, [5,008288, -74,132734], 4 nov 2002, *M. Hernández* 1008 (COL-495189).

3. *Ageratina gynoxoides* var. *iguazuensis* var. nov. Aguilar-Cano & F. Ávila. (Figuras 3, 5 y 6).

TYPUS: COLOMBIA. Boyacá, Vereda El Cerro, Santuario de Flora y Fauna de Iguaque, laguna La Empedrada, 3.667 m, 5,703325, -73,422464, 12 dic 2021 (fl), J. Aguilar-Cano, A. Simbaqueba JAC-7105 (holotypus JBB-38897; isotypus COL, K).

Diagnosis: leaf blade with denudate midrib abaxially, corolla lobes, and throat densely glandulose.

Etimología: el epíteto hace alusión al nombre del Santuario de Flora y Fauna de Iguaque. En esta área protegida se recolectó el ejemplar tipo y crecen las poblaciones más septentrionales conocidas de *A. gynoxoides*.

Afinidad: la nueva variedad se diferencia de la variedad típica por los lóbulos de la garganta y tubo de la corola densamente glandulosas (Vs. escasamente glandulosa) y la vena media por la cara abaxial parcialmente cubierta por el indumento de la lámina foliar (Vs. completamente cubierta por indumento lanoso, ferruginoso). Además, los tallos de la nueva variedad presentan indumento menos denso que la variedad típica.

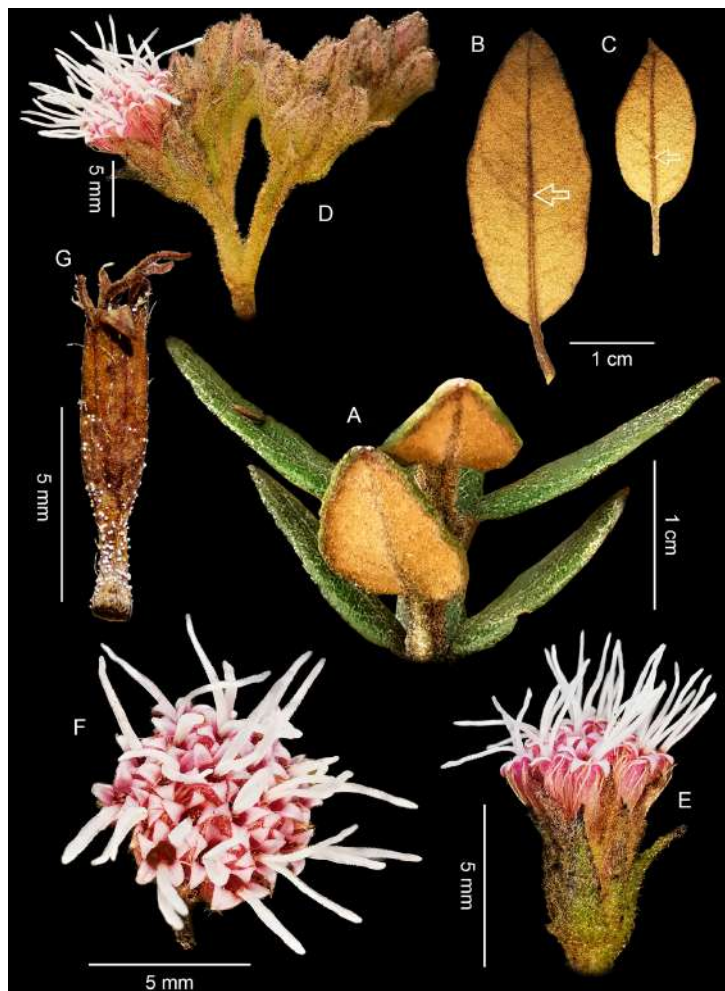


Figura 6. Imágenes de campo de J. Aguilar-Cano, A. Simbaqueba 7105 (holotypus JBB-38897) *Ageratina gynoxoides* var. *iguazuensis*. **A.** Porción rama vegetativa. **B.** Hoja proximal vista por la superficie abaxial. **C.** Hoja distal vista por la superficie abaxial. **D.** Paracladio de sinflorescencia en vista lateral. **E.** Capítulo, vista lateral. **F.** Capítulo visto desde arriba. **G.** Corola. Flecha abierta en **B** y **C** indica vena media parcialmente cubierta por el indumento de la lámina foliar. Fotografías por J. Aguilar-Cano. Lámina elaborada por J.J. Aguilar-Pachón y Daniel Amaya

Especímenes adicionales examinados: Colombia. **Boyacá:** municipio de **Arcabuco:** Santuario Iguaque, Slope above Laguna Iguaque in direction to L. Ojo de Agua, 3650 m, [5.692778, -73.443056], 15 oct 1998, *D. Stancik* 938 (COL-419749). Municipio de **Duitama:** páramo de la Rusia, NW-N de Duitama, Serranía Peña Negra: pedregales 1 km al S de la Laguna Agua Clara, 3.930 m [5,977782, -73,089235], 12 dic 1972, *A. Cleef* 7127 (COL-218474; US-2740993); páramo de la Rusia, NNW de Duitama, 3.550 m, [5,974189, -73,057469], 11 sep 1969, *J. Cuatrecasas* 27735 (COL-208609; US-2585740A); in Paramo de la Rusia near La Osera, along road between Duitama and Charalá, 3.643 m, [5,921721, -73,088884], 20 ago 1953, *J. Langenheim* 3514 (COL-71926, US-2270690); páramo de La Rusia, 3350 m, [5,974189, -73,057469], 3 oct 1986, *O. Rangel-Churrio* 4116 (COL-418847). Municipio de **Villa de Leyva,** Santuario de Flora y Fauna de Iguaque, Villa de Leyva y San Pedro de Iguaque, trayecto Las Cabañas a la laguna de Iguaque, [5.692857, -73.450948], 2800-3500 m, 13 dic 2002, *J. Fernández-Alonso* 20081 (COL-483725). **Santander:** municipio de **Encino:** vereda Rionegro, páramo La Rusia, 3.400 m [6.007222, -73.081389], 11 sep 2020, *B. Rodríguez* 167 (COL-559538).

Hábitat y distribución: *Ageratina gynoxoides* var. *iguaquensis* no crece simpátricamente con la variedad típica y se restringe al norte de la cordillera Oriental de Colombia. Se presentan registros desde el sur del departamento de Santander y alcanza el límite norte hacia los complejos de páramo de La Rusia e Iguaque-Merchán, mientras que la variedad típica crece exclusivamente en el Distrito Capital y el departamento de Cundinamarca, en los complejos de páramo de Chingaza y Sumapaz. Tanto la variedad típica como la nueva variedad crecen en pajonales-frailejones como individuos solitarios dispersos o en grupos de escasos individuos.

Discusión

Se describe *Ageratina laurae* como una nueva especie del subgénero *Andinia* con base en ejemplares de herbario y visitas de campo en la localidad de Usme, en zona rural del Distrito Capital. La nueva especie se asemeja únicamente a las especies *A. gynoxoides* y *A. josephensis*, principalmente por la consistencia crustácea de las hojas y la presencia de glándulas en la superficie abaxial de la lámina foliar (véase **tabla 1** con la comparación de estas tres especies).

Durante el estudio de ejemplares tanto en campo como en colecciones adicionales, se encontraron algunos ejemplares de *A. gynoxoides* que presentan dimorfismo en las hojas (cf. JBB-11698, JBB-14582, JBB-37593, UDBC-18242), con alta diferenciación entre las hojas proximales del arbusto y las distales del antoclado. No obstante, este dimorfismo se ha observado en otras especies de *Ageratina* (*A. glyptophlebia* (B.L. Rob.) R.M. King & H. Rob., *A. tinifolia*, *A. asclepiadea* (L.f.) R.M.King & H.Rob., *A. elegans*), así como en otros géneros de la tribu Eupatorieae (cf. *Austroeuatorium*, *Mikania* etc).

A pesar de la variación de forma y tamaño de las hojas en un mismo individuo en especies del subgénero *Andinia*, otros caracteres foliares han resultado útiles para diferenciar algunas especies en la cordillera Oriental de Colombia. Del mismo modo, el tipo y la densidad del indumento en partes vegetativas, la ramificación de las sinflorescencias y el número de verticilos en las filarias representan caracteres útiles para separar la mayoría de las especies del subgénero *Andinia* de Bogotá y alrededores. Sin embargo, en el estudio del material de herbario se identificaron complejos del subgénero *Andinia* en algunas especies que requieren un estudio detallado para definir nuevos límites de especies, reinstaurar nombres previamente propuestos o proponer categorías infraespecíficas. En dicho contexto, se destacan complejos de especies como *A. angustifolia*-*A. asclepiadea*; *A. latipes* - *A. viscosa* (cf. Ecuador); *A. elegans* - *Eupatorium rorulentum*; *A. glyptophlebia*-*A. boyacensis*-*A. theifolia*; *A. tinifolia*-*A. trianae*-*A. fastigiata* (Ecuador, Perú).

En el caso de *Ageratina gynoxoides* se encontraron dos grupos poblacionales diferenciados por características morfológicas confinadas en áreas geográficas distintas, lo que sugiere que el aislamiento geográfico posiblemente desempeña un papel fundamental en

la formación de los taxones infraespecíficos al interior de *A. gynoxoides*. Estos grupos poblacionales son similares en hábitat y preferencias ecológicas, pero se encuentran en macizos montañosos separados por una extensa área con elevaciones más bajas donde no se registran poblaciones intermedias.

El primer grupo de poblaciones reúne la variedad típica *A. gynoxoides* var. *gynoxoides*, que se distribuye en dos localidades en territorio del Distrito Capital y Cundinamarca. La primera corresponde a los cerros Orientales (páramo de Chingaza) y se caracteriza por la elevada humedad, en tanto que la segunda corresponde a los cerros occidentales de Quiba (noroeste del páramo de Sumapaz) con condiciones de xerofitía. A pesar de las condiciones climáticas contrastantes, la variación morfológica al interior de este grupo de poblaciones en sus características vegetativas y reproductivas es menor y ocurre esporádicamente en algunos individuos.

Por otra parte, el segundo grupo, que reúne a las poblaciones de la nueva variedad, *A. gynoxoides* var. *iguazuensis*, presenta caracteres vegetativos –variación en la densidad del indumento en la vena media de la lámina foliar por su cara abaxial–, y reproductivos –variación en la densidad de glándulas en la superficie externa de las corolas–, estables y compartidos. Estos caracteres se encontraron en todos los ejemplares procedentes de las poblaciones que crecen desde el sur del departamento de Santander hasta el límite norte en los complejos de páramo de La Rusia e Iguaque-Merchán, en el departamento de Boyacá. Por lo tanto, concluimos que estas poblaciones ocupan un grupo morfológico único que aquí proponemos como nueva variedad de *A. gynoxoides*.

Nuevos muestreos y futuros análisis permitirán poner a prueba el concepto de especie basado en la morfología que proponemos. La inclusión de nuevas fuentes de evidencia (secuencias de ADN, cariotipos, fitoquímica, fenología, etc.) contribuirá a obtener información complementaria que ayude a mejorar nuestra comprensión de la diversidad del subgénero *Andinia* y, en general, someter a prueba los límites específicos dentro de *Ageratina*.

Por último, se resalta que el programa Flora de Bogotá ha intensificado su muestreo en las zonas rurales del Distrito Capital en la última década. Sin embargo, aún no se han encontrado poblaciones adicionales de *A. laurae* en lugares más conservados al sur de la localidad tipo, específicamente en el Parque Nacional Natural Sumapaz, pero se espera que existan. Las poblaciones de la nueva especie crecen en áreas con bajo nivel de transformación, pero son susceptibles de cambio, dado que crecen en áreas sin categoría de manejo de conservación, por lo cual se consideran en alto riesgo de desaparecer. A pesar de que hemos aumentado el muestreo de las colecciones de *A. laurae*, únicamente hemos diferenciado dos localidades aisladas de esta especie. Futuras recolecciones y censos poblacionales de la especie permitirán una categorización formal del riesgo de extinción bajo los estándares de la UICN.

Agradecimientos

Los autores agradecen al programa Flora de Bogotá, de la Subdirección Científica del Jardín Botánico de Bogotá “José Celestino Mutis”, por el apoyo en la gestión administrativa y financiera en el desarrollo de este trabajo. Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento al coordinador del herbario JBB, Boris Villanueva, así como al Herbario Nacional Colombiano, COL, por facilitar la consulta de los especímenes durante la contingencia de la Covid-19 y a lo largo de la presente investigación. Por último, agradecemos a Daniel Amaya y Juan José Aguilar por la elaboración de las láminas que acompañan este trabajo.

Contribución de los autores

JAC y FA diseñaron la investigación, realizaron el trabajo de campo, escribieron el artículo y revisaron las colecciones.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Aguilar-Cano, J., Holmes W.C.** (2016). Mikania. En: Bernal, R., R.S. Graddstein & M. Celis (Eds.). *Catálogo de las plantas de Colombia. Vol. I.*(867-871). Instituto de Ciencias Naturales-Universidad de Göttingen (Verificar con autores)
- Ávila, F., Funk, V.A., Diazgranados, M., Díaz-Piedrahita, S., Vargas, O.M.** (2016). *Asteraceae*. En: Bernal, R., Graddstein, R.S., Celis M. (Eds.). *Catálogo de las plantas de Colombia. Vol. I.* Instituto de Ciencias Naturales-Universidad de Göttingen.
- Donoghue, M.J.** (1985). A Critique of the Biological Species Concept and Recommendations for a Phylogenetic Alternative. *The Bryologist*, 88(3), 172-181 <https://doi.org/10.2307/3243026>
- Fajardo-Gutiérrez, F., Aguirre J.** (2020). El proyecto Flora de Bogotá y su importancia para la ciudad. *Perez-Arbelaezia*, 21(1), 5-16.
- Font, Q.P.** (1953). *Diccionario de botánica*. Ed. Labor.
- Grossi, M.A., Viera Barreto, J.N., Plos, A., Rodríguez-Cravero, J.F., Forte, N.B., Gutiérrez, D.G., Sancho, G.** (2020). Providing tools for the reassessment of Eupatorieae (*Asteraceae*): comparative and statistical analysis of reproductive characters in South American taxa. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 46, 125566. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2020.125566>
- Jardín Botánico de Bogotá.** (2023). Portal web Flora de Bogotá. <https://florabog.jbb.gov.co/index.html>
- King, R.M. & Robinson, H.** (1970). Studies in Eupatorieae (Compositae) XIX. New combinations in *Ageratina*. *Phytologia* 12, 208-229.
- King, R.M. & Robinson, H.** (1978). Studies in Eupatorieae (Compositae) CLXVIII. Additions to the genus *Ageratina*. *Phytologia*, 38, 323-355.
- King, R.M. & Robinson, H.** (1987). *The genera of the Eupatorieae (Asteraceae)*. Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden.
- Linnaeus, C.** (1753). *Species Plantarum: exhibentes plantas rite cognitatas, ad genera relatas, cum differentiis specificis, nominibus trivialibus, synonymis selectis, locis natalibus, secundum systema sexuale digestas* (1st. ed.). Stockholm: Impensis Laurentii Salvii.
- POWO** (2024). Plants of the World Online. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. <http://www.plantsoftheworldonline.org/>
- Robinson, B. L.** (1918). A descriptive revision of the Colombian Eupatoriums. *Proceedings of American Academy of Arts*, 54, 235-263.
- Ryan, D.** (2018). Global Plants: A Model of International Collaboration. *Biodiversity Information Science and Standards*, 2, e28233. <https://doi.org/10.3897/biss.2.28233>
- Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W.** (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Spach, E.** (1841). *Histoire Naturelle des Végétaux. Phanérogames*, 10, 286. Librairie encyclopédique de Roret.
- Thiers, B.M.** (2021). *Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff*. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium. <http://sweetgum.nybg.org/science/ih/>
- Wedell, H. A.** (1855). *Chloris andina: essai d'une flore de la région alpine des Cordillères de l'Amérique du Sud. Chloris Andina*, 1(7), 216.

Artículo original

Morfología vegetativa de *Phytelephas macrocarpa* en el noroeste de la Amazonía peruana

Vegetative morphology of *Phytelephas macrocarpa* in the northwest of the Peruvian Amazon

🔗 Karlene Yupe-Rosero^{1,2}, 🔗 Sebastián Escobar³, 🔗 Kember Mejía¹,
🔗 Johnny Cano-Guevara^{1,4}, 🔗 Jhoyner Tapia^{1,5}, 🔗 Ángel Alejandro Salazar-Vega¹,
🔗 E. Hanz Rodríguez-Cabrera¹, 🔗 Ángel Martín Rodríguez del-Castillo^{1,*}

¹Laboratorio de Botánica Aplicada Jean-Christophe Pintaud, Dirección de Diversidad Biológica, Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana, Tarapoto, Perú

²Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Tarapoto, Perú

³Grupo de Investigación en Ecología y Evolución en los Trópicos-EETrop, Universidad de Las Américas, Quito, Ecuador

⁴Escuela de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ecología, Universidad Nacional de San Martín, Moyobamba, Perú

⁵Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Cesar Vallejo, Tarapoto, Perú

Resumen

El aprovechamiento incontrolado de los recursos de *Phytelephas macrocarpa* y la deforestación han disminuido las poblaciones naturales de la especie cercanas a los centros poblados. En este estudio nos propusimos evaluar la morfología vegetativa de *Phytelephas macrocarpa* para comprender la variabilidad de sus poblaciones al noroeste de la Amazonía peruana. Para ello, se tuvieron en cuenta 28 caracteres (18 cuantitativos y 10 cualitativos) de 180 individuos adultos, que se compararon mediante las pruebas ANOVA y Kruskal-Wallis y se sometieron a análisis multivariados de agrupamiento jerárquico y de componentes principales. Por último, con un análisis de correlación de Spearman se estimó la asociación entre caracteres, la mayoría de los cuales presentaron una gran variación (<20 %) y fueron significativamente diferentes ($p < 0,05$). Se formaron dos grupos con base en el hábito de la palmera: el primero incluyó los individuos acaulescentes, con hojas de mayor longitud, y el segundo, individuos con tallos decumbentes a erectos y hojas más cortas. El análisis de componentes principales (ACP) demostró que las poblaciones más variables fueron las de Andiviela, Caynarachi, Palestina y Shapaja. Las asociaciones más marcadas fueron las de la longitud de la hoja con la del raquis (0,94) y la del diámetro basal del raquis con el diámetro medio del peciolo (0,85). Estos datos demuestran la variabilidad de los caracteres vegetativos de *Phytelephas macrocarpa* y sirven como referencia para el aprovechamiento sostenible de las poblaciones con hojas de mayor tamaño.

Palabras clave: Arecaceae; Caracterización; Ceroxyloideae; Estructuras vegetativas; Variabilidad interpoblacional.

Abstract

The uncontrolled use of *Phytelephas macrocarpa* resources and deforestation have decreased natural populations near populated centers. Here, we evaluated the vegetative morphology of *Phytelephas macrocarpa* to understand the variability of its populations in the northwest of the Peruvian Amazon by examining 28 characters (18 quantitative and 10 qualitative) from 180 adult palms, comparing them using ANOVA and Kruskal-Wallis tests, and visualizing them through a multivariate analysis of hierarchical clustering and principal components. Finally, we used Spearman's correlation analysis to estimate the association between characters, most of which showed a high variation (< 20%) and were all significantly different ($p < 0.05$). Two groups were formed based on the habit of the palm three: the first was composed of acaulescent palms with longer leaves and the second, with decumbent to erect stems and shorter leaves. The principal components analysis (PCA)

Citación: Yupe-Rosero K *et al.*
Morfología vegetativa de *Phytelephas macrocarpa* en el noroeste de la Amazonía peruana. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):551-563, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2639>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Ángel Martín Rodríguez del Castillo;
arodriguez@iiap.gob.pe

Recibido: 3 de mayo de 2024

Aceptado: 6 de agosto de 2024

Publicado en línea: 20 de agosto de 2024



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

showed that Andiviela, Caynarachi, Palestina, and Shapaja had the most variable populations. The strongest associations were between leaf length and rachis length (0.94) and between basal rachis diameter and petiole diameter (0.85). This information demonstrates the variability of the vegetative characters of *Phytelephas macrocarpa* and serves as a reference for the sustainable use of populations with larger leaves.

Keywords: Arecaceae; Characterization; Ceroxyloideae; Vegetative structure; Interpopulational variability.

Introducción

La familia Arecaceae se destaca como uno de los grupos de plantas más importantes en términos económicos y ecológicos a nivel mundial (Balslev *et al.*, 2008); incluye 181 géneros y más de 2.600 especies distribuidas en zonas tropicales y subtropicales (Baker & Dransfield, 2016), forma parte de la dieta de muchos animales y provee al ser humano con productos no maderables que sirven de alimento y como elementos rituales, materiales para construcción, herramientas y otros usos (Kahn & de Granville, 1992; Sander *et al.*, 2023).

La palmera *Phytelephas macrocarpa* Ruiz & Pavón, de la tribu Phytelepheeae, subfamilia Ceroxyloideae (Dransfield *et al.*, 2008), crece en zonas de afloramiento de piedra caliza y suelos ricos de las estribaciones de los Andes, sobre bosques inundables, bosques lluviosos de tierras baja y bosques estacionalmente secos de Brasil, Bolivia y Perú (Barfod, 1991; Henderson *et al.*, 1995; Mejía *et al.*, 2014). Mediante métodos filogenómicos, recientemente se confirmó que esta especie no se encuentra en el Chocó colombiano y en la zona del Magdalena (Escobar *et al.*, 2022) como se había propuesto previamente (Galeano & Bernal, 2010).

Phytelephas macrocarpa es una planta dioica con tallos de hasta 4 m de alto, que pueden ser solitarios o cespitosos, decumbentes a erguidos, cubiertos de fibras persistentes, y con vainas remanentes. Posee de 12 a 20 hojas con pinnas dispuestas regularmente en un mismo plano, que pueden alcanzar hasta los 7 m de longitud; peciolo de color verde de hasta 2 m de longitud; inflorescencias masculinas y femeninas dispuestas en racimos diferentes, las flores masculinas agrupadas en espiga y las femeninas en forma de cabezuela; los frutos forman racimos casi esféricos y poseen un endospermo de color blanco que, al madurar, se solidifica y se transforma en marfil vegetal (Barfod, 1991; Henderson *et al.*, 1995; Miranda, 2001; Costa *et al.*, 2006; Bernal & Galeano, 2013; Moraes, 2004, 2020).

En la Amazonía peruana la especie es conocida comúnmente con los nombres de “yarina”, “llarina”, “polponta”, “polopunta” o “poloponta” (Kahn & Moussa, 1994; Paniagua-Zambrana *et al.*, 2014; Smith, 2015). Las comunidades rurales consumen el endospermo gelatinoso de los frutos inmaduros y, ocasionalmente, el mesocarpo de frutos maduros; las semillas maduras son empleadas para la fabricación de artesanías y otras misceláneas (Kahn & Moussa, 1994; Bernal & Galeano, 2013). Además, las hojas se usan para el techado de las casas, siendo un poco menos duraderas que las hojas de *Attalea* y *Geonoma*; al ser medianamente gruesas, las pinas sirven para confeccionar canastos; también se obtienen fibras de la vaina y del peciolo que se utilizan para hacer fuego y como antorchas (Martín & Mass, 2011).

A pesar de la importancia de *P. macrocarpa*, no se encontraron estudios relacionados con la variabilidad morfológica de sus caracteres vegetativos, la cual brinda información sobre los procesos de domesticación y aprovechamiento de estas estructuras (Aponte *et al.*, 2011; Bernal & Galeano, 2013; Machahua *et al.*, 2014; Neto & Ferreira, 2014; Ferreira & Gentil, 2017). Los estudios de caracterización sirven para reconocer el conjunto de rasgos que ayudan en la diferenciación taxonómica de esta palmera y permiten estimar la variabilidad de sus poblaciones mediante descriptores establecidos (López-Santiago *et al.*, 2008; Hernández, 2013), que pudieron haberse desarrollado a lo largo de diferentes procesos evolutivos, o a causa de la dispersión natural o la dinámica de inducción-selección, lo que favorece la preferencia por individuos con mejores características (Franco & Hidalgo, 2003).

El objetivo de nuestro estudio fue evaluar la morfología de las estructuras vegetativas de *P. macrocarpa* en el noroeste de la Amazonía peruana para comprender la variabilidad interpoblacional y permitir la selección indirecta de individuos y caracteres de importancia en el aprovechamiento sostenible de estos órganos vegetativos mediante planes de manejo y conservación.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en la cuenca central del río Huallaga, ubicada en la región San Martín, al noroeste de la Amazonía peruana. Se seleccionaron nueve localidades en las que hay presencia de rodales naturales de yarina (**Tabla 1**) (**Figura 1**) conocidos como “yarinales”.

Tabla 1. Ubicación de las nueve poblaciones de yarina evaluadas en San Martín

Localidad	Distrito	Abreviación	Latitud	Longitud
Ahuashillo	Tarapoto	Ahu	6°19'25" S	76°17'19" O
Andiviela	Morales	And	6°31'22" S	76°27'28" O
Bello Horizonte	La Banda de Shilcayo	BH	6°32'00" S	76°17'50" O
Caynarachi	Pongo de Caynarachi	Cay	6°19'36" S	76°17'18" O
Churuzapa	Rumisapa	Chu	6°28'22" S	76°29'17" O
Palestina	Nueva Cajamarca	Pal	5°55'32" S	77°21'07" O
Pucacaca	Pucacaca	Puc	6°51'03" S	76°20'16" O
Shapaja	Shapaja	Sha	6°35'24" S	76°13'23" O
Urcupata	Lamas	Urc	6°23'14" S	76°30'60" O

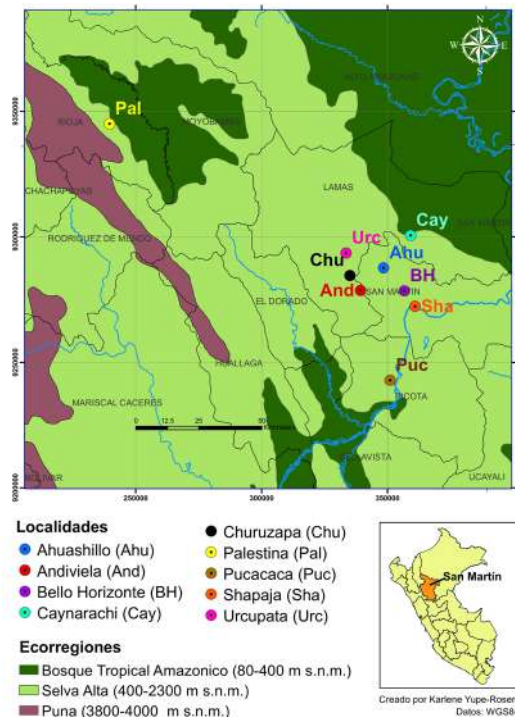


Figura 1. Lugares de muestreo de las poblaciones de *Phytelphas macrocarpa*

Caracterización morfológica

Se seleccionaron de manera aleatoria 20 individuos adultos de cada población, alcanzando una muestra total de 180 palmeras adultas. Para la caracterización de las estructuras vegetativas, se elaboró una lista de 28 caracteres (18 cuantitativos y 10 cualitativos) a partir de las descripciones realizadas por **Barfod** (1991) (**Tabla 2**). Las mediciones de los caracteres se hicieron con una cinta métrica y un calibrador deslizante digital (pie de rey).

Análisis de datos

Se emplearon análisis de estadística descriptiva para obtener el promedio, los valores mínimos y máximos, la desviación estándar y el coeficiente de variación. En los análisis inferenciales se utilizó un nivel de confianza de $\alpha=0,05$, para lo cual, los datos se sometieron a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk ($n=20$) (**Guedes et al.**, 2015). Para comparar los datos, se empleó el análisis de varianza para datos normales (**Vianna et al.**, 2017) y la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para los datos no normales (**Giovino et al.**, 2020).

Posteriormente, se hizo un análisis de agrupamiento jerárquico utilizando la distancia euclidiana y el método de aglomeración de Ward; los promedios de los datos se convirtieron mediante la transformación de Hellinger (**Vargas & Blanco**, 2000). Para determinar el

Tabla 2. Lista de caracteres para la evaluación de estructuras vegetativas de *P. macrocarpa*

Estructura	Caracteres	Abreviación
Planta	Altura total (cm)	AT
	Hábito	H
	Tipo del tallo	TT
Tallo	Tipo del crecimiento del tallo	TCT
	Longitud del tallo (cm)	LT
	Diámetro del tallo (cm)	DT
	Presencia de fibras	PF
	Tipo de orientación en la hoja	OH
Hoja	Número de hojas (n)	NH
	Tipo de hoja	TH
	Longitud de hoja (cm)	LH
Peciolo	Color y tipo del peciolo	CTP
	Longitud del peciolo (cm)	LP
	Diámetro medio del peciolo (cm)	DMP
	Tipo de peciolo	TP
Raquis	Longitud de raquis (cm)	LR
	Diámetro basal del raquis (mm)	DBR
	Diámetro medial del raquis (mm)	DMR
	Diámetro apical del raquis (mm)	DAR
	Número de pinnas (n)	NP
Pinna	Longitud de la pinna basal (cm)	LPB
	Ancho medio de la pinna basal	AMPB
	Longitud de la pinna medial	LPM
	Ancho medio de la pinna medial (mm)	AMPM
	Longitud de la pinna apical (cm)	LPA
	Ancho medio de la pinna apical (mm)	AMPA
	Disposición de las pinnas	DP
	Disposición de las venas	DV

comportamiento y la variabilidad de los datos, se empleó el análisis de componentes principales (ACP) (Souza *et al.*, 2023). Por último, el análisis de correlación de Spearman se empleó para estimar el nivel de asociación entre los caracteres vegetativos (Göldel *et al.*, 2015). Todos los análisis se hicieron en el programa RStudio 2023.06.1+524.

Resultados

Caracteres vegetativos de la yarina

Los individuos de *Phytelephas macrocarpa* presentaron hábitos acaulescentes a subacaulescentes, con tallos solitarios o cespitosos de 270 a 900 cm de altura, algunos con la parte aérea decumbente a erguida de 20 a 201 cm de longitud y 14,01 a 30,56 cm de diámetro, y cubiertos de fibras conspicuas. La cantidad de hojas varió entre 8 y 79, siendo semierectas a erectas, dobladas desde la base hacia la parte superior y torcidas distalmente, de 226 a 890 cm de longitud, con peciolo verdes y glabros de 24,9 a 178 cm de longitud y 1,51 a 5,55 cm de diámetro en la parte media. La cara adaxial de las hojas aparecía superficialmente estriada, con una cresta en el medio, y los raquis midieron entre 192 y 790 cm de longitud, con diámetros de 1,40 a 4,84 cm en la parte basal, 0,41 a 3,04 cm en la medial y 0,05 a 0,79 cm en la apical. Se contaron entre 96 y 186 pinnas (48–93 por lado) dispuestas uniformemente, con nervadura central y submarginales prominentes; las pinnas basales midieron de 17 a 100 cm de longitud con diámetro de 0,09 a 4 cm, las mediales de 44 a 96 cm de longitud y diámetro de 2,14 a 7,46 cm, y las apicales variaron entre 5 y 38 cm de longitud con diámetro de 0,08 a 3,0 cm (Tabla 3) (Figura 2).

Todos los caracteres mostraron coeficientes de variación mayores del 20 %, a excepción del diámetro del tallo (DT), el número de pinnas (NP) y la longitud de la pinna medial (LPM) (Tabla 3). El coeficiente de variación promedio de los 18 caracteres fue de 33,40 %.

Tabla 3. Resultados de la media, desviación estándar (DE), valores mínimos y máximos y coeficiente de variación (CV) de los caracteres vegetativos de *Phytelephas macrocarpa*

Caracteres	Media	DE	Mínimo	Máximo	CV (%)
Altura total (cm)	520,73	120,77	270	900	23,19
Longitud del tallo (cm)	82,87	45,87	20	201	55,35
Diámetro del tallo (cm)	21,98	3,49	14,01	30,56	15,87
Número de hojas (n)	26,53	12,38	8	79	46,65
Longitud de la hoja (cm)	490,25	113,23	226	890	23,09
Longitud del peciolo (cm)	65,88	22,96	24,9	178,0	34,85
Diámetro medio del peciolo (cm)	3,43	0,88	1,51	5,55	25,67
Longitud de raquis (cm)	418,78	109,50	192	790	26,15
Diámetro basal del raquis (mm)	3,00	0,76	1,40	4,84	25,30
Diámetro medial del raquis (mm)	1,62	0,50	0,41	3,04	30,75
Diámetro apical del raquis (mm)	0,15	0,09	0,05	0,79	59,83
Número de pinnas	150,97	20,54	96	186	13,61
Longitud de la pinna basal (cm)	55,66	19,73	17	110	35,45
Ancho medio de la pinna basal	1,760	1,041	0,09	4,00	59,14
Longitud de la pinna medial (cm)	64,68	11,54	44	96	17,84
Ancho medio de la pinna medial (mm)	4,94	1,02	2,14	7,46	20,68
Longitud de la pinna apical (cm)	16,169	5,789	5	38	35,81
Ancho medio de la pinna apical (mm)	1,12	0,58	0,08	3,00	51,93



Figura 2. Variabilidad de los caracteres vegetativos de individuos de *Phytelephas macrocarpa* del noroeste de la Amazonia Peruana: a) Ahuashillo, b) Bello Horizonte, c) Andiviela, d) Churuzapa, e) Palestina, f) Caynarachi, g) Shapaja, h) Pucacaca, i) Urcupata

En la **tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2639/4430>, se muestran los resultados de la media, la desviación estándar, los valores mínimos y máximos y el coeficiente de variación de 18 caracteres evaluados en cada población de *P. macrocarpa*, así como el resultado de las comparaciones, en las que se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) para todos los caracteres.

Agrupamiento de las poblaciones de yarina

El análisis de agrupamiento jerárquico arrojó dos grupos con un coeficiente de aglomeración de 0,858. El primer grupo (C1) reunió tres de las nueve poblaciones evaluadas: Churuzapa (Chu), Andiviela (And) y Urcupata (Urc), y el segundo (C2) a las seis poblaciones restantes: Ahuashillo (Ahu), Bello Horizonte (BH), Caynarachi (Cay), Palestina (Pal), Puc (Pucacaca) y Shapaja (Sha) (**Figura 3**).

Comportamiento y variación de los datos

El ACP resumió el 56,46 % de los datos; el 44,82 % de la varianza se concentró en el primer componente y el 11,64 % en el segundo componente. Los caracteres de mayor aporte a la variabilidad en el PC1 fueron la altura total (AT), la longitud del tallo (LT), el diámetro del tallo (DT), la longitud de la hoja (LH), el diámetro medio del peciolo (DMP), la longitud del raquis (LR), el diámetro basal del raquis (DBR), el medial (DMR), la longitud de la pinna basal (LPB) y la de la pinna medial (LPM). El número de pinnas (NP) aportó variabilidad al PC2 (**Tabla 4**). Se observó que Andiviela, Churuzapa y Urcupata presentaron los valores más altos para la mayoría de los caracteres medidos en las hojas, ya que los datos fueron más afines a las flechas de los caracteres, en tanto que Bello Horizonte, Caynarachi, Palestina, Pucacaca y Shapaja mostraron valores altos de longitud y diámetro del tallo, así como en el número de hojas, al encontrarse orientados en el sentido de las flechas de estos caracteres (**Figura 4**).

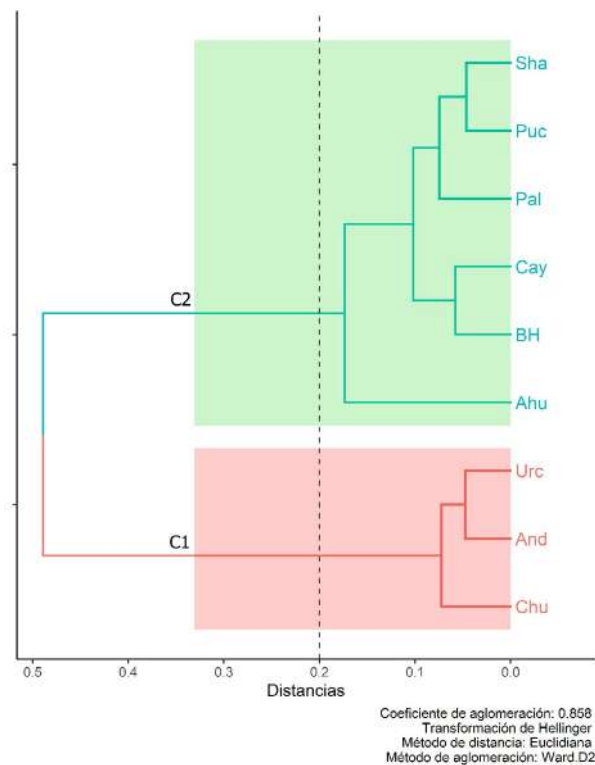


Figura 3. Agrupamiento de las poblaciones de *Phytelephas macrocarpa* en función a los promedios de los caracteres vegetativos

Tabla 4. Varianza y valores de los vectores de los dos primeros componentes obtenidos de 18 caracteres de las estructuras vegetativas. Los valores en negrita indican una asociación > 0,65 con el componente.

Caracteres	PC1	corr. 1	PC2	corr. 2
AT	-0,239	-0,678	0,275	0,398
LT	0,272	0,771	0,339	0,490
DT	0,263	0,747	0,338	0,490
NH	0,095	0,271	0,332	0,480
LH	-0,299	-0,849	0,139	0,202
LP	-0,067	-0,191	0,015	0,022
DMP	-0,296	-0,841	0,253	0,367
LR	-0,316	-0,899	0,167	0,242
DBR	-0,273	-0,776	0,217	0,314
DMR	-0,295	-0,837	0,090	0,130
DAR	-0,109	-0,309	-0,099	-0,144
NP	-0,189	-0,538	0,467	0,676
LPB	-0,257	-0,730	-0,023	-0,033
AMBP	-0,232	-0,660	-0,229	-0,332
LPM	-0,272	-0,772	-0,067	-0,097
AMPM	-0,230	-0,653	-0,202	-0,292
LPA	-0,152	-0,432	-0,084	-0,122
AMPA	-0,174	-0,495	-0,291	-0,421
% de variación	44,82 %		11,64 %	
% acumulado	44,82 %		56,46 %	

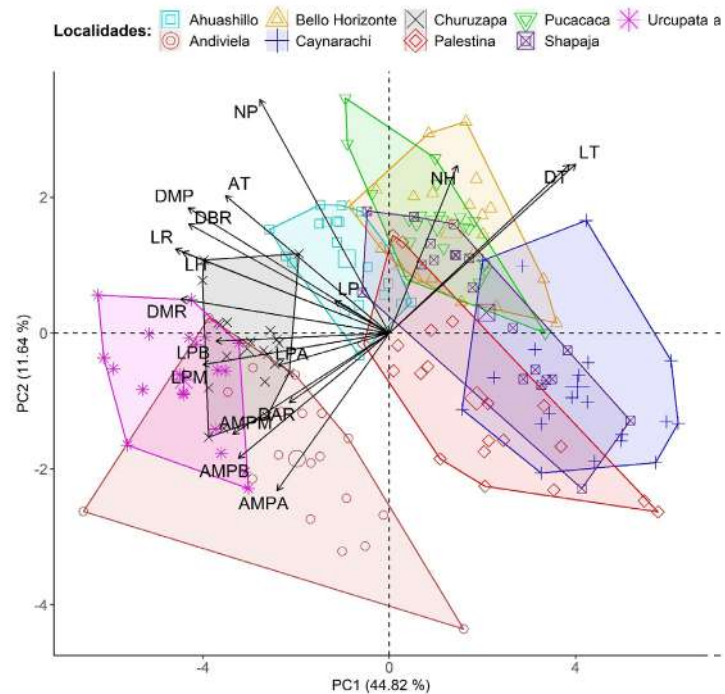


Figura 4. Análisis de componentes principales de 18 caracteres vegetativos de *Phytalephas macrocarpa*

Relación de los caracteres vegetativos

El análisis de Spearman demostró que la mayoría de caracteres presentaron asociaciones directas significativas ($p < 0,05$). Las asociaciones directas más marcadas se registraron entre la longitud del raquis (LR) y la longitud de la hoja (LH) (0,94), el diámetro basal del raquis (DBR) y el diámetro medio del peciolo (DMP) (0,85), y el diámetro basal del raquis (DBR) y su diámetro medial (DMR) (0,84). La mayor parte de las asociaciones inversas se relacionaban con la longitud del tallo (LT), su diámetro (DT) y el número de hojas (NH) (Figura 5).

Discusión

En su estudio de caracterización de accesiones de *Crataegus* spp., **López-Santiago et al.** (2008) mencionan que el coeficiente de variación adecuado para la selección de caracteres morfológicos confiables y discriminantes se encuentra entre el 15 y el 20 %; además, consideran que los valores superiores y cercanos al 20 % pueden utilizarse en los procesos de selección de caracteres deseables para un buen aprovechamiento, mientras que los valores superiores al 30 % deben descartarse. En nuestro estudio, la altura total, el diámetro del tallo, la longitud de la hoja, la longitud del peciolo, el diámetro medio del peciolo, la longitud del raquis, su diámetro basal y su diámetro medial, la longitud de la pinna medial y su ancho medio tuvieron entre el 15 y el 30 % de variación, por lo que podrían considerarse confiables y discriminantes, como lo indican **López-Santiago et al.** (2008). Los caracteres de longitud del tallo, número de hojas, diámetro apical del raquis, longitud y ancho medio de la pinna basal, así como de longitud y ancho medio de la pinna apical, presentaron variaciones superiores al 30 %. Según **López-Santiago et al.** (2008), esto indica que los caracteres vegetativos se encuentran muy influenciados por el ambiente.

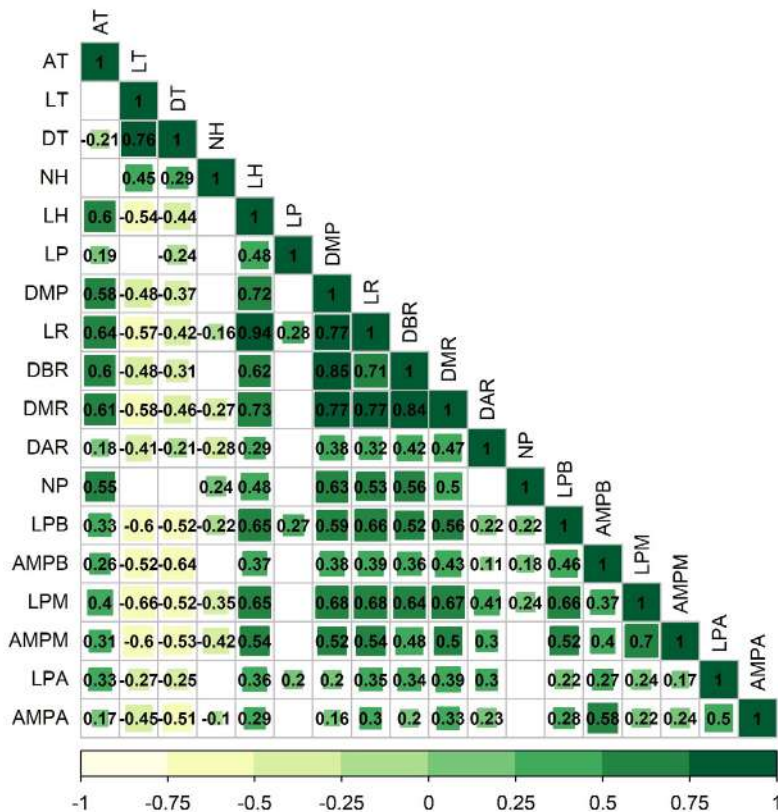


Figura 5. Correlación de 18 caracteres vegetativos de *P. macrocarpa*

Barfod (1991) reconoció dos subespecies para *P. macrocarpa* distribuidas en Perú: *macrocarpa* y *tenuicaulis*. Posteriormente, esta última fue ascendida por **Henderson** (1995) al estatus de especie, *P. tenuicaulis* (Barfod) A.J. Henderson, y determinada como especie hermana de *P. macrocarpa* mediante métodos filogenómicos (**Escobar et al.**, 2022). Según **Moraes** (2020), ambas especies se diferencian en que *P. macrocarpa* es una palmera de tronco aéreo solitario o cespitoso, de menos de 70 cm de alto y ocasionalmente acaulescente, con pinnas regularmente dispuestas y racimos de hasta 30 frutos, lo que la asemeja a las estructuras vegetativas del presente estudio. En cambio *P. tenuicaulis* presenta troncos cespitosos (2-8 tallos), rara vez solitarios, de 2 a 7 m de alto, con hojas más largas y racimos con menos frutos (5–12) que *P. macrocarpa* (**Moraes**, 2020). **Henderson et al.** (1995) afirman que la distribución de ambas especies en Perú no se encuentra superpuesta. *P. tenuicaulis* se encuentra predominantemente en bosques inundados cercanos a ríos y arroyos, en tanto que *P. macrocarpa*, aunque también se encuentra en hábitats similares, se está adaptando a ecosistemas con cierto nivel de estrés hídrico (**Mejía et al.**, 2014), como los bosques estacionalmente secos de la cuenca del Huallaga central.

Los análisis de comparación evidenciaron diferencias significativas ($p < 0,05$) para todos los caracteres vegetativos evaluados en las poblaciones de *P. macrocarpa*. Dichas diferencias fueron ratificadas en el análisis de componentes principales debido a la variabilidad de los caracteres y a la diferencia de tamaño de los racimos, donde Ahuashillo y Churuzapa fueron las poblaciones de menor variación y Andiviela, Caynarachi, Palestina y Shapaja las de mayor variabilidad. Se podría asumir que las expresiones fenotípicas estarían relacionadas con la influencia de las diferentes condiciones ambientales de las zonas evaluadas donde crece esta especie, pues muchos de dichos ecosistemas se encuentran fuertemente afectados por la progresiva y gradual deforestación en toda la región San Martín (**BCRP**, 2008; **GORESAM et al.**, 2008).

La caracterización morfológica de las estructuras reproductivas de *P. macrocarpa* hecha por **Neto & Ferreira** (2014) demostró que los caracteres morfológicos varió entre las poblaciones evaluadas, siendo de mayor tamaño en los fragmentos de bosque secundario. Nuestros resultados son parecidos a los de **Neto & Ferreira** (2014), ya que Andiviela, Caynarachi, Churuzapa y Palestina se encuentran en zonas fuertemente deforestadas e intervenidas por el hombre. Por otra parte, **Lima et al.** (2007) afirmaron que las estructuras vegetativas presentaban caracteres muy variables, influenciados por el tipo de ambiente donde se encontraron, como lo observado en el presente estudio.

En cuanto al análisis de aglomeración, las poblaciones de Churuzapa, Andiviela y Urcupata se encuentran geográficamente cercanas, en áreas deforestadas, lo que podría explicar su agrupamiento dentro del grupo C1. Además, estas tres poblaciones se caracterizan por presentar individuos con tallos acaulescentes, así como los valores más altos en la mayoría de los caracteres de la hoja (**Figura 3**). El resto de las poblaciones se caracterizaron por presentar tallos decumbentes a erectos, con caracteres vegetativos muy variables y de menor tamaño, lo que demuestra su aglomeración en el grupo C2. En los dos grupos, Caynarachi fue la única población que presenta palmeras de hábito cespitoso.

Los análisis de correlación son herramientas útiles para el reconocimiento de medidas botánico-agronómicas que ayudan en la identificación de la variabilidad y en la selección indirecta de caracteres morfológicos de palmeras, lo que permite los estudios de viabilidad económica y el manejo sostenible de este grupo de plantas (**Moreira et al.**, 2016; **Sinti-Pinedo et al.**, 2024.). Según el análisis de Spearman del estudio, existen correlaciones directas entre la altura total y los caracteres de las hojas, así como con los caracteres de las hojas mismas. Estas asociaciones nos indican que cuanto mayor sea la altura total de las palmeras y mayor la longitud de las hojas, mayores serán los tamaños de los segmentos foliares de la hoja, lo que permite una selección indirecta para el aprovechamiento de estos órganos vegetativos. Por otra parte, la presencia de un tallo aéreo con mayor longitud o diámetro influye inversamente en los caracteres de las hojas (**Figura 5**).

Conclusión

El presente estudio permitió obtener información sobre los caracteres vegetativos de *Phytelephas macrocarpa* en nueve poblaciones del noroeste de la Amazonía peruana. Los resultados demostraron que existe variabilidad entre las poblaciones de *P. macrocarpa*, siendo Ahuashillo y Churuzapa los sitios con las poblaciones de menor variabilidad en sus caracteres, a diferencia de Andiviela, Caynarachi, Palestina y Shapaja, que fueron las poblaciones más variables. También se pudo observar que Andiviela, Churuzapa y Urcupata mostraron los mayores valores relacionados con las estructuras de la hoja. Las poblaciones de *P. macrocarpa* tuvieron una gran variación en la mayoría de sus caracteres, lo que podría deberse a las diferentes condiciones ambientales de clima, suelo y vegetación de la región San Martín. Estas poblaciones se separaron en dos grupos en función del hábito de la palmera: el primer grupo se caracterizó por presentar individuos acaulescentes y con hojas de mayor longitud, en tanto que el segundo presentó individuos con tallos decumbentes a erectos y con hojas más cortas. Por último, se determinó que los caracteres más relevantes para este estudio estaban relacionados con la altura total de la planta y las diferentes estructuras de las hojas, lo que permite inferir que los individuos con tallos cortos son los que presentan hojas de mejores caracteres y de mayor tamaño, con lo cual podrían ser aprovechadas de manera sostenible mediante planes de manejo y cosecha.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2639/4430>

Agradecimientos

Este estudio formó parte del proyecto “Prospección, caracterización y etnobotánica de especies vegetales de interés económico en Selva Alta” - Meta 28, de la Dirección de Investigación en Diversidad Biológica Terrestre Amazónica (DBIO) del Instituto de Investigación de la Amazonia Peruana (IIAP), sede regional San Martín. Los autores agradecemos a Fernando Vela, Flavia Urbina, José Ramos, Luceth Navarro, Karolith Pinedo y a los pobladores de las localidades visitadas por su apoyo en las evaluaciones de campo.

Contribución de los autores

KYR: concepción del trabajo, toma de datos de campo, recopilación de la información para la realización del mapa, escritura y revisión del manuscrito. SE: escritura y revisión del manuscrito. KM: escritura y revisión del manuscrito. JCG: coordinación logística del trabajo en campo, toma de datos de campo, escritura y revisión del manuscrito. JT: coordinación logística del trabajo en campo, toma de datos de campo, escritura y revisión del manuscrito. AASV: escritura y revisión del manuscrito. EHRC: concepción, asesoría, diseño metodológico del trabajo, procesamiento y análisis de datos, redacción y revisión. AMRD: concepción del trabajo, dirección de la investigación, asesoría en el diseño metodológico del trabajo, trabajo de campo, escritura y revisión del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

Referencias

- Aponte, H., Kahn, F., Millán, B.** (2011). Vegetative adaptability of the Peruvian palm *Astrocaryum perangustatum* to deforestation. *Revista Peruana de Biología*, 18(2), 179-183. <https://doi.org/10.15381/rpb.v18i2.225>
- Baker, W. & Dransfield, J.** (2016). Beyond Genera Palmarum: progress and prospects in palm systematics. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 182(2), 207-233. <https://doi.org/10.1111/boj.12401>

- Balslev, H., Grandez, C., Paniagua-Zambrana, N. Y., Møller, A. L., Hansen, S. L.** (2008). Palmas (Arecaceae) útiles en los alrededores de Iquitos, Amazonía Peruana. *Revista Peruana de Biología*, 15(3), 121-132. <https://doi.org/10.15381/rpb.v15i3.3343>
- BCRP.** (2008). Informe Económico y Social. Región San Martín.
- Barfod, A. S.** (1991). A monographic study of the Subfamily Phytelephantoideae (Arecaceae). *Opera Botanica*, 105, 1-73.
- Barfod, A. S.** (1994). Usos pasados, presentes y futuros de las palmas Phytelephantoidées (Arecaceae). En M. Ríos y H. Borgtoft Pedersen (Eds.), *Las Plantas y El Hombre* (23-46). Quito, Ecuador: Ediciones ABYA-YALA.
- Bernal, R. & G. Galeano.** (Eds.). (2013). *Cosechar sin destruir: aprovechamiento sostenible de palmas colombianas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Costa, M., Rodríguez, S. F., Hohn, H.** (2006). Jarina: o marfim das biojóias da Amazônia. *Revista Escola de Minas*, 59(4), 367-371. <https://doi.org/10.1590/s0370-44672006000400003>
- Dransfield, J., Uhl, N. W., Asmussen, C. B., Baker, W. J., Harley, M. M., Lewis, C. E.** (2008). *Genera Palmarum. The Evolution and Classification of Palms*. Royal Botanical Garden, Kew.
- Escobar, S., Helmstetter, A. J., Montúfar, R., Couvreur, T. L., Balslev, H.** (2022). Phylogenomic relationships and historical biogeography in the South American vegetable ivory palms (Phytelephea). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 166, 107314. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2021.107314>
- Franco, T. L. & Hidalgo, R.** (Eds.). (2003). *Análisis Estadístico de Datos de Caracterización Morfológica de Recursos Fitogenéticos*. Boletín Técnico IPGRI, 8.
- Ferreira, S. A. & Gentil, D. F.** (2017). Seed germination at different stratification temperatures and development of *Phytelephas macrocarpa* Ruiz & Pavón seedlings. *Journal of Seed Science*, 39(1), 20-26. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v39n1166371>
- Galeano, G. & Bernal, R.** (2010). *Palmas de Colombia: Guía de campo*. Instituto de Ciencias Naturales: Universidad Nacional de Colombia.
- Giovino, A., Marchese, A., Domina, G.** (2020). Morphological and genetic variation of *Chamaerops humilis* (Arecaceae) in relation to the altitude. *Caryologia*, 73(4), 85-98. <https://doi.org/10.13128/caryologia-1011>
- GORESAM, IIAP, GTZ.** (Eds.) (2008). *Las potencialidades y limitaciones del departamento de San Martín. Propuesta de zonificación ecológica y económica como base para el ordenamiento territorial*. LuzAzul Gráfica.
- Göldel, B., Kissling, W. D., Svenning, J.-C.** (2015). Geographical variation and environmental correlates of functional trait distributions in palms (Arecaceae) across the New World. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 179, 602-617. <https://doi.org/10.1111/boj.12349>
- Guedes, M., Ferreria, P. H., Santana, K. N., Pimenta, M. A., Ribeiro, L.** (2015). Fruit morphology and productivity of babassu palm in Northern Minas Gerais State, Brazil. *Revista Árvore*, 39(5), 883-892. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000500011>
- Henderson, A.** (Ed.) (1995). *The Palms of the Amazon*. Oxford University Press.
- Henderson, A., Galeano, G., Bernal, R.** (1995). *Field Guide to the Palms of the Americas*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctvcszzzd>
- Hernández, A. E.** (2013). Caracterización morfológica de recursos fitogenéticos. *Revista Bio Ciencias*, 8(3), 113-118. <https://doi.org/10.15741/revbio.02.03.05>
- López-Santiago, J., Nieto-Ángel, R., Barrientos-Priego, A. F., Rodríguez-Pérez, E., Colinas-León, M. T., Borys, M. W., González-Andrés, F.** (2008). Selección de variables morfológicas para la caracterización del tejocote (*Crataegus* spp.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(2), 97-111.
- Kahn, F. & Moussa, F.** (1994). *Las palmeras de Perú*. Instituto Francés de Estudios Andinos.
- Kahn, F. & de Granville, J.-J.** (1992). Palms in Forest Ecosystems of Amazonia. En F. Kahn & J.-J. de Granville (Eds.), *Palms and Forest Management in Amazonia* (155-167). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-76852-1_8
- Lima, P., Lay, C., Cruz, J.** (2007). Morfología vegetativa y reproductiva de las fases de desarrollo de *Attalea maripa* (Aubl.) Mart. (Arecaceae) en un bosque urbano en Manaus, Amazonas, Brasil. *Revista de La Facultad de Agronomía LUZ*, 24(1), 130-134.
- Martín, M. & Mass, W.** (2011). *Palmeras Nativas: Conservación y manejo en la Zona de Amortiguamiento de la Reserva Nacional de Pacaya Samiria. Cuenca baja del río Marañón*. Programa de Cooperación Hispano Peruano, Ministerio del Ambiente, Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo.

- Machahua, M., Kahn, F., Millán, B.** (2014). Variabilidad vegetativa intra e interespecífica de *Astrocaryum chonta* y *A. javarense* (Arecaceae) en Jenaro Herrera, Loreto, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 21(2). <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v21i2.9816>
- Mejía, K., Pintaud, J. C., del-Castillo, Á. M. R., Santa Cruz, L., Rojas-Fox, J., Jiménez, V., Ramirez, R.** (2014). Del bosque húmedo al bosque seco: adaptabilidad de las palmeras al cambio climático. En S. Gonzáles, J. J. Vacher y A. Grégoire (Eds.), *El Perú frente al cambio climático: resultados de investigaciones franco-peruanas* (101-111). Lima: Institut de Recherche pour le Développement.
- Miranda, I. P. de A., Rabelo, A., Bueno, C. R., Barbosa, E. M., Ribeiro, M. N. S.** (2001). *Frutos de palmeiras da Amazônia*. Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.
- Moraes, M. R.** (2004). *Flora de Palmeras de Bolivia*. Universidad Mayor de San Andrés, Herbario Nacional de Bolivia, Instituto de Ecología.
- Moraes, M.** (2020). *Flora de Palmeras de Bolivia* (2da Ed.). Herbario Nacional de Bolivia, Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés, Plural Editores.
- Moreira, W. K. O., Oliveira, S. S., Reis, J., Paraense, L. R. C., Guimarães, A. T., Silva, R. T. L.** (2016). Análise de correlação em fruto de pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth). *Global Science and Technology*, 9, 106-115.
- Neto, V. C. & Ferreira, E. J.** (2014). Biometria de cachos, frutos e sementes da palmeira jarina (*Phytelephas macrocarpa* Ruiz & Pavon) oriundos de fragmentos florestais primários e secundarios do leste do Acre. *Enciclopédia Biosfera*, 10(19), 2765-2775.
- Paniagua-Zambrana, N. Y., Bussmann, R. W., Vega, C., Téllez, C., Macía, M. J.** (2014). Nuestro conocimiento y uso de las palmeras: Una herencia para nuestros hijos. Comunidades Llaquash, San Martín, Perú. *Ethnobotany Research and Applications*, 13(2), 1-105.
- Sander, N., Pulido, M. T., Silva, C. J.** (Coord.) (2023). *Usos de las Palmas en Latinoamérica*. Curitiba, Porto Alegre, Brasil: CRV & SBEE. <https://doi.org/10.24824/978652514377.4>
- Sinti-Pinedo, D. A., Rodríguez-Cabrera, E. H., Miranda, I. P. de A., Rojas-Fox, J., Mejía, K., Vásquez-Vásquez, J. E., del-Castillo, A. M. R.** (2024). Morfología de racimos, frutos y semillas de *Attalea moorei* en el Huallaga Central, Perú. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 95, e955295. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2024.95.5295>.
- Smith, N.** (2015). *Palms and People in the Amazon*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05509-1>
- Souza, P. N. S., Andrade, F. H. P., Acevedo, A. M., Nietsche, S., Ribeiro, L. M., Lopes, P. S. N.** (2023). Morphoagronomic diversity in *Butia capitata* progenies (Arecaceae). *Euphytica*, 219, 81. <https://doi.org/10.1007/s10681-023-03203-3>
- Vargas, A. & Blanco, F. A.** (2000). Fruit characterization of *Cocos nucifera* L. (ARECACEAE) cultivars from the Pacific coast of Costa Rica and the Philippines. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 47, 483-487. <https://doi.org/10.1023/A:1008771122733>
- Vianna, S., Berton, L. H., Pott, A., Gerreiro, S. M., Colombo, C. A.** (2017). Biometric Characterization of Fruits and Morphoanatomy of the Mesocarp of *Acrocomia* Species (Arecaceae). *International Journal of Biology*, 9(3), 78-92. <https://doi.org/10.5539/ijb.v9n3p78>

Artículo original

Un megaherbívoro invasor al descubierto: ecología de la población de hipopótamos (*Hippopotamus amphibius*) en Colombia

Uncovering an invasive mega-herbivore: the ecology of the hippos population (*Hippopotamus amphibius*) in Colombia

© Rafael Moreno-Arias^{1,2,*}, © Laura J. Nova-León¹, © Lina M. García-Loaiza¹,
© María P. Bapstiste¹, © Olga L. Montenegro-Díaz³, © Hugo F. López Arévalo³,
© Camilo Loaiza^{1,3}, © David Santamaría-Castiblanco¹, © Gina Diaz-Rodríguez^{1,3}

¹ Centro de colecciones y gestión de especies, Instituto Humboldt, Bogotá, D.C., Colombia

² Grupo de morfología y ecología evolutiva, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

³ Grupo en conservación y manejo de vida silvestre, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

Resumen

Debido a las condiciones climáticas y ecológicas favorables de los ecosistemas colombianos, la población de hipopótamos introducida en los años 80 en el país, se ha incrementado y ahora se distribuye desde el valle medio del río Magdalena en Antioquia hasta la depresión momposina en Bolívar. Recientemente, el gobierno nacional declaró al hipopótamo como una especie invasora por los efectos negativos que causa su presencia en los ecosistemas, los medios de subsistencia y la vida de las personas. Se hizo un extenso estudio demográfico para determinar el tamaño y la estructura de la población de hipopótamos, describir su distribución espacial y proyectar su dinámica poblacional futura. Usando múltiples técnicas, se obtuvieron registros directos e indirectos que permitieron estimar una población de al menos 181 hipopótamos distribuidos en siete grupos, de los cuales cinco se encuentran en etapas avanzadas de invasión biológica. Dada la estructura y el tamaño poblacional estimados, se espera que la población llegue a mil individuos alrededor del 2040 si no se implementan medidas urgentes para su erradicación.

Palabras clave: Área de distribución de uso; Análisis de viabilidad poblacional; Dinámica de poblaciones; Especies invasoras; Metapoblaciones; Aeronaves no tripuladas.

Abstract

Due to the favorable climatic and ecological conditions offered by Colombian ecosystems, the hippo population introduced into the country in the 1980s has increased and now it has spread from the middle valley of the Magdalena River in Antioquia to the Mompós Depression in Bolívar. Recently, the Colombian government declared it as an invasive species for its negative effects on the ecosystems and people's lives and livelihoods. In this context, we conducted a demographic study to estimate the population size and structure, describe its spatial distribution, and project the population dynamics into the future. We used direct and indirect records to estimate a population of at least 181 hippos distributed in seven groups, five in advanced stages of biological invasion. Given their current structure and size, the hippo population will reach 1,000 individuals around 2040 if no urgent eradication actions are taken.

Keywords: Utilization distribution area; Invasive species; Population dynamics; Population viability analysis; Unmanned Aircrafts.

Citación: Moreno-Arias R, *et al.* Un megaherbívoro invasor al descubierto: ecología de la población de hipopótamos (*Hippopotamus amphibius*) en Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):564-581, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2647>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

***Correspondencia:**

Rafael Moreno Arias;
rafamorearias@gmail.com

Recibido: 27 de mayo de 2024

Aceptado: 8 de agosto de 2024

Publicado en línea: 29 de agosto de 2024



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

Introducción

El hipopótamo (*Hippopotamus amphibius*) es el tercer mamífero terrestre más grande del mundo, con un tamaño de tres metros y un peso de hasta 3,2 toneladas (Eltringham, 1999). En África se estiman entre 114.140 y 129.990 individuos distribuidos en 37 países, de los cuales Zambia y Tanzania tienen las poblaciones más grandes, con 45.000 y 20.000 individuos, respectivamente (Lewison & Pluhaček, 2017). A partir de cuatro hipopótamos introducidos en la década de 1980, se estableció en Colombia la única población fuera de su área de distribución nativa (INDERENA, 1994; MAVDT, 2009), que, para el 2020, se estimaba en 85 individuos (Shurin *et al.*, 2020), con un crecimiento proyectado de 1.400 individuos para el 2039 (Castelblanco-Martínez *et al.*, 2021a). Debido a su alto potencial de crecimiento (Subalusky *et al.*, 2019; Castelblanco-Martínez *et al.*, 2021a) y a los impactos negativos de su presencia en los ecosistemas acuáticos (Shurin *et al.*, 2020) y las especies nativas (Castelblanco-Martínez *et al.*, 2021b), así como en los humanos y sus medios de subsistencia (Valderrama-Vásquez, 2012; *El Espectador*, 2020, 2021), el gobierno colombiano declaró al hipopótamo como una especie invasora (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible-MADS, 2022).

El hipopótamo habita las sabanas y bosques ecuatoriales africanos y las actividades de su ciclo de vida, principalmente la reproducción y la lactancia de las crías, ocurren en ecosistemas acuáticos y terrestres, por lo que se considera un animal de hábitos semi-acuáticos (Eltringham, 1999; Chansa *et al.*, 2011a; Lewison & Pluhaček, 2017). Aunque es principalmente herbívoro, se puede alimentar de carroña en condiciones de escasez de recursos (Kingdon, 2008). Los hipopótamos son prolíficos y longevos, inician su reproducción a los cinco años, tienen un estrecho cuidado parental y a lo largo de su vida, hasta los 45 años, pueden tener hasta 25 crías (Eltringham, 1999; Wheaton *et al.*, 2006; Lewison & Pluhaček, 2017). Son animales gregarios que viven en grupos con una sólida estructura social y una gran capacidad de defenderse de sus depredadores (Ruggiero, 1991; Blowers, 2008), lo que repercute en una alta supervivencia, especialmente en condiciones de amplia disponibilidad de recursos.

La disponibilidad de recursos, temporal y espacialmente discontinua debido a las características climáticas de su área de distribución nativa, regula la dinámica de los hipopótamos y determina la cohesión y estructura temporal y espacial de los grupos poblacionales (Stears *et al.*, 2019, 2021). Por su capacidad de estructurarse espacialmente dependiendo de la disponibilidad de recursos, se los considera como una metapoblación que depende de la dispersión de individuos a través de parches de hábitat similares (Levins, 1969; Schtickzelle & Quinn, 2017).

Las poblaciones de hipopótamos en África responden principalmente a la dinámica de las sequías típica de ese continente, la cual determina la disponibilidad de los recursos hídricos y alimentarios necesarios para su subsistencia (Lewison, 2007). Por su comportamiento gregario y su estructura social, cuando hay alta disponibilidad de recursos las poblaciones se distribuyen en manadas dominadas por los individuos más grandes, que mantienen los límites territoriales y una cohesión en función de los recursos necesarios según el tamaño del grupo (Blowers, 2008; Pluhaček & Steck, 2015; Stears *et al.*, 2019, 2021). Cuando el tamaño del grupo aumenta, los individuos dominantes regulan la sobrepoblación expulsando a otros hipopótamos que retan su rol de dominancia. Así, los hipopótamos expulsados cumplen el papel de dispersión de la especie y el establecimiento de nuevos grupos en otras áreas de su hábitat (Roth *et al.*, 2004).

En condiciones de sequía algunos grupos se fusionan para sobrevivir en zonas con una disponibilidad de recursos aceptable (Laws & Clough, 1966; Stears *et al.*, 2019), pero otros, sometidos a condiciones drásticas de poca disponibilidad de recursos, pueden extinguirse a nivel local, principalmente por la inanición que promueve la aparición de enfermedades y el aumento de la vulnerabilidad de los animales débiles y enfermos frente a la depredación, que normalmente no es alta en condiciones de abundancia de recursos (Stears *et al.*, 2019, 2021). Cuando las condiciones de los recursos mejoran, los grupos

se dividen nuevamente y colonizan nuevas áreas, o realimentan poblaciones remanentes para continuar con la dinámica de la población asociada a la disponibilidad de los recursos (Stears *et al.*, 2019).

Por las características mencionadas, se predice que la población de hipopótamos en Colombia seguirá incrementando rápidamente por la oferta abundante y continua de recursos alimentarios y acuáticos, y por la falta de controladores poblacionales, ya sean competidores, depredadores o sequías prolongadas (Castelblanco-Martínez *et al.*, 2021). También se espera que la dinámica metapoblacional se incremente gracias a la conectividad hídrica constante que ofrecen los ecosistemas acuáticos en Colombia. En este contexto, en este estudio nos propusimos determinar el estado poblacional actual del hipopótamo en Colombia a partir de sus atributos demográficos y su ecología espacial, y predecir su dinámica poblacional espacial y temporal en el futuro.

Materiales y métodos

Área de estudio y muestreo

El estudio se enfocó en los ecosistemas acuáticos permanentes (7.964 Km²) dentro del área potencial de distribución del hipopótamo (43.342 Km²), la cual se extiende por las regiones fisiográficas del valle medio del río Magdalena y la depresión momposina (Moreno-Arias *et al.*, 2021) que hacen parte de la ecorregión de los bosques húmedos del Urabá y Magdalena (Dinerstein *et al.*, 2017) (Figura 1).

El área de estudio comprende unidades climáticas con regímenes de precipitación monomodal biestacional en la depresión momposina y bimodal tetraestacional en el valle del río Magdalena, con precipitaciones que varían entre los 1.400 y 2.600 mm, ocurriendo las mayores entre septiembre y noviembre en ambos regímenes, así como entre abril y junio en el régimen bimodal (Rangel-Ch & Carvajal-Cogollo, 2013). El comportamiento hidrológico de los principales ríos de la región sigue el ritmo de las precipitaciones con retraso de un mes, los cambios entre el estiaje (diciembre a abril) y las crecientes (mayo y noviembre) son poco bruscos (García-Lozano, 2001). El muestreo se hizo en dos momentos, el primero en noviembre de 2021 y el segundo en marzo, julio y septiembre de 2022, en un área de cerca de 1.720 Km de ecosistemas lóticos y 115 Km² de ecosistemas lénticos.

Además de los hipopótamos, la cuenca está amenazada por otras especies con potencial invasor como el pez basa y el jacinto de agua, o por el mal manejo de especies domesticadas como el búfalo (Salgado *et al.*, 2022), amenazas que se suman a la alta sedimentación, la contaminación por minería ilegal, la deforestación y los cambios hidrológicos asociados a las represas para producción de energía (Salgado *et al.*, 2022).

Presencia y abundancia

Se utilizaron cinco técnicas de muestreo para detectar la presencia, el número y el tamaño de los hipopótamos; en la medida en que las características físicas de los ecosistemas lo permitieran, en cada sitio se implementaron todas las técnicas con excepción de los sitios que hicieron parte de la investigación socioecológica (Cárdenas-Botero *et al.*, 2022). Las técnicas se aplicaron en la franja horaria de actividad diurna de la especie: de las 6:00 a las 18:00 (Inman *et al.*, 2019).

Puntos de conteo. Esta técnica, utilizada ampliamente en censos de hipopótamos (Chansa *et al.*, 2011b, Chansa & Milanzi, 2011; Chomba *et al.*, 2012), consistió en hacer observaciones con binoculares desde puntos fijos en tierra firme distribuidos alrededor de las riberas y se empleó principalmente en los ecosistemas lénticos cuya extensión fuera menor a 0,1 Km² y cuya vegetación acuática no impidiera la observación de la totalidad del espejo de agua. El número de puntos de conteo varió dependiendo del tamaño del cuerpo de agua; en cada uno de ellos por lo menos tres personas registraban por separado el número de individuos. Con el objeto de registrar individuos que estuvieran sumergidos u ocultos detrás de individuos más grandes, el conteo se repitió tres veces. Cada conteo

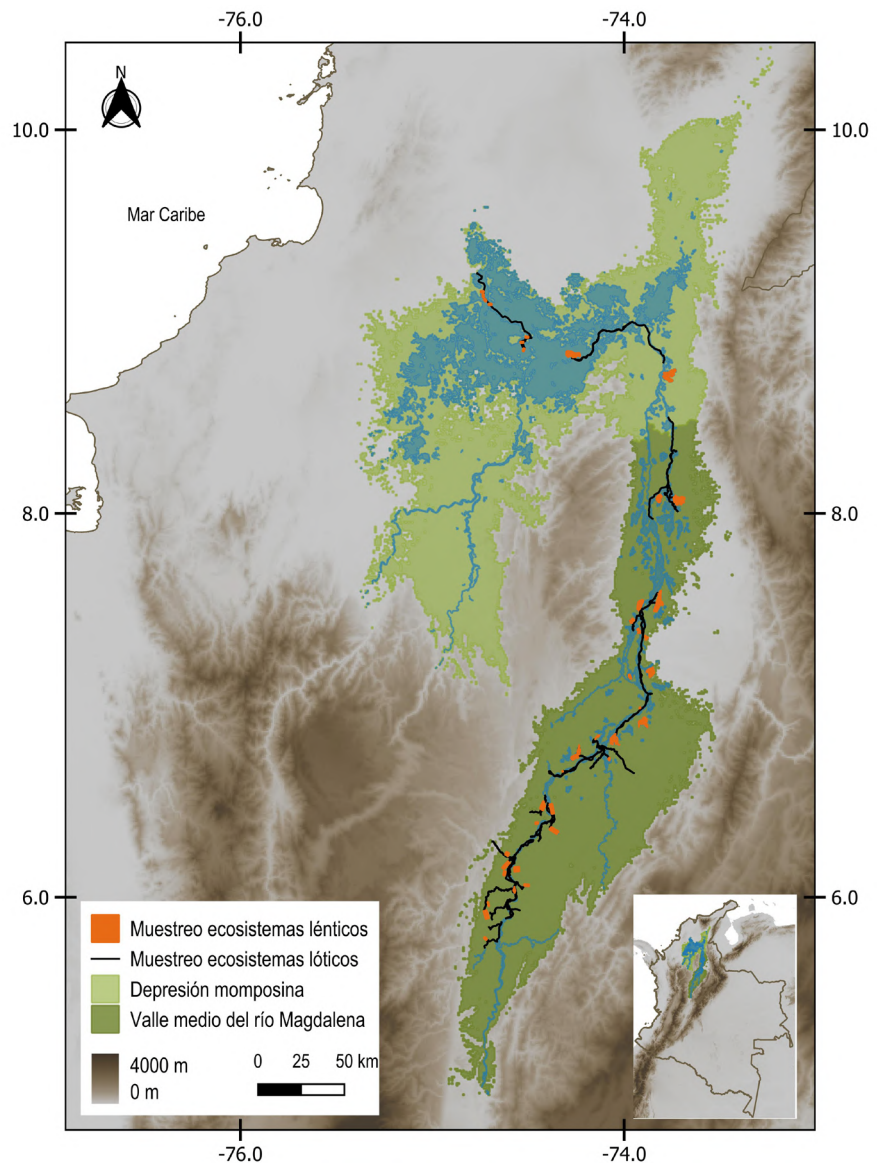


Figura 1. Área de estudio y muestreo

duraba entre uno y tres minutos, con intervalos de tres minutos determinados con base en dos criterios: el primero, el tiempo de inmersión (cuatro a seis minutos) de los hipopótamos (Eltrinhams, 1999), y el segundo, la reducción al máximo del tiempo de exposición de los investigadores a posibles embestidas o ataques de los hipopótamos.

Recorridos de observación. Esta técnica utilizada para detectar organismos acuáticos y semiacuáticos y sus rastros (Bennet *et al.*, 2000; Bennet *et al.*, 2005; Groenendijk *et al.*, 2005) consistió en navegar el cuerpo de agua, o caminar alrededor si no era posible la navegación, para detectar directamente a los hipopótamos o revisar las riberas en busca de evidencias indirectas de su presencia, y se implementó principalmente en ecosistemas lóticos. La búsqueda de rastros se hizo en los mismos sitios escogidos para los puntos de conteo, explorando exhaustivamente el terreno para encontrar huellas, senderos y heces. Las huellas se fotografiaron para analizarlas posteriormente y determinar si correspondían a más de un individuo. La navegación se hizo a velocidades menores a 10 km/h siempre y cuando las condiciones de navegabilidad lo permitieran.

Vuelos con drones. Esta técnica se ha utilizado recientemente para censar hipopótamos, determinar su tamaño corporal y reducir el riesgo de ataques a los observadores (Linchant et al., 2018; Inman et al., 2019; Fritsch & Downs, 2020; Inman & Leggett, 2022). Consistió en hacer vuelos de exploración de los espejos de agua para la obtención de videos de alta resolución (4K UHD), siguiendo la metodología de Inman et al., (2019), la cual describe sobrevuelos a alturas preestablecidas con la cámara posicionada perpendicularmente con respecto al terreno para realizar videos de la interfaz entre el espejo de agua y la tierra. Se utilizaron drones DJI Mavic Enterprise y Phantom 4; los vuelos se hicieron en las mismas horas del día y a 100 metros de altura medidos desde la superficie del agua. Esta técnica fue la preferida en los cuerpos de agua lénticos con altas concentraciones de gramíneas en la orilla, lo que imposibilitaba el empleo de las otras técnicas. Posteriormente, los videos se revisaron para contar los hipopótamos y estimar su tamaño corporal en cada cuerpo de agua sobrevolado.

Entrevistas no estructuradas. Esta técnica consistió en entrevistar a los habitantes de las riberas o usuarios frecuentes de los cuerpos de agua que se encontraron durante los recorridos de observación y los puntos de conteo. En la charla informal se indagó sobre los siguientes aspectos: a) si habían visto personalmente a los hipopótamos o sus rastros; b) el número de individuos; c) la presencia de crías; d) la fecha del avistamiento, y e) el lugar del avistamiento. Los registros así obtenidos se consideraron para los análisis solamente si los hipopótamos o los rastros habían sido observados directamente por el entrevistado y en los casos en que no se hubieran encontrado evidencias de presencia con las técnicas anteriores.

Entrevistas de investigación socioambiental. Esta técnica la empleó el equipo de investigación social que paralelamente desarrollaba actividades en el área de estudio. Se les solicitó que incluyeran las mismas preguntas de las entrevistas no estructuradas en los instrumentos de investigación que implementaron: entrevistas semiestructuradas, talleres y encuestas (Cárdenas-Botero et al., 2022). Solamente se incluyeron los registros que cumplieron las mismas condiciones de las entrevistas no estructuradas o si correspondían a registros por fuera de las localidades muestreadas.

Todos los registros directos e indirectos de la presencia de hipopótamos se georreferenciaron directamente en campo, en tanto que los provenientes de las entrevistas se georreferenciaron con base en la información del lugar ofrecida por el entrevistado, validada con las diferentes capas de información cartográfica abierta del IGAC (2022).

Distribución espacial

Para documentar la distribución espacial de la población, se analizaron los registros según el uso del espacio estimado con el método *kernel use distribution* (KUD) (Worton, 1989) utilizado para determinar ámbitos de hogar. A diferencia de la interpretación en los análisis de ámbito de hogar, que indican el área utilizada por uno o varios animales para sus actividades diarias relacionadas con el ciclo de vida de la especie, o la representación espacial de la interacción entre el entorno y la comprensión de un animal (mapa cognitivo) (Powell, 2000; Börger et al., 2008; Calenge, 2011), en este caso las áreas con mayor y menor concentración de registros se interpretaron respectivamente como áreas de establecimiento y áreas de movimiento. A partir de la representación gráfica de las áreas mencionadas, se determinó la distribución espacial continua o discreta de los grupos poblacionales de hipopótamos. Para determinar el área de distribución de uso de la población de hipopótamos, se construyó la distribución de probabilidad de los registros de presencia con el estimador de densidad KUD (Worton, 1989), que se aplica en ecología espacial como un método para visualizar el ámbito de hogar de los animales. Este método asigna en una superficie X y Y una densidad de probabilidad basada en el número y la cercanía de los registros de los animales, sobreponiendo una cuadrícula para estimar el valor promedio de densidad en cada celda que intersecta con la superficie de densidad de probabilidad (Burgman & Fox, 2003). A partir de dicha cuadrícula se pueden delimitar: 1) las áreas del área de distribución de uso que incluyen el 95 % de la densidad y que en este caso se interpretan como lugares

de tránsito o dispersión de individuos, y 2) las áreas núcleo con el 50 % de la densidad, que representan los lugares en donde los animales concentran la mayoría de las actividades del ciclo de vida, como la alimentación y la reproducción.

Aunque el estimador KUD fue originalmente diseñado para calcular densidades de uso de animales marcados y subsecuentemente registrados en un área, esta aproximación puede aplicarse a zonas en las que subsecuentemente se avistan los animales, sea el mismo individuo o no. El trasfondo del método es determinar áreas de concentración de actividad de los animales para así estudiar las razones causantes de dicha concentración. Ambos tipos de enfoque se han utilizado para delimitar ámbitos de hogar de individuos, de grupos de individuos o de poblaciones, así como para determinar comportamientos de dispersión y establecimiento de hipopótamos pigmeos (Bogui *et al.*, 2016) y otros animales semiacuáticos (Balaguera *et al.*, 2016; Moreno-Arias & Ardila-Robayo, 2020).

El análisis de área de distribución de uso se hizo con el paquete de R adehabitatHR (Calenge, 2021) utilizando la función kernelUD configurada con el método de suavizado h, recomendado para calcular la distribución de uso (Worton, 1989), y con una rejilla de tamaño 5000, que resultó en una cuadrícula de 4226 x 5000 celdas de ~ 250 m x 250 metros que abarcó la totalidad de los registros.

Demografía

Para caracterizar la demografía de los hipopótamos se tuvieron en cuenta dos atributos de la población: el número de individuos como una aproximación del tamaño de la población y la estructura basada en las clases de tamaño de la especie, propuesta por Chomba (2016). El tamaño de la población se obtuvo con procedimientos específicos en cada técnica utilizada.

1) En la técnica de puntos de conteo, cuando hubo más de tres puntos fijos y un número diferente de hipopótamos en cada uno, se utilizó el método de la fracción visible (Messel *et al.*, 1981); cuando los conteos de los observadores resultaron en el mismo número de hipopótamos, se consideró ese número como el tamaño mínimo de la población en ese sitio. El método de la fracción visible se utiliza para estimar la abundancia de organismos semiacuáticos como los crocodilianos, y busca estimar el número de individuos que no se logra detectar, ya sea porque temporalmente están sumergidos o están ocultos por elementos del hábitat, a partir de una serie de observaciones consecutivas y los estadísticos de la distribución de las observaciones. La fracción visible (p) y el tamaño de la población (N) con su respectivo intervalo de confianza se calculan según las siguientes fórmulas:

$$p = \frac{m}{(2s + m) * 1.05} \quad N = \frac{\max}{p} \pm \frac{[1.96 * s]^2}{p}$$

donde m corresponde al promedio de individuos observados en los conteos, s a su desviación típica y \max al número máximo de individuos observados en los conteos.

2) Para la cuantificación de los rastros se tuvieron en cuenta dos criterios. El primero buscó determinar si los rastros pertenecían a un mismo individuo en el mismo lugar, para lo cual se estimó el tamaño relativo de las huellas con relación a la más grande (huella mediana ~ ½ de la grande y pequeña ~ ¼ de la grande). Con este fin se tomaron fotografías de las huellas con una escala de referencia y se analizaron en el programa ImageJ (Schneider *et al.*, 2021) para cuantificar su tamaño. El segundo apuntaba a determinar si los rastros correspondían a diferentes individuos o grupos en las distintas localidades muestreadas en el mismo periodo; se consideró que se trataba de un mismo grupo o individuo si los rastros se encontraban dentro de un radio menor a 500 metros. El tamaño poblacional correspondió a la suma de los rastros que se pudieron establecer como de un solo individuo.

3) Para la técnica de vuelos con drones, se proyectaron los videos en una pantalla de 120 pulgadas con resolución de 1080p para la observación simultánea de seis personas, con el fin de detectar a los hipopótamos en el área sobrevolada y determinar el tamaño poblacional.

4) Para las técnicas de entrevistas, se agruparon todos los registros hechos dentro de cada área de distribución de uso (KUD 95 %) que no se traslapa con otros ámbitos. Se promedió el número de individuos referidos por cada entrevistado en cada uno de los registros y ese número se consideró como el tamaño para esa población. Este número se multiplicó por tres teniendo en cuenta que la historia natural del hipopótamo ha establecido que los grupos aislados se componen de por lo menos un macho y dos hembras, o un macho, una hembra y una cría; ese número representó el tamaño máximo estimado de la población.

Para cada sitio se escogió el mayor número de hipopótamos registrado independientemente de si se había usado más de una técnica; posteriormente se sumaron los valores de los sitios según su pertenencia a cada área de distribución de uso (KUD 95 %) y esa sumatoria representó el tamaño de la población para cada grupo de hipopótamos.

Para conocer la estructura de la población se siguió el método de **Inman *et al.*** (2019): se tomaron capturas de pantalla durante la revisión de los videos usando un reproductor VLC (**VideoLan**, 2006); se midieron en píxeles los individuos desde la punta del hocico hasta la base de la cola usando el programa ImageJ (**Schneider *et al.***, 2021) y, posteriormente, las medidas en píxeles fueron transformadas a un sistema métrico partiendo de que el área de muestreo del suelo de las imágenes fue de 5,2 centímetros/píxel según la relación:

$$\frac{\text{Ancho del sensor (mm)} * \text{Altura del vuelo (mm)}}{\text{Longitud focal (mm)} * \text{Ancho de la imagen (píxeles)}}$$

La estructura de la población se describió con un histograma de frecuencias, resaltando los límites de tamaño de crías y juveniles (<1,5 m), subadultos (1,51-2,3 m) y adultos (>2,3 m), según la propuesta de **Chomba** (2016).

Dinámica poblacional del hipopótamo

Para documentar la dinámica poblacional temporal se siguieron dos aproximaciones. La primera documentó la dinámica temporal a corto plazo a partir de la comparación gráfica de los tamaños poblacionales de los cinco sitios con más hipopótamos en las temporadas de aguas altas y bajas. La segunda documentó la dinámica a largo plazo a partir de una modelación con análisis de viabilidad de poblaciones estocásticas.

Los parámetros utilizados para la modelación fueron el tamaño total de cada población, los atributos reproductivos, la capacidad de carga y las tasas vitales utilizadas en análisis similares (**Castelblanco-Martínez *et al.***, 2021a), así como la dispersión potencial entre poblaciones. Los datos de dispersión se basaron en la hipótesis de desplazamiento de al menos tres individuos desde el origen de la invasión hasta la ciénaga de Tacasaluma, Magangué, Bolívar, en un movimiento de 354 Km en 17 años estimados desde 1994, cuando se detectaron los primeros escapes, hasta el 2011, cuando se registró la presencia de la especie por primera vez en Magangué. Con esos valores se calculó una tasa de dispersión de 0,0005 individuos *km/año que luego se estimó para cada par de poblaciones teniendo en cuenta la distancia entre los centroides de su respectivo ámbito de hogar.

La dinámica futura de la metapoblación se modeló con el programa Vortex (**Lacy & Pollak**, 2020) hasta el año 2060, iterando cien veces para cada grupo poblacional y usando la misma capacidad de carga (215 individuos) para todos los grupos poblacionales. La proyección se modeló bajo dos escenarios: con los valores de depresión endogámica que el programa trae por defecto, y el máximo valor de depresión endogámica sugerido por el programa (**Lacy & Pollak** 2020) y que se esperaría en una población fundadora de apenas cuatro individuos.

Resultados

Presencia y distribución

Se identificaron siete grupos poblacionales o poblaciones espacialmente discretas (**Figura 2**). Seis de estos grupos siguieron un patrón de poblaciones espacialmente contiguas (de sur a norte) a partir de la zona de origen de la invasión (Puerto Triunfo, Antioquia) hasta el

norte de los municipios de Yondó (Antioquia) y Barrancabermeja (Santander). El séptimo grupo de hipopótamos, aislado de los anteriores, se ubicó en la zona norte del municipio de Magangué (Bolívar) (**Figura 2**).

Aunque se contaba con registros históricos de la presencia de hipopótamos (**Moreno-Arias et al., 2021**) desde el sur de la depresión momposina (incluido el sur de la ciénaga de Zapatos) hasta el norte del Magdalena medio (corregimiento de Bodega Central, Morales, Bolívar), en el presente estudio no se logró obtener información que permitiera corroborar la presencia de la especie en esta zona. No obstante, se obtuvo información de su presencia en el complejo cenagoso de Torcoroma, en el corregimiento de Terraplén (San Martín, Cesar), la cual debe ser corroborada.

En cuanto a los grupos poblacionales contiguos, el tamaño de las áreas de distribución de uso y núcleo aumentó de sur a norte (**Figura 2**). El grupo de Hacienda Nápoles y Doradal (de aquí en adelante grupo Nápoles), con un área de 8,3 Km²; el grupo Río Cocorná, con 38,3 Km²; el grupo Quebrada Tolones (de aquí en adelante grupo Tolones), con 85,3 Km²; el grupo Nare, con 239,3 Km²; el grupo Berrío, con 859,5 Km², y el grupo Yondó, con 1846,9 Km². El grupo Momposina presentó un área de distribución de uso de 106,9 Km². El tamaño de las áreas núcleo de los grupos contiguos en su extremo fue de 2,2 Km² (Nápoles) y 390,6 Km² (Yondó).

Demografía

Se obtuvieron 187 registros de la especie (153 por observación directa y 34 registros indirectos), de los cuales 177 (95 %) correspondieron a avistamientos recientes (2018 a 2022) y solamente diez (5 %) fueron individuos observados en los últimos quince años en Magangué, Bolívar: en el sector de Guazo en el 2008 y en la ciénaga de Tacasaluma en el 2011; en la parte alta del río La Miel en 2011 (Sonsón, Antioquia) y en el río Magdalena en

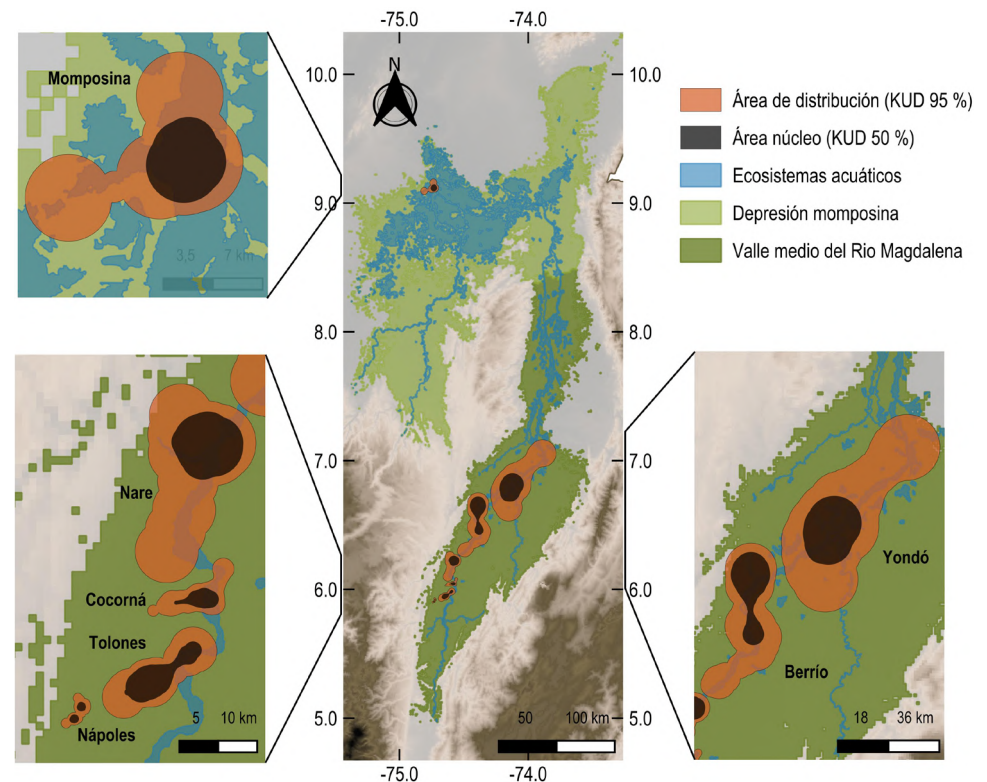


Figura 2. Grupos poblacionales o poblaciones espacialmente estructuradas, área de distribución (KUD 95 %) y área núcleo (KUD 50 %)

2006 y 2015 (Puerto Berrío y Puerto Nare, Antioquia). La población total observada fue de 169 individuos con una población mínima estimada de 181 ± 13 individuos y máxima de 215 ± 13 individuos, distribuida en siete grupos o poblaciones espacialmente estructuradas de la siguiente manera:

Grupo Nápoles, con un tamaño poblacional estimado de 117 individuos (114 observados y un tamaño máximo de la población de 122 individuos) que habitan un área aproximada de $8,3 \text{ Km}^2$ y concentran sus actividades en dos áreas núcleo que suman $2,2 \text{ Km}^2$ asociadas a los lagos de la Hacienda Nápoles y a los ecosistemas acuáticos del corregimiento de Doradal. Es el grupo más denso, con una densidad máxima estimada de 15 hipopótamos/ Km^2 (**Figura 2**).

Grupo Tolones, con un tamaño poblacional estimado de siete individuos (seis observados, y un tamaño máximo de la población de 12 individuos) que habitan un área aproximada de $85,3 \text{ Km}^2$ y concentran sus actividades en un área núcleo de $31,3 \text{ Km}^2$ asociada a los ecosistemas acuáticos de la llanura de inundación de la quebrada Tolones hasta su desembocadura en el río Magdalena e islas adyacentes. Su densidad es de 0,14 hipopótamos/ Km^2 (**Figura 2**).

Grupo Río Cocorná, con un tamaño poblacional estimado de 31 individuos (31 observados y un tamaño máximo de la población de 31 individuos) que habitan un área aproximada de $38,3 \text{ Km}^2$ y concentran sus actividades en un área núcleo de $9,3 \text{ Km}^2$, y están asociadas a los ecosistemas acuáticos de la llanura de inundación del río Cocorná sur y la Isla del Silencio en el río Magdalena. Su densidad es de 0,8 hipopótamos/ Km^2 (**Figura 2**).

Grupo Nare, con un tamaño poblacional estimado de cinco individuos (tres observados y un tamaño máximo de la población de 12 individuos) que habitan un área aproximada de $239,3 \text{ Km}^2$ y concentran sus actividades en un área núcleo de $61,2 \text{ Km}^2$ asociada a los afluentes del río Magdalena desde el río Nare hacia el norte, en jurisdicción del municipio de Puerto Nare. Su densidad es de 0,04 hipopótamos/ Km^2 (**Figura 2**).

Grupo Berrio, con un tamaño poblacional estimado de nueve individuos (cinco observados y un tamaño máximo de la población de 15 individuos) que habitan un área aproximada de $859,5 \text{ Km}^2$ y concentran sus actividades en un área núcleo de $256,8 \text{ Km}^2$ asociada al río Magdalena y los ecosistemas acuáticos que forman parte de su llanura de inundación desde la cuenca del Caño Negro (Cimitarra, Santander) hasta el río San Bartolomé (Puerto Berrío, Antioquia). Su densidad es de 0,02 hipopótamos/ Km^2 (**Figura 2**).

Grupo Yondó, con un tamaño poblacional estimado de cuatro individuos (tres observados y un tamaño máximo de la población de 9 individuos) que habitan un área estimada de $1846,9 \text{ Km}^2$ y concentran sus actividades en un área núcleo de $390,6 \text{ Km}^2$ asociada al río Magdalena y los ecosistemas acuáticos que forman parte de su llanura de inundación desde el norte del complejo cenagoso de Barbaças (Yondó, Antioquia) hasta el complejo cenagoso de Sardinata (Yondó, Antioquia). Su densidad es de 0,0005 hipopótamos/ Km^2 (**Figura 2**).

Grupo Momposina con un tamaño poblacional estimado de cinco individuos (cuatro observados y un tamaño máximo de la población de 12 individuos) que habitan un área aproximada de $106,9 \text{ Km}^2$ y concentran sus actividades en un área núcleo de $26,1 \text{ Km}^2$ asociada a la ciénaga de Tacasaluma, sur de la ciénaga de Gallinazo, ciénaga de Guayacán y los caños asociados al complejo de esas ciénagas de Magangué, Bolívar. Su densidad es de 0,1 hipopótamos/ Km^2 (**Figura 2**).

La estructura poblacional basada en 82 individuos que se lograron medir completamente presentó una forma de pirámide, con una población en crecimiento y alta capacidad reproductiva y de reclutamiento, en la cual las clases de tamaño de crías y juveniles (38 %) dominan la base de la pirámide, seguidas por los subadultos (34 %) y los adultos (28 %) (**Figura 3**). Se evidenció un decrecimiento de crías y juveniles con el subsecuente incremento de subadultos en los años 2021 y 2022, lo que indica una población con un rápido crecimiento corporal y maduración sexual (**Figura 3**).

Dinámica poblacional

La dinámica temporal de corto plazo de la población de hipopótamos, obtenida a partir de los 11 sitios con el mayor número de individuos registrados, mostró una disminución general de individuos de 0,8 % entre la época de aguas altas de 2021 hasta el final de la primera temporada de aguas bajas de 2022 (116 individuos y 109 individuos, respectivamente), en tanto que, por sitio, cinco presentaron incrementos de un año a otro y los otros seis, decrecimientos (**Figura 4**).

La dinámica temporal de la metapoblación a largo plazo fue similar en las proyecciones basadas en una baja y una alta depresión endogámica (**Figura 5**), ambas con un rápido crecimiento de 9 % y 8 % anual que alcanzó la capacidad de carga en los años 2044 y 2041, estabilizándose en alrededor de 1.250 individuos en el año 2060, pero con una

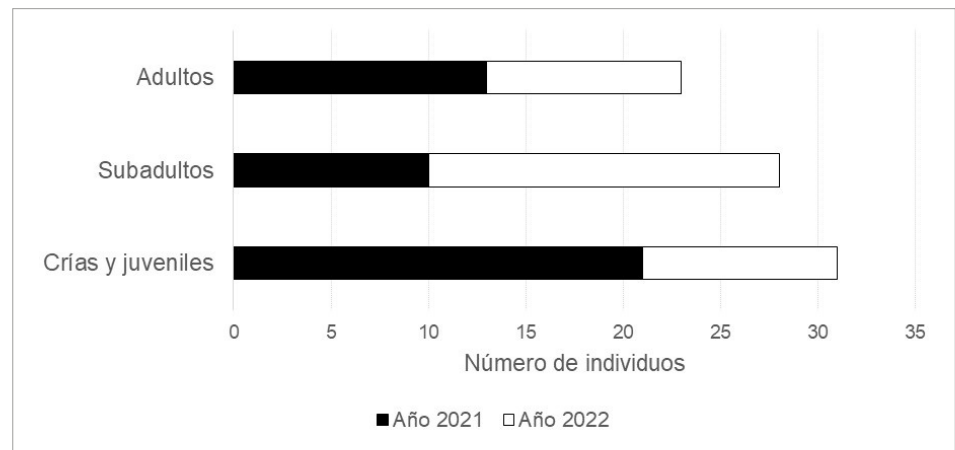


Figura 3. Estructura de tamaños de la población de hipopótamos

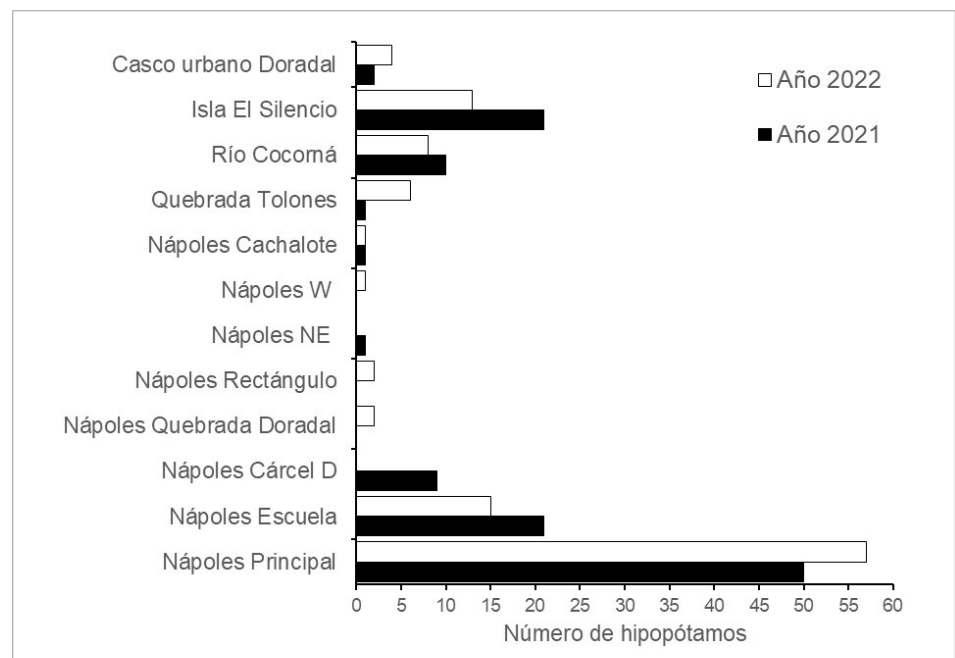


Figura 4. Dinámica de los grupos poblacionales más grandes entre la segunda temporada de aguas altas del año 2021 y la primera temporada de aguas bajas de 2022

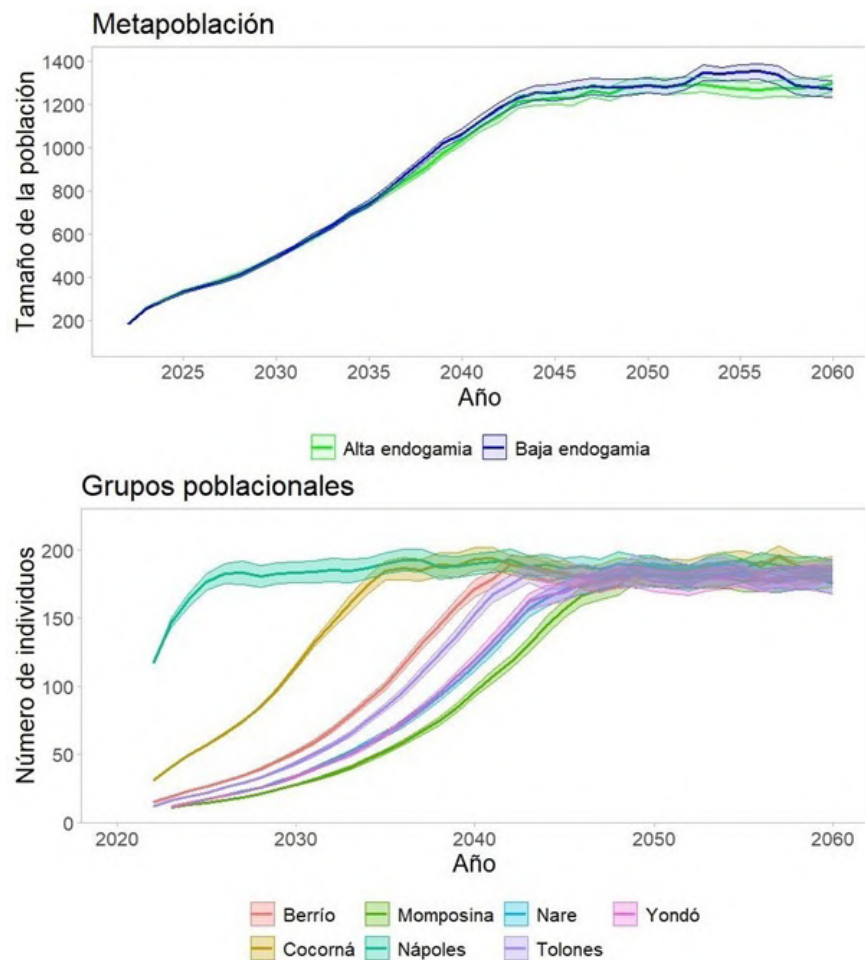


Figura 5. Dinámica de la metapoblación en escenarios de baja y alta depresión endogámica (arriba) y de los grupos poblacionales (abajo) entre los años 2022 y 2060. La línea indica la trayectoria del tamaño de la población y el área asociada es el intervalo de confianza de 95 %.

mayor fluctuación en la de baja endogamia. La mayor velocidad de crecimiento ocurrirá alrededor del año 2035, cuando haya 743 ± 7 individuos en condiciones de baja depresión endogámica y 738 ± 6 en condiciones de alta depresión (Figura 5).

Por grupo poblacional, se espera que la población más grande alcance su mayor tamaño (215 individuos) en los próximos tres años (Figura 5). Además, en esos mismos años se estima que esta población crezca a una tasa anual de 26 % a 25 % bajo condiciones de baja y alta depresión endogámica, respectivamente. Para los grupos restantes, se espera que lleguen a su máxima velocidad de crecimiento cuando tengan alrededor de 105 individuos, estimando que esto ocurrirá en el 2030 para el grupo Cocorná, en el 2036 para el Berrío, en el 2037 para el Tolones, en el 2039 para el Nare y el Yondó y en el 2042 para el Momposina. En esos años se proyecta un crecimiento anual entre el 10 % (grupo Momposina con alta depresión endogámica) y el 15 % (grupo Cocorná) con variaciones del 1 % según la condición endogámica modelada (Figura 5).

Discusión

La aplicación conjunta de múltiples técnicas de muestreo permitió estimar que el tamaño actual de la población de hipopótamos es de mínimo 181 y máximo 215 individuos que se distribuyen en un área de 3184 Km², lo que representa una ocupación del 7 % del

área potencial de distribución. Aunque el esfuerzo de muestreo fue amplio y abarcó todos los ecosistemas aptos para el hipopótamo en diferentes épocas climáticas (aguas altas y bajas), aún existe una amplia extensión de hábitat en la cual pueden existir otros grupos de hipopótamos. Esta extensión incluye: 1) zonas inundables al occidente del río Magdalena en los municipios de Yondó (Antioquia), así como en Cantagallo y San Pablo (Bolívar), y 2) zonas inundables en el norte del Magdalena Medio, en los municipios de Puerto Wilches (Santander) y Simití (Bolívar), las cuales no se incluyeron en este estudio debido a la presencia de grupos armados ilegales y a las condiciones que limitaron el acceso o la navegación por el cambios en los cursos de agua o su desecación.

Independientemente del número adicional de hipopótamos que se puedan registrar en las zonas mencionadas, dicho tamaño poblacional ubica al país en el puesto 26 de 38 entre los países en los que los hipopótamos se distribuyen (**Lewison & Pluháček**, 2017). Se evidencia, así, el éxito que ha tenido la especie invadiendo parte del territorio colombiano en apenas 29 años. Este proceso de invasión biológica se ha visto favorecido por la ausencia de sequías prolongadas, las cuales predominan en su área de distribución nativa y funcionan como controlador poblacional al limitar los recursos alimentarios y acuáticos (**Lewison**, 2007).

En Colombia la disponibilidad de recursos es estable temporalmente y continua espacialmente, por lo que el factor más importante para la dinámica poblacional de los hipopótamos es el comportamiento, especialmente el de las interacciones entre individuos dominantes y no dominantes que permiten la fusión y división de grupos en función de su densidad (**Roth et al.**, 2004; **Pluhaček & Steck**, 2015; **Stears et al.**, 2019).

La disponibilidad continua de recursos permite una distribución contigua de grupos de hipopótamos en el país. Las zonas de África con climas o recursos estables son las que soportan las poblaciones más grandes de la especie, por ejemplo, la del río Luangwa en Zambia (**Lewison & Pluháček**, 2017). El patrón de contigüidad de los grupos, el gran tamaño poblacional de algunos de ellos (por ejemplo el Nápoles), y en general la gran extensión de los ámbitos de hogar y áreas núcleo de los hipopótamos en Colombia contrasta con el patrón dominante en áreas de África con recursos restringidos y sequías prolongadas en donde los grupos son pequeños (<50 individuos) y dispersos (**Kanga et al.**, 2011; **Scholte & Iyah**, 2016).

La estabilidad de recursos en Colombia también explicaría la respuesta similar observada en la dinámica temporal de corto plazo entre épocas de aguas altas y bajas, y difiere de la documentada en África, que se caracteriza por un mayor número de hipopótamos en aguas bajas ocasionado por la disminución del hábitat acuático (**Ansell**, 1965; **Scotcher**, 1978; **Laws & Clough**, 1966). En ese sentido, dicha estabilidad al crecimiento poblacional rápido y a la nula probabilidad de extinción que se proyectó en el largo plazo. No se descarta que la alta densidad del grupo Nápoles también haya sido influenciada por las medidas de suplementación alimenticia que han hecho Cornare y el parque para la esterilización y para mantener grupos grandes de hipopótamos como una atracción para sus visitantes.

Tomando en cuenta que los grupos poblacionales en Colombia están fuertemente interconectados, se estructuran espacialmente en condiciones similares de hábitat y tienen poca probabilidad de extinción, se puede considerar que los hipopótamos en el país se ajustan a una metapoblación de tipo parches que exhibe alta dispersión y una baja o nula probabilidad de extinción (**Schtickzelle & Quinn**, 2017).

El grupo Momposina es un caso de una población aislada que pudo originarse por una dinámica de dispersión diferente. Una opción plausible es que este grupo se haya formado por una dispersión mediada por el hombre, ya sea por una translocación de hipopótamos que se hizo al Zooparque Los Caimanes, en Buenavista, Córdoba, y que, gracias a las inundaciones frecuentes de la región de La Mojana en donde se ubica el zooparque, algunos individuos se hayan escapado y desplazado hacia el norte, o por el tráfico de individuos como animales de ornato para predios privados, una práctica ilegal que ya ha sido documentada.

No haber encontrado evidencia de hipopótamos al sur de la depresión momposina podría indicar que la continuidad y la gran extensión de hábitat idóneo disminuyen la probabilidad de detección de individuos errantes o grupos pequeños, que bajo las condiciones fisiográficas propias de la subregión de la depresión, las rutas y comportamientos de dispersión de los hipopótamos difieran, haciéndolos menos visibles, o que la dinámica de inundación frecuente diluya los rastros imposibilitando encontrar evidencia de su presencia.

Los atributos demográficos de distribución espacial, tamaño y estructura de los grupos de hipopótamos en Colombia indican claramente que la especie ya se encuentra totalmente establecida y tiene un gran potencial para seguir ocupando áreas dentro del posible hábitat de distribución. La dinámica temporal de largo plazo indicó que seis de los siete grupos poblacionales tendrán un crecimiento entre 10 y 20 % anual, aún bajo las condiciones de baja dispersión entre poblaciones y alta depresión endogámica, y que alcanzarán su máximo crecimiento antes de diez años. Un caso preocupante es el del grupo Nápoles, cuyas proyecciones indican que ya se encuentra en su fase de mayor crecimiento y se acercará a su capacidad de carga en los próximos cinco años.

Ese elevado crecimiento a nivel de grupos se traduce en un crecimiento de la metapoblación a una tasa anual de 8 %, un valor menor al descrito por otros autores (**Castelblanco-Martínez *et al.*, 2021a**). La diferencia radica en que en esta proyección se incluyó la estructura espacial, estructura de edades y la dispersión, factores que inciden diferencialmente en la tasa de crecimiento de cada grupo. Sin embargo, es importante resaltar que el tiempo estimado para que la metapoblación crezca a mayor velocidad fue similar a las estimaciones de **Castelblanco-Martínez *et al.* (2021a)**.

La proyección poblacional de largo plazo mostró una baja estocasticidad demográfica, a pesar de que la población fundadora estaba conformada por cuatro individuos, lo que indica una baja influencia de la posible depresión endogámica como controlador del crecimiento de la población y sugiere que las características climáticas y ecológicas favorables del país han sido los mecanismos promotores del éxito de su invasión, los cuales estarían actuando en contraposición a la baja diversidad genética según la paradoja genética de las invasiones biológicas (**Schrieber & Lachmuth, 2017**). Es posible que esas condiciones también estén teniendo efectos positivos en la fisiología de los hipopótamos, permitiendo que se asemejen a la de animales en cautiverio que viven en condiciones de alimentación y salud superiores a los que encuentran en el medio silvestre, y que se reflejan en una maduración más temprana de las hembras debido a una buena nutrición, con un crecimiento somático y del peso corporal más rápido, lo que es un factor clave para la maduración del sistema reproductivo (**Moreno *et al.*, 2000; Wheaton *et al.*, 2006**).

Los grupos de hipopótamos no responden como un solo conjunto bajo las mismas condiciones de invasibilidad (**Hulme *et al.*, 2008**), sino que cada uno responde dependiendo de su tamaño y tiempo en el territorio; por ello los grupos varían en este sentido (**Hulme *et al.*, 2008**) para poder establecerse exitosamente en el territorio. Esa respuesta diferencial de los grupos de hipopótamos se ajusta a los paradigmas de invasión biológica que ejemplifican los procesos que ocurren durante una invasión: población introducida, establecida, en expansión y expandida (**Department of Environment and Primary Industries - DEPI, 2010; Blackburn *et al.*, 2011; Robertson *et al.*, 2020**).

Los grupos Nápoles, Río Cocorná y Tolones ya son poblaciones expandidas que se han establecido de largo tiempo atrás en el territorio y sus individuos se reproducen activamente, eso se refleja en sus ámbitos de hogar moderados y su alta densidad (**Figura 6**). Los grupos Nare y Berrío son poblaciones en expansión que llevan establecidas un menor tiempo en el territorio y sus individuos tienen alto potencial de dispersión, lo que se refleja en sus densidades moderadas y ámbitos de hogar extensos (**Figura 6**). Los grupos Yondó y Momposina son poblaciones en proceso de establecimiento, con ámbitos de hogar extensos y densidades muy bajas que sugieren animales aún en busca de territorios, pero que se reproducen esporádicamente (**Figura 6**). Por último, a pesar de no tener evidencia de

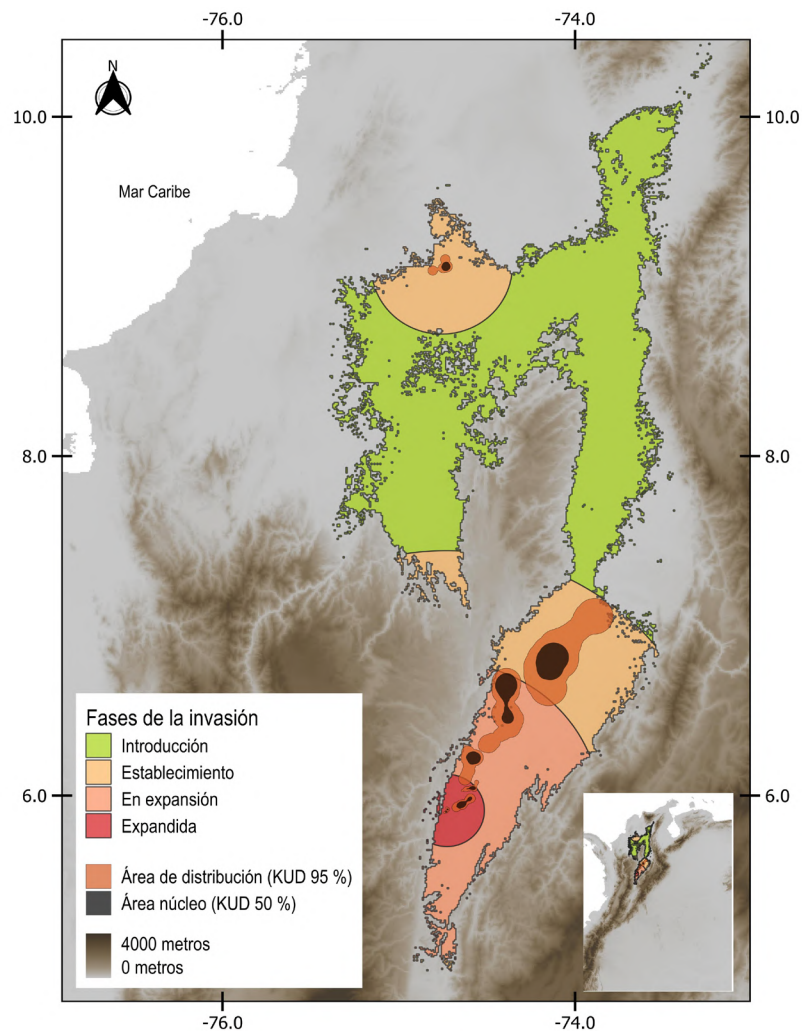


Figura 6. Grupos poblacionales de hipopótamos y sus fases de la invasión en Colombia

la presencia de la especie, el área al sur de la depresión momposina y norte del Magdalena medio se configura como un área susceptible para la introducción de nuevas poblaciones (**Figura 6**).

La distribución discreta de los grupos poblacionales y el estado de invasión descrito en este estudio, además de describir la magnitud y características de la invasión, indican una línea de base que debería ser tomada en cuenta para el manejo y monitoreo de la especie. La caza de control, instrumento jurídico del país para hacer frente al manejo de especies de animales invasores, es la medida transversal y principal que debería aplicarse a todos los grupos identificados, ya sea para controlar la dispersión, reducir los impactos ambientales o avanzar con la erradicación. Este instrumento debería comenzar a aplicarse prioritariamente en los grupos más densos, como Nápoles y Cocorná (**Figura 6**), para evitar la dispersión de individuos hacia otras zonas de la cuenca y reducir los impactos de las altas densidades de estos animales en el ambiente. En segundo lugar, se debería implementar para el resto de grupos como una medida de erradicación o de prevención del establecimiento en zonas potenciales de introducción. Además, se debe mantener la gestión para la translocación de individuos a zonas confinadas y nunca para suplementación de poblaciones nativas, debido a la baja variabilidad genética de las poblaciones que habitan los ecosistemas colombianos. Es necesario crear sistemas de alertas tempranas con la

participación de las comunidades locales en las áreas potenciales de introducción (**Figura 6**) para tomar medidas de erradicación y así evitar el establecimiento de nuevos grupos poblacionales; estas mismas medidas, enfocadas a evaluar la abundancia de hipopótamos en las otras zonas de la invasión (establecimiento y expansión) (**Figura 6**), serán guías útiles para la evaluación de las estrategias de manejo planteadas y como herramienta para el manejo adaptativo de la invasión.

Agradecimientos

Este estudio se realizó bajo los convenios 751 de 2021 y 862 de 2022 celebrados entre MinAmbiente, el Instituto Humboldt y la Universidad Nacional de Colombia. Agradecemos a David Echeverri de Cornare; Katherine Corrales de Corantioquia; Nixon López de la AUNAP, y Germán Mercado y Franklin Mejía de la Corporación del Sur de Bolívar, por el apoyo logístico; a los pilotos de drones Jonathan Botero, Daniel Campoy, Eduard Díaz y Josué Bilbao de Camper Aeronautical S.A.S., por obtener los mejores videos a pesar de las difíciles condiciones de vuelo. Agradecemos a todas las personas de las comunidades que nos guiaron y acompañaron durante las jornadas de campo, especialmente a Damaris Luján (Estación Pita), Julio Molina (Bocas de Cocorná), Noraldo Garzón (Estación Cocorná), Édinson Narváez (Puerto Boyacá), Obed Vargas (Puerto Boyacá), Marino Cañizales (Puerto Nare), Julio Marín (Puerto Berrío), Margario Garay (Gamarra), Facundo Llorente (El Banco), Luis Hernández (Barrancabermeja), Dulis Palmera (San Pablo) y Moisés Ávila (Carare viejo). Un agradecimiento especial a Klaudia Cárdenas, Ana Roldán, Mónica Hernández, Paola Acosta, Ramiro Campuzano, Daniela Castaño y Leonardo Muñoz de la línea de Gobernanza, Equidad y Medios de Vida del Instituto Humboldt, quienes siempre hicieron un espacio en su trabajo de campo para incluir nuestras preguntas sobre los hipopótamos en sus instrumentos metodológicos. A Germán Jiménez de la Universidad Javeriana, por sus aportes en el trabajo de campo en Puerto Berrío, Barrancabermeja y Yondó.

Contribución de los autores

RMA, OLMD, HFLA, MPBE, LMGL, LJNL y CL participaron en la contextualización y el diseño metodológico la investigación. Todos los autores participaron en el trabajo de campo, la recolección y análisis de datos, y la redacción y revisión del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Ansell, W.H.** (1965). Hippo census on the Luangwa River, 1963-1964. *Puku* 3, 15-27.
- Balaguera-Reina, S. A., Venegas-Anaya, M., Sánchez, A., Arbeláez, I., Lessios, H. A., Densmore, L.D.** (2016). Spatial ecology of the American crocodile in a tropical pacific island in Central America. *PLoS ONE* 11, 1-20.
- Bennet, A., Ratcliffe, P., Jones, E., Mansfield, H., Sands, R.** (2005). Other mammals. En: D. Hill, M. Fasham, G. Tucker, M. Shewry, P. Shaw (Ed), *Handbook of Biodiversity Methods Survey, Evaluation and Monitoring*. (450-477). Oxford University Press.
- Bennett, D., Green, N., Basuglo, B.** (2000). The abundance of *Hippopotamus amphibius* in the Black Volta River at Bui National Park, Ghana. *African Journal of Ecology*, 38, 372-373.
- Blackburn, T. M., Pysek, P., Bacher, S., Carlton, J., Duncan, R., Voltech, J., Wilson, J., Richardson, D.** (2011). A proposed unified framework for biological invasions. *Trends in Ecology and Evolution* 26, 333-339.
- Blowers, T.** (2008). *Social grouping behaviors of captive female Hippopotamus amphibius*. MSc Thesis. University of Central Florida.
- Bogui, E. B., Koffi, A. D., Koné, I., Ouattara, K., Kouakou, C. Y., Gnagbo, A.** (2016). Distribution of Pygmy hippopotamus (*Choeropsis liberiensis*) in Tai National Park, Ivory Coast: Influences of natural and anthropogenic factors. *International Journal of Research in Biosciences*, 5(4), 37-35.

- Börger, L., Dalziel, B., Fryxell, J. M.** (2008). Are there general mechanisms of animal home range behaviour? A review and prospects for future research. *Ecology letters*, 11, 637-650.
- Burgman, M. A. & Fox, J. C.** (2003). Bias in species range estimates from minimum convex polygons: implications for conservation and options for improved planning. *Animal Conservation*, 6, 19-28.
- Calenge, C.** (2021). Package “adehabitatHR”. <https://cran.r-project.org/web/packages/adehabitatHR/adehabitatHR.pdf>
- Calenge, C.** (2011). Analysis of animal movements in R. <https://cran.r-project.org/web/packages/adehabitatLT/vignettes/adehabitatLT.pdf>
- Cárdenas-Botero, K., Acosta, P., Hernández-Ospina, M. P., Roldán-Ortiz, A. M., Noguera-Urbano, E., Muñoz-Rodríguez, C. J., Osorio-Campuzano, R., Castaño-Gómez, D., Muñoz-Guerrero, L., Rodríguez, J.** (2022). *Entregable 4, Convenio 862 de 2022, Caracterización de la percepción socio ambiental de la convivencia y afectación de los Hippopotamus amphibius a los medios de vida*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Instituto Humboldt, Universidad Nacional de Colombia.
- Castelblanco-Martínez, D. N., Moreno-Arias, R. A., Velasco, J. A., Moreno-Bernal, J. W., Restrepo, S., Noguera-Urbano, E. A., Baptiste, M.P., García-Loaiza, L. M., Jiménez, G.** (2021a). A hippo in the room: Predicting the persistence and dispersion of an invasive megavertebrate in Colombia, South America. *Biological Conservation*, 253, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108923>
- Castelblanco-Martínez, D. N., Arévalo-González, K., Aguilar, B., Velasco, J.A., Moreno-Bernal, J. W., Restrepo, S., Moreno-Arias, R. A.** (2021b). Uncontrolled invasive hippos in the Magdalena River basin: An emergent threat to Antillean manatees in Colombia? *SireNews* 73, 17-21.
- Chansa, W. & Milanzi, J.** (2010) Population status of the hippopotamus in Zambia. *African Journal of Ecology*, 49, 130-132.
- Chansa, W., Milanzi, J., Sichone, P.** (2011a). Influence of river geomorphologic features on hippopotamus density distribution along the Luangwa River, Zambia. *African Journal of Ecology*, 49(2), 221-226.
- Chomba, C.** (2016). Population Structure of the Common Hippopotamus (*Hippopotamus amphibius*) in the Luangwa River, Zambia. *Global Journal of Biology, Agriculture and Health sciences*, 5(4), 29-39.
- Chomba, C., Senzota, R., Chabwela, H., Nyirenda, V.** (2012) Population status of the common hippopotamus (*Hippopotamus amphibius*) in Luangwa River, Zambia. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, 4, 247-257.
- Chansa, W., Senzota, R., Chabwela, H., Nyirenda, V.** (2011b). The influence of grass biomass production on hippopotamus population density distribution along the Luangwa River in Zambia. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, 3(5), 186-194. **Department of Environment and Primary Industries - Depi.** (2010). Invasive Plants and Animals Policy Framework. <http://www.depi.vic.gov.au/agriculture-and-food/pestsdiseases-and-weeds/protecting-victoria-from-pest-animals-and-weeds>
- Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N. D., Wikramanayake, E., Hahn, N., Palminteri, S., Hedao, P., Noss, R., Hansen, M., Locke, H., Ellis, E. C., Jones, B., Barber, C. V., Hayes, R., Kormos, C., Martin, V., Crist, E., Sechrest, W., ..., Saleem, M.** (2017). An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *Bioscience*, 67, 534-545.
- El Espectador.** (2020). Campesino fue atacado por hipopótamo en Puerto Triunfo (Antioquia). <https://www.elespectador.com/colombia/medellin/campesino-fue-atacado-por-hipopotamo-en-puerto-triunfo-antioquia-article-919094/>
- El Espectador.** (2021). Reportan en Antioquia un nuevo ataque de un hipopótamo a una persona. <https://www.elespectador.com/ambiente/reportan-en-antioquia-un-nuevo-ataque-de-un-hipopotamo-a-una-persona/>
- Eltringham, S. K.** (1999). *The Hippos: Natural History and Conservation*. Princeton University Press.
- Fritsch, C. J. & Downs, C. T.** (2020). Evaluation of low-cost consumer-grade UAVs for conducting comprehensive high-frequency population censuses of hippopotamus populations. *Conservation Science and Practice*, 2, e281. <https://doi.org/10.1111/csp2.281>
- García-Lozano, L. C.** (2001). *Región de Mompos: síntesis de estudios de evaluación ambiental regional para el sector transporte*. Subdirección del Medio Ambiente y Gestión Social del Instituto Nacional de Vías de Colombia (Invías). 67 pp. http://www.neotropicos.org/Informes/Sintesis_Momposina_070102.pdf

- Groenendijk, J., Hajek, F., Duplaix, N., Reuther, C., Van Damme, P., Schenk, C., Staib, E., Wallace, R., Waldemarin, H., Notin, R., Marmontel, M., Rosas, F., de Mattos, G. E., Evangelista, M., Utreras, V., Lasso, G., Jaques, H., Matos, K., Roopsind, I., Botello, J. C. (2005). Surveying and monitoring distribution and population trends of the giant otter (*Pteronura brasiliensis*) – guidelines for a standardization of survey methods as recommended by the giant otter section of the IUCN/SSC Otter Specialist Group. *Habitat*, 16, 1-82.
- Hulme, P. E., Bacher, S., Kenis, M., Klotz, S., Kühn, J., Minchin, D., Nentwig, W., Olenin, S., Panov, V., Pergl, J., Pyšek, P., Roques, A., Sol, D., Solarz, W., Vilà, M. (2008). Grasping at the routes of biological invasions: a framework for integrating pathways into policy. *Journal of Applied Ecology*, 45, 403-414.
- IGAC. (2022). Datos Abiertos IGAC. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente - INDERENA. (1994). *Informe técnico (Marzo/1994) e Informe de Audiencia (Junio 29/ 1994) del INDERENA*. Expedientes (013/1981; 092/1981;049/1981).
- Inman, V. L. & Leggett, K. E. A. (2022). Hidden Hippos: Using Photogrammetry and Multiple Imputation to Determine the Age, Sex, and Body Condition of an Animal Often Partially Submerged. *Drones*, 6, 409. <https://doi.org/10.3390/drones6120409>
- Inman, V. L., Kingsford, R. T., Chase, M. J., Leggett, K. E. (2019). Drone-based effective counting and ageing of hippopotamus (*Hippopotamus amphibius*) in the Okavango Delta in Botswana. *PLoS One*, 14, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219652>
- Kanga, E. M., Oguto, J. O., Oloff, H., Santema, P. (2011). Population trend and distribution of the vulnerable common hippopotamus *Hippopotamus amphibius* in the Mara region of Kenya. *Oryx*, 45(1) 20-27.
- Kingdon, J. (2015). *The Kingdon Field Guide to African Mammals*. Bloomsbury Publishing.
- Lacy, R. C. & Pollak, J. P. (2020). *Vortex: A Stochastic Simulation of the Extinction Process. Version 10.3.8*. Chicago Zoological Society.
- Laws, R. & Clough, G. (1966). Observations on reproduction in the hippopotamus *Hippopotamus amphibius* Linn. *Comparative biology of reproduction in mammals*, 15, 117-140.
- Levins, R. (1969). Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control. *Bulletin of the Entomological Society of America*, 15, 237-40.
- Lewison, R. L. & Pluháček, J. (2017). *Hippopotamus amphibius*. The IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/species/pdf/18567364/attachment>
- Lewison, R. (2007). Population responses to natural and human –mediated disturbances: assessing the vulnerability of the common hippopotamus (*Hippopotamus amphibius*). *African Journal of Ecology*, 45, 407-415.
- Linchant, J., Lhoest, S., Quevauvillers, S., Lejeune, P., Vermeulen, C., Semeki Ngabinzeke, J., Belanganayi, B. L., Delving, W., Bouche, P. (2018). UAS imagery reveals new survey opportunities for counting hippos. *PLoS ONE*, 13(11), e0206413. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206413>
- Messel, H., Vorlicek, G. C., Wells A.G., Green, W. J. (1981). *Surveys of tidal river systems in Northern Territory of Australia and their crocodile populations*. Pergamon Press.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. (2022). Resolución 0346 de 2022, 24 de marzo de 2022. Por la cual se modifica el artículo 1° de la Resolución N° 848 de 2008, adicionando la especie *Hippopotamus amphibius* (Hipopótamo común) y se toman otras determinaciones.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2009). *Memorias de la reunión del equipo técnico y jurídico sobre medidas de acción popular sobre hipopótamos. Justificación para el control de tres hipopótamos (Hippopotamus amphibius) en el municipio de Puerto Berrío*. Dirección de Ecosistemas.
- Moreno, J. S., Brunet, A. G., de Bulnes, A.G., Villar, D., Sebastian, A. L. (2000). Attainment of puberty in the European mouflon (*Ovis gmelini musimon*), and the domestic Manchega ewe (*Ovis aries*). *Reproduction in Domestic Animals*, 35, 49-52.
- Moreno-Arias, R.A., Baptiste-E, M. P., Nova-León, L., García-Loaiza, L., Noguera-Urbano, E., Loaiza, C., Santamaría-Castiblanco, D., Fernández, C., Montenegro-Díaz, O. L., López-Arévalo, H. (2021). *Informe final Convenio 751 de 2021, Aunar esfuerzos técnicos administrativos y financieros para la obtención de información demográfica y ecológica de Hippopotamus amphibius como insumos para el manejo de la especie en el país*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Instituto Humboldt, Universidad Nacional de Colombia.

- Moreno-Arias, R. A. & Ardila-Robayo, M. C.** (2020). Returning to freedom: the spatial ecology of a reintroduced population of Orinoco crocodile in Colombia. *Animal Biotelemetry*, 8, 15. <https://doi.org/10.1186/s40317-020-00202-2>
- Pluháček, J. & Steck, B. L.** (2015). Different sex allocations in two related species: the case of the extant hippopotamus. *Ethology*, 121, 462-471.
- Powell, R. A.** (2000). Animal Home Ranges and Territories and Home Range Estimators. En: Boitani, L., Fuller, T. (Eds.) *Research Techniques in Animal Ecology* (65-111). Columbia University Press.
- QGIS.** (2021). Sistema de Información Geográfica QGIS. Proyecto de Fundación Geoespacial de código abierto.
- Rangel-Ch, J. O. & Carvajal-Cogollo, J. E.** (2013). Clima de los alrededores de las ciénagas del centro y del sur del departamento del Cesar. En: J. O. Rangel-Ch. (Ed), *Colombia Diversidad Biótica XIII*. (105-131). Editorial ARFO Ltda.
- Robertson, P. A., Mill, A., Novoa, A., Jeschke, J. M., Essl, F., Gallardo, B., Geist, J., Jaric, I., Lambin, X., Musseau, C., Pergl, J., Pysek, P., Rabitsch, W., von Schmalensee, M., Shirley, M., Strayer, D. L., Stefansson, R.A., Smith, K., Booy, O.** (2020). A proposed unified framework to describe the management of biological invasions. *Biological Invasions*, 22, 2633-2645.
- Roth, H. H., Hoppe-Dominik, B., Mühlenberg, M., Steinhauer-Burkart, B., Fischer, F.** (2004). Distribution and status of the hippopotamids in the Ivory Coast. *African Zoology*, 39, 211-224.
- Ruggiero, R. G.** (1991). Prey selection of the lion (*Panthera leo*) in the Manovo-Gounda-St. Floris National Park, Central African Republic. *Mammalia* 55, 23-33.
- Salgado, J., Shurin, J. B., Vélez, M. I., Link, A., Lopera-Congote, I., González-Arango, C., Jaramillo, F., Ahlen, I., de Luna, G.** (2022). Causes and consequences of recent degradation of the Magdalena River basin, Colombia. *Limnology and Oceanography Letters*, 7, 451-465.
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., Eliceiri, K. W.** (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671-675.
- Scholte, P. & Iyah, I.** (2016). Declining population of the vulnerable common hippopotamus *Hippopotamus amphibius* in Bénoué National Park, Cameroon (1976–2013): the importance of conservation presence. *Oryx*, 50(3), 506-513.
- Schrieber, K. & Lachmuth, S.** (2017). The Genetic Paradox of Invasions revisited: the potential role of inbreeding×environment interactions in invasion success. *Biological Reviews Cambridge Philosophical Society*, 92(2), 939-952.
- Schtickzelle, N. & Quinn, T. P.** (2007). A metapopulation perspective for salmon and other anadromous. *Fish and Fisheries*, 8, 297-314.
- Scotcher, J. S. B.** (1978). Hippopotamus numbers and movements in Ndumu Game Reserve. *Lammergeyer*, 24, 5-12.
- Shurin, J. B., Aranguren-Riaño, N., Duque-Negro, D., López, D. E., Jones, N. T., Laverde-R, O., Neu, A., Pedroza-Ramos, A.** (2020). Ecosystem effects of the world's largest invasive animal. *Ecology*, 101(5), 1-9.
- Stears, K., Nuñez, T. A., Muse, E. A., Mutayoba, B. M., McCauley, D. J.** (2019). Spatial ecology of male hippopotamus in a changing watershed. *Science Reports*, 9(1), 1-13.
- Stears, K., Schmitt, M., Turner, W., McCauley, D., Muse, E., Kiwango H., Mathayo, D., Mutayoba, B.** (2021). Hippopotamus movements structure the spatiotemporal dynamics of an active anthrax outbreak. *Ecosphere*, 12(6), e03540. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3540>
- Subalusky, A. L., Anderson, E. P., Jiménez, G., Post, D. M., López, D. E., García-R, S., Nova León, L. J., Reátiga-Parrish, J. F., Rojas, A., Solari S.** (2021). Potential ecological and socio-economic effects of a novel megaherbivore introduction: The hippopotamus in Colombia. *Oryx*, 55(1), 105-113.
- Valderrama-Vásquez, C.** (2012). Wild Hippos in Colombia. Aliens. *The Invasive Species Bulletin*, 32, 8-12.
- VideoLan.** (2006). VLC media player. <https://www.videolan.org/vlc/index.html>
- Viljoen, P. C.** (1995). Changes in number and distribution of hippopotamus (*Hippopotamus amphibius*) in the Sabie River, Kruger National Park, during 1992 drought. *Koede*, 38(2), 115-121.
- Wheaton, C. J., Joseph, S., Reid, K., Webster, T., Richards, M., Savage, A.** (2006). Body weight as an effective tool for determination of onset of puberty in captive female Nile hippopotami (*Hippopotamus amphibios*). *Zoo Biology*, 25, 59-71.
- Worton, B. J.** (1989). Kernel methods for estimating the utilization distribution in home-range studies. *Ecology*, 70, 164-168.

Original article

Three new species of *Nanomis* Lugo-Ortiz and McCafferty, 1999 (Ephemeroptera: Baetidae) from Colombia

Tres nuevas especies de *Nanomis* Lugo-Ortiz and McCafferty, 1999 (Ephemeroptera: Baetidae) de Colombia

✉ Luis Gonzalo Salinas-Jiménez^{1,*}, ✉ Lucimar Gomes-Dias², ✉ César Román-Valencia¹

¹Grupo de Investigación Diversidad Faunística, Laboratorio de Ictiología, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

²Grupo de Investigación Genética, Biodiversidad y Manejo de Ecosistemas – GEBIOME, Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Abstract

We describe three new species of *Nanomis* based on nymphs from Colombia using the characteristics that distinguish them from other species of the genus: *Nanomis antoniae* Salinas, sp. nov.: left mandible with incisors fused with 7 denticles; right mandible with an outer set of incisors with 3 denticles, inner set with 8 denticles; labial palp with segment III elongated and rounded; the outer margin of the fore femur with a row of 18–19 clavate setae; the inner margin of the fore tarsus with a row of spine-like setae, the most basal setae serrate; posterior margin of terga I-IV smooth, with spines on terga V-X. *Nanomis mariquitensis* Salinas, sp. nov.: left mandible with incisors fused with 9 denticles; right mandible with an outer set of incisors with 4 denticles and inner set with 9 denticles; labial palp with segment III elongated and rounded; outer margin of the fore femur with row of 8–9 clavate setae; inner margin of the fore tarsus with a row of spine-like setae, the two most basal setae serrate; posterior margin of terga I-IX smooth with spines on tergum X. *Nanomis quindiensis* Salinas, sp. nov.: left mandible with incisors fused with 7 denticles; right mandible with an outer set of incisors with 3 denticles, inner set with 9 denticles; maxillae with one small simple setae near medial hump; labial palp with segment III wide and rounded; outer margin of the fore femur with row of 14–15 clavate setae; posterior margin of terga I-II smooth, with spines on terga III-X.

Keywords: Andean region; mayflies; Neotropic; taxonomy.

Resumen

Se describen tres nuevas especies de *Nanomis* basadas en ninfas de Colombia y se presentan las características morfológicas que las separan: *Nanomis antoniae* Salinas, sp. nov.: mandíbula izquierda con incisivos con 7 denticulos; mandíbula derecha con incisivos externos con 3 denticulos e internamente con 8 denticulos; palpo labial con segmento II elongado y redondeado; margen externo del fémur anterior con hilera de 18 a 19 cerdas clavadas; margen interna del tarso anterior con hilera de cerdas como espinas, la más basal serrada; margen posterior de los tergos I-IV liso, espinas sobre los tergos V-X. *Nanomis mariquitensis* Salinas, sp. nov.: mandíbula izquierda con incisivos fusionados con 9 denticulos; mandíbula derecha con incisivos externos con 4 denticulos e internamente con 9 denticulos; palpo labial con segmento II elongado y redondeado; margen externo del fémur anterior con hilera de 8–9 cerdas clavadas; margen interno del tarso anterior con hilera de cerdas como espinas, las dos más basales son serradas; margen posterior de los tergos I-X lisos con espinas sobre el tergo X. *Nanomis quindiensis* Salinas, sp. nov.: mandíbula izquierda con incisivos con 7 denticulos; mandíbula derecha con seta externa de incisivos con 3 denticulos e internamente con 9 denticulos; maxila con seta simple cerca a la joroba medial; palpo labial con segmento III ancho y redondeado; margen externo del fémur anterior con hilera de 14 a 15 cerdas clavadas; margen posterior de los tergos I-II lisos, espinas en los tergos III-X.

Palabras clave: moscas de mayo; neotrópico; región andina; taxonomía.

Citation: Salinas-Jiménez LG, et al. Three new species of *Nanomis* Lugo-Ortiz and McCafferty, 1999 (Ephemeroptera: Baetidae) from Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):582-594, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2657>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Corresponding autor:**

Luis Gonzalo Salinas Jiménez;
biobaetodes@gmail.com

Received: May 28, 2024

Accepted: August 26, 2024

Published on line: September 13, 2024



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

Introduction

Nanomis Lugo-Ortiz & McCafferty is a Neotropical genus of Baetidae (Ephemeroptera) erected by Lugo-Ortiz & McCafferty (1999) based only on nymphal stages. The imaginal stage of *Nanomis* was subsequently described by Salles & Nieto (2008) based on specimens from Argentina. To date, only two species are known: *Nanomis galera* Lugo-Ortiz & McCafferty 1999 from Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, and Perú (Domínguez *et al.*, 2006; Salinas *et al.*, 2017) and *Nanomis rasmusseni* Chacón, Pescador & Segnini, 2013 from Venezuela and Colombia (Chacón *et al.*, 2013; Salinas *et al.*, 2018). In Colombia, *Nanomis* species are widely distributed in the departments of Antioquia, Caldas, Cauca, Cundinamarca, Meta, Quindío, Nariño, Risaralda, Tolima, and Valle del Cauca in the Andean region (Lugo-Ortiz & McCafferty, 1999; Dias *et al.*, 2009; Salinas *et al.*, 2017; Salinas *et al.*, 2018). The present paper aims to describe three new species of *Nanomis* based on nymphs from Colombia.

Materials and methods

Nymphs were collected using a Surber aquatic entomological net (250 µm) and a manual sieve. The material was fixed in 96% ethanol. The drawings were made from photographs and the Adobe Illustrator®CS6 and Adobe Photoshop®CS6 programs as proposed by Coleman (2003, 2006). We used an optical microscope Zeiss Primo star and Leica M-205C stereomicroscope with a Leica MC-170HD coupled camera for the pictures. Nymphs were photographed with a stereoscopic Zeiss Stemi 2000c with an Axio Cam ERc 5s camera and edited with the Zen 2 lite; we combined the pictures using the COMBINEZP (Hadley 2010) open software. We prepared the slides with Euparal®. The material examined was deposited in the Entomological Collection of the Biology program at Universidad de Caldas (CEBUC), Manizales, Colombia, and the Collection of Invertebrates of the Ichthyology Laboratory at Universidad del Quindío (MIUQ), Armenia, Colombia. We produced the map using the free QGIS software version 3.34.6 and the Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) layers.

Results

Nanomis antoniae Salinas, sp. nov. (Figures 1-3)

Diagnosis

1) Left mandible with incisors fused with 7 denticles. 2) Right mandible with an outer set of incisors with 3 denticles and an inner set with 8 denticles, approximately. 3) Maxillae with small frayed setae near medial hump. 4) Labial palp with segment III elongated (longer than broad) and rounded. 5) Outer margin of the fore femur with a row of 18–19 clavate setae. 6) Inner margin of the fore tarsus with a row of spine-like setae, the most basal spine-like setae serrate. 7) Posterior margin of terga I-IV smooth, with spines on terga V-X.

Body length (mm). Male mature nymph. Body: 7.4–7.5. Cerci: 4.5. Antennae broken (Figure 1).

Head. Reddish on the upper half of frons and whitish on the lower half, area between the ocelli tinged with brown.

Labrum (Figure 2A). Semicircular, broader than longer; length about 0.8× maximum width, dorsally with scattered short setae on lateral areas, a submedial pair of long setae near midline, and five subapical long setae laterally; distal margin with two sets of setae branched apically on lateral regions and bifid near midline.

Hypopharynx (Figure 2B). Lingua subequal in length to superlingua, longer than broad; distal margin pointed; medial tuft of apical setae present. Superlinguae broader than longer with small lateral spines concentrated near the midregion; distal margin pointed; medial tuft of setae present.

Left mandible (Figure 2C). Incisors fused with 7 denticles. Robust prosthema, apically denticulate. Margin between prosthema and mola straight; subtriangular process narrow.

Right mandible (Figures 2 D-E). Outer set of incisors with 3 denticles; inner set with 8 denticles approximately (3 most outer very small, three medial much larger than the others and two most inner small and pointed), prosthema bifid.

Maxillae (Figure 2F). Seven long simple setae with small frayed setae near the medial hump and three subapical ventral simple setae proximal to the base of denticles; palpi with segment I $0.7\times$ length of segment II; segment II apically narrow.

Labium (Figure 2G). The glossa equal in length to the paraglossa; the apex with robust spine-like setae; the outer margin with a row of long spine-like setae increasing in length distally; ventrally with a row of spine-like setae on the inner margin. Paraglossa: apex with spine-like setae; outer margin with a row of long simple setae; a dorsomedial row with 5 subapical spine-like setae and a ventromedial row with 9 subapical spine-like setae. Labial palp with segment I $0.7\times$ length of segments II and III combined; outer margin of segment I with fine simple setae; segment II of palpi with a slight distomedial projection, ventrally with 10 fine simple setae in the outer margin and fine simple setae in the inner margin, a dorsomedial row with 5 fine spine-like setae; dorsally with fine simple setae on the inner margin. Segment III elongated (longer than broader) and rounded, length of about $1.3\times$ maximum width, apex with spine-like setae.

Thorax. Dark brown pro, meso, and metanotum. Fore leg (Figure 3A). Yellowish-brown femur, tibia, and tarsi. Fore femur. Length about $2.8\times$ maximum width; the outer margin with a row of 18–19 clavate setae; the inner margin with short spine-like setae. Fore tibia. Length $0.8\times$ length to the fore femur. The outer margin with short simple setae and a short clavate seta; the inner margin a row of short, spine-like setae and a row of short simple setae, the most apical setae biserrate (Figure 3B). Fore tarsus. Length $0.46\times$ length to the fore femur. The outer margin with fine, simple setae; the inner margin a row of spine-like setae, the most basal spine-like setae serrate (Figure 3B). Tarsal claw with a row of 8–9 denticles (Figure 3C).



Figure 1. *Nanomis antoniae* sp. nov (dorsal view)

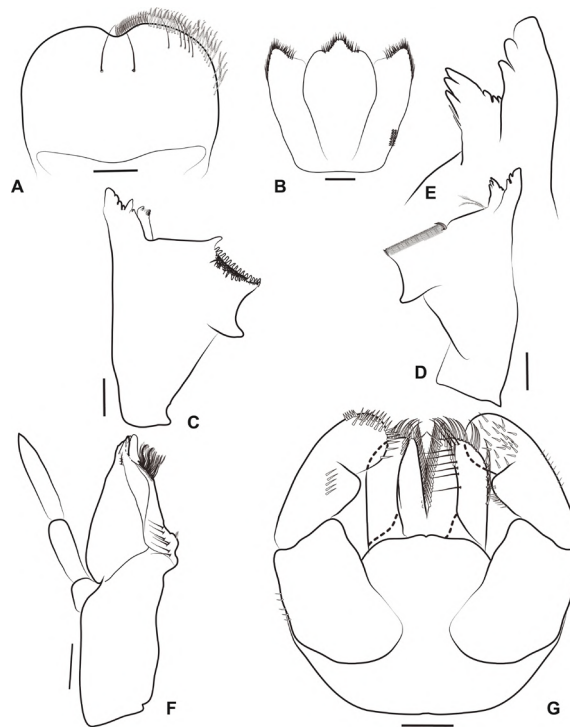


Figure 2. *Nanomis antoniae* sp. nov., nymph. **A.** Labrum. **B.** Hypopharynx. **C.** Left mandible. **D.** Right mandible. **E.** Right mandible incisors. **F.** Maxilla. **G.** Labium (left d.v., right v.v). Scale bars = 0.05 mm

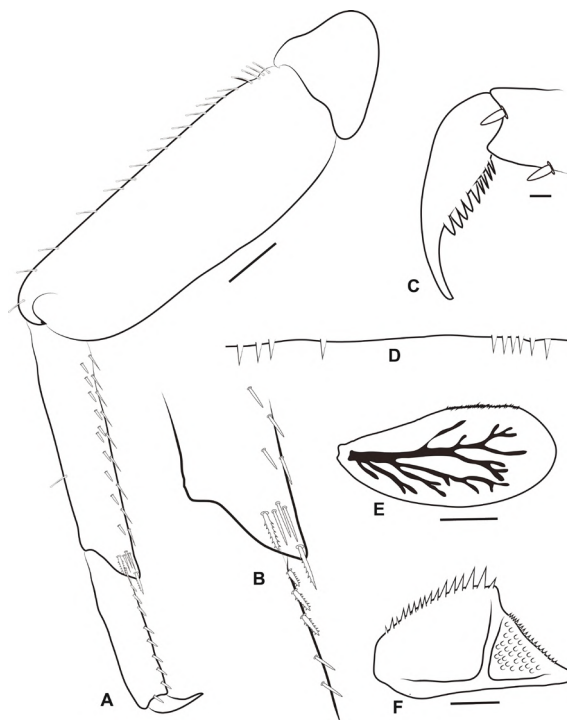


Figure 3. *Nanomis antoniae* sp. nov., nymph. **A.** Fore-leg. **B.** Detail of serrate spine-like setae on tibia and tarsus. **C.** Tarsal claw. **D.** posterior margin of terga V-X. **E.** gill IV. **F.** paraproct. Scale bars: A, C = 0.1 mm; E, F = 0.05 mm

Abdomen. Terga variably tinged with brown, pattern as in **figure 1A**, tergum I, yellowish, terga II, extensively white with dark-brown central region, tergum III broadly dark-brown with whitish central region, tergum IV broadly whitish with anterior margin tinged with brown, tergum V with whitish central region and dark-brown lateral region, tergum VI dark-brown with white spots in the anterolateral margin, tergum VII-X lighter. Posterior margin of terga I-IV smooth, with spines on terga V-X (**Figure 3D**). Gills (**Figure 3E**) slightly asymmetrical, translucent-whitish, with the central region along the main trachea shaded with brown; tracheae pigmented, marginal setae of uniform size, the outer margin more serrate than the inner margin. Paraproct (**Figure 3F**) with 14–17 spines on the inner margin. Light brown cerci.

Adults. Unknown

Etymology. The specific epithet is an arbitrary combination of letters referring to the daughter (Antonia) of Luis Salinas. The name is in the genitive.

Discussion. As in *N. galera* and *N. quindiensis* sp. nov., nymphs of *N. antoniae* sp. nov. also possess a left mandible with incisors fused with 7 denticles. However, this new species can be distinguished from *N. galera* and *N. quindiensis* sp. nov. by the presence of serrate spine-like setae on tarsus and the shape of the segment III of the labial palp, elongated in *N. antoniae* and wide in *N. galera* and *N. quindiensis*.

Type material. Holotype male mature nymph (mouthparts, legs, gills, and paraproct on a single slide; abdomen in alcohol), Colombia: Tolima: Cajamarca, Quebrada La Colosa, 4.46751N, 7548826W, 2817m, 30/IV/2013; Ana Maria Meza, Camilo Llano, Alejandro Villareal, cols (CEBUC). Paratypes. Eight mature nymphs (two on slides), same data as holotype (4 CEBUC and 4 MIUQ).

Distribution (Figure 10). Colombia: Tolima, Cajamarca, Magdalena river basin.

Nanomis mariquitensis Salinas, sp. nov. (Figures 4-6)

Diagnosis

1) Left mandible with incisors fused with 9 denticles. 2) Right mandible with the outer set of incisors with four denticles and the inner set with nine denticles approximately. 3) Maxillae with small simple setae near the medial hump. 4) Labial palp with segment III elongated (longer than broader) and rounded. 5) Outer margin of the fore femur with a row of 8–10 clavate setae alternating with a row of simple setae. 6) Inner margin of the fore tarsus with a row of spine-like setae, the most basal spine-like setae serrate. 7) Posterior margin of terga I-IX smooth, with spines on tergum X.

Body length (mm). Male mature nymph. Body: 5.1–5.2. Cerci: 2.5. Antennae broken (**Figure 4**).

Head. Reddish on upper half of frons and whitish on lower half, area between ocelli tinged with brown.

Labrum (Figure 5A). Semicircular broader than longer; length about 0.8× maximum width, dorsally with scattered short setae on lateral areas, a submedial pair of long setae near midline, and five subapical long setae laterally; distal margin with two sets of setae branched apically on lateral regions and bifid near midline.

Hypopharynx (Figure 5B). The lingua subequal in length to the superlingua. Longer than broader; distal margin pointed; medial tuft of apical setae present. The superlinguae broader than longer with small lateral spines concentrated near the midregion; the distal margin pointed; the medial tuft of setae present.

Left mandible (Figure 5C). Incisors fused with 9 denticles (the inner side with one very small denticle). Prosthema robust, apically denticulate. Margin between the prosthema and the mola straight; subtriangular process narrow.

Right mandible (Figures 5D-E). The outer set of incisors with four denticles; the inner set with nine denticles approximately (the outer four very small, the three medial much larger than the others, and the inner two very small), bifid prosthema.



Figure 4. *Nanomis mariquitensis* sp. nov (dorsal view).

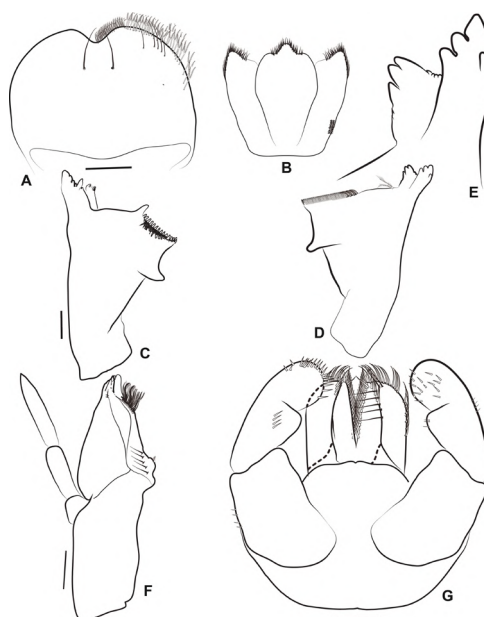


Figure 5. *Nanomis mariquitensis* sp. nov., nymph. **A.** Labrum. **B.** Hypopharynx. **C.** Left mandible. **D.** Right mandible. **E.** Right mandible incisors. **F.** Maxilla. **G.** Labium (left d.v., right v.v). Scale bars = 0.05 mm

Maxillae (Figure 5F). Five to six long simple setae and a small simple seta near the medial hump and two subapical ventral simple setae proximal to the base of denticles; palpi with segment I $0.7\times$ the length of segment II; segment II apically narrow.

Labium (Figure 5G). The glossa equal in length to the paraglossa; the apex with robust spine-like setae; the outer margin with a row of long spine-like setae increasing in length distally; ventrally with a row of spine-like setae on the inner margin. Paraglossa: apex ventrally with spine-like setae; outer margin with a row of long simple setae; a dorsomedial row with 4 spine-like setae and a ventromedial row of 7 subapical spine-like setae. Labial palp with segment I $0.7\times$ the length of segments II and III combined; dorsal surface of segment I with 4 fine simple setae; segment II of palpi with a slight distomedial projection with 2 fine simple setae, ventrally with 4 fine simple setae in outer margin and a fine simple seta in the inner margin, a dorsomedial row with 4 fine spine-like setae; dorsally with one fine simple seta on the inner margin. Segment III elongated (longer than broad) and rounded, length of about $1.3\times$ the maximum width, apex with spine-like setae.

Thorax. Yellowish-brown pro, meso, and metanotum. Fore leg (Figure 6A). Yellowish-brown femur, tibia, and tarsi. Fore femur. Length of about $4.3\times$ the maximum width; the outer margin with a row of 8–10 clavate setae alternating with a row of simple setae; inner margin with short spine-like setae. Fore tibia. Length of $0.9\times$ the length to the fore femur. The outer margin with short simple setae and a short clavate seta; the inner margin with a row of short, spine-like setae and a row of short simple setae, the most apical setae biserrate (Figure 6B). Fore tarsus. Length of $0.45\times$ the length to the fore femur. The outer margin with fine, simple setae; the inner margin with a row of spine-like setae, the most basal of spine-like setae serrate (Figure 6B). The tarsal claw with a row of 10–11 denticles (Figure 6C).

Abdomen. Terga variably tinged with yellowish-brown, pattern as in figure 4, tergum I, yellowish, terga II-III broadly brownish with white laterally, tergum VI extensively white with brownish central region, terga V-VI broadly brownish with white laterally, tergum VII yellowish and tinged with brown only on the posterior margin, tergum VIII lighter, terga

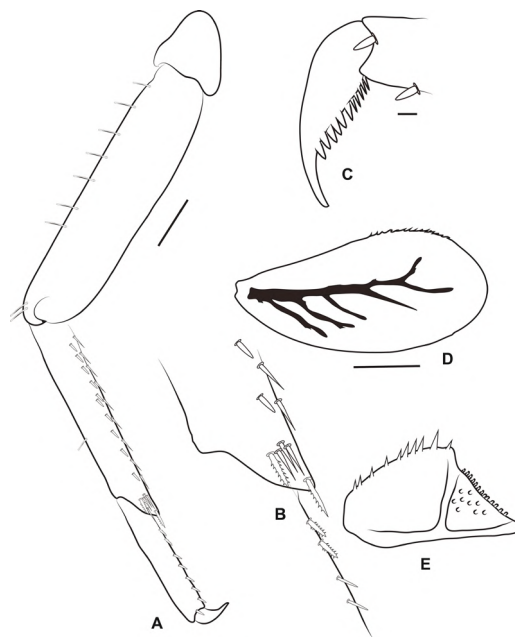


Figure 6. *Nanomis mariquitensis* sp. nov., nymph. **A.** Fore-leg. **B.** Detail of serrate spine-like setae on tibia and tarsus. **C.** Tarsal claw. **D.** Gill IV. **E.** Paraproct. Scale bars: Scale bars: A, C = 0.1 mm. D, E = 0.05 mm

IX and X brownish. The posterior margin of terga I-IX smooth, with spines on tergum X. Slightly asymmetrical gills (**Figure 6D**), translucent-whitish, with central region along the main trachea shaded with brown; the tracheae pigmented, marginal setae of uniform size, the outer margin more serrate than the inner margin. The paraproct (**Figure 6E**) with 9–10 spines on the inner margin. Cerci light brown.

Adults. Unknown

Etymology: The specific epithet is an adjective formed by Mariquita and the suffix –ensis referring to the Colombian locality where the species was found.

Discussion. *Nanomis mariquitensis* sp. nov. resembles *N. rasmusseni* and *N. antoniae* sp. nov. by presenting segment III of labial palp elongated and rounded. *N. mariquitensis* sp. nov. differs from these species by presenting the right mandible with an outer set of incisors with four denticles (*N. rasmusseni* and *N. antoniae* sp. nov. present the right mandible with an outer set of incisors with three denticles), besides, the terga I-IX in *N. mariquitensis* sp. nov. are smooth.

Type material. Holotype male mature nymph (mouthparts, legs, gills, and paraproct on a single slide; abdomen in alcohol), Colombia: Tolima: Mariquita, Río Medina, 5°14'41.08"N, 74°53'6.98"W, 391m, 09/II/2016; Lucimar Gomes Dias, Paula Souto, and Luis Salinas cols (CEBUC). Paratypes. Eight mature nymphs (two on slides), same data as holotype (4 CEBUC and 4 MIUQ).

Distribution (Figure 10). Colombia, Tolima, Gualí River basin.

Nanomis quindiensis Salinas, sp. nov. (Figures 7-9)

Diagnosis

1) Left mandible with incisors fused with 7 denticles. 2) Right mandible with the outer set of incisors with 3 denticles; the inner set with 7 denticles approximately. 3) Maxillae with a small simple seta near the medial hump. 4) Labial palp with segment III wide (broader than longer) and rounded. 5) Outer margin of the fore femur with a row of 14–15 clavate setae alternating with a row of simple setae. 7) Posterior margin of terga I-II smooth, with spines on terga III-X.

Body length (mm). Female mature nymph. Body: 6.9–7.1. Cerci broken. Antennae: 3 (**Figure 7**).

Head. Reddish on the upper half of frons and whitish on the lower half, the area between ocelli tinged with brown. Antennae whitish, slightly shaded with brown.

Labrum (Figure 8A). Semicircular, broader than longer; length of about 0.68× the maximum width, dorsally with scattered short setae on lateral areas, a submedial pair of long setae near the midline, and five subapical long setae laterally; distal margin with two sets of setae branched apically on lateral regions and bifid near the midline.

Hypopharynx (Figure 8B). The lingua subequal in length to the superlingua, longer than broader; the distal margin pointed; the medial tuft of apical setae present. The superlinguae broader than longer with small lateral spines concentrated near the midregion; the distal margin pointed; the medial tuft of setae present.

Left mandible (Figure 8C). Incisors fused with 7 denticles. Robust prosthema, apically denticulate. Margin between the prosthema and the mola straight; subtriangular process narrow.

Right mandible (Figures 8 D-E). With the outer set of incisors with 3 denticles; the inner set with 7 denticles approximately (the outer very small, the three medial much larger than the others, and the three inner small and pointed), the prosthema bifid.

Maxillae (Figure 8F). With five to six long simple setae and a small simple seta near the medial hump, two subapical ventral simple setae proximal to the base of the denticles; palpi with segment I 0.5× the length of segment II; segment II apically narrow.

Labium (Figure 8G). The glossa equal in length to the paraglossa; the apex with robust spine-like setae; the outer margin with a row of long spine-like setae increasing in length distally; ventrally with a row of spine-like setae on the inner margin. Paraglossa: apex with spine-like setae; the outer margin with a row of long simple setae; a dorsomedial



Figure 7. *Nanomis quindiensis* sp. nov (dorsal view).

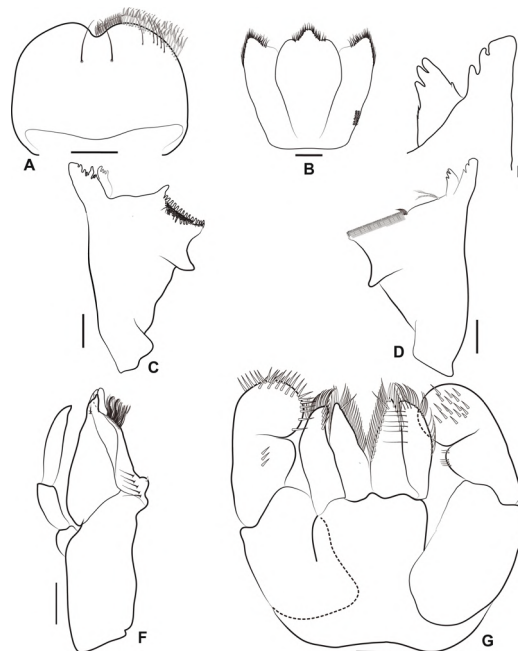


Figure 8. *Nanomis quindiensis* sp. nov., nymph. **A.** Labrum. **B.** Hypopharynx. **C.** Left mandible. **D.** Right mandible. **E.** Right mandible incisors. **F.** Maxilla. **G.** Labium (left d.v., right v.v). Scale bars = 0.05 mm

row with 4 subapical spine-like setae and a ventromedial row with 9 subapical spine-like setae. Labial palp with segment I 0.97× the length of segments II and III combined; dorsal surface of segment I with 4 fine simple setae; segment II of palpi with a slight distomedial projection with 2 fine simple setae, ventrally with 4 fine simple setae in the outer margin and fine simple setae in the inner margin, a dorsomedial row with 3 fine spine-like setae; dorsally with a fine simple seta on the inner margin. Segment III wide (broader than longer) and rounded, length of about 0.9× the maximum width, the apex with spine-like setae.

Thorax. Yellowish-brown pro, meso, and metanotum. Fore leg (**Figure 9A**). Yellowish-brown femur, tibia, and tarsi. Fore femur. Length of about 3.9× maximum width; the outer margin with a row of 14–15 clavate setae alternating with a row of simple setae; inner margin with short spine-like setae. Fore tibia. Length of 0.74× the length to the fore femur. The outer margin with short simple setae and a short clavate seta; the inner margin with a row of short, spine-like setae and a row of short simple setae, the most apical spine-like setae biserrate (**Figure 9A**). Fore tarsus. Length of 0.45× the length to the fore femur. The outer margin with fine, simple setae; the inner margin with a row of spine-like setae. The tarsal claw with a row of 8–9 denticles (**Figure 9B**).

Abdomen. Terga variably tinged with yellowish-brown, pattern as in **figure 7**, tergum I, brownish, terga II-III broadly brownish with white laterally, tergum VI extensively white with central region brownish, terga V-VI broadly brownish with white laterally, tergum VII yellowish and tinged with brown only on posterior margin, tergum VIII lighter, terga IX and X brownish. Posterior margin of terga I-II smooth, with spines on terga III-X (**Figure 9C**). Slightly asymmetrical gills (**Figure 9D**), translucent-whitish, with the central region along the main trachea shaded with brown; the tracheae pigmented, marginal setae of uniform size, the outer margin more serrate than the inner margin. The paraprot (**Figure 9E**) with 9–13 spines on the inner margin. Cerci broken.

Adults. Unknown

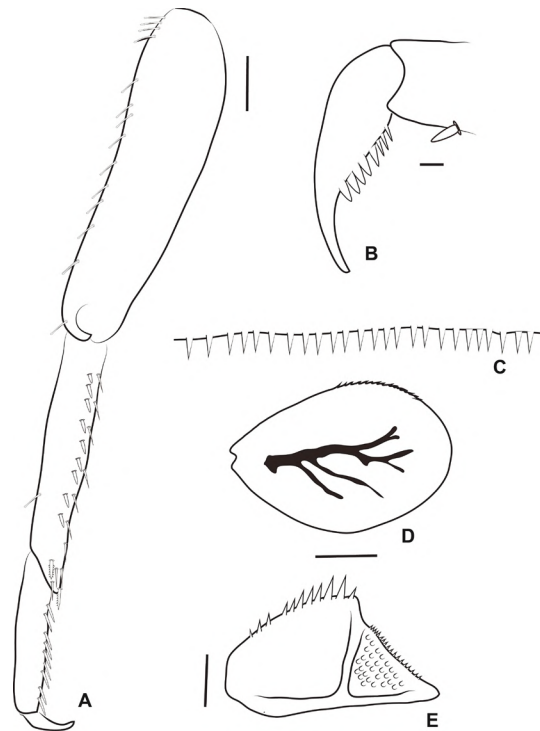


Figure 9. *Nanomis quindiensis* sp. nov., nymph. **A.** Fore-leg. **B.** Tarsal claw. **C.** Posterior margin of terga III-X. **D.** Gill IV. **E.** Paraproct. Scale bars: A, B = 0.1 mm. D, E = 0.05 mm

Etymology: The specific epithet is an adjective formed by Quindío and the suffix –ensis referring to the Colombian department where the species was found.

Discussion. *N. quindiensis* sp. nov. shows some similarities with *N. galera*. Both species possess the segment III of labial palp wide and rounded. However, the new species can be distinguished from *N. galera* by the number of incisors in the right mandible, 10 in *N. quindiensis* sp. nov. and 7 in *N. galera*. Besides, *N. quindiensis* sp. nov. has the posterior margin of terga I-II smooth and the terga III-IX with spines while in *N. galera* the terga I-V are smooth, and the terga VI-X have spines.

Type material. Holotype female mature nymph (mouthparts, legs, gills, and paraproct on a single slide; abdomen in alcohol), Colombia: Quindío: Calarcá, Río Santo Domingo, 04°30'45.2"N, 75°36'47.1" W, 1626m, 12/07/2016; Paola Villegas col (MIUQ). Paratypes. Four mature nymphs (two on slides), same data as holotype (4 MIUQ).

Distribution (Figure 10). Colombia, Quindío, La Vieja River basin, Alto Cauca.

KEY TO THE NYMPHS OF *Nanomis* SPECIES FROM SOUTH AMERICA

- 1 Segment III of labial palp wide (broader than longer) and rounded.....2
 - 1' Segment III of labial palp elongated (longer than broader) and rounded.....3
 - 2 Posterior margin of terga I-II smooth with spines on tergum III-X, right mandible with outer set of incisors with three denticles.....*Nanomis quindiensis* Salinas, sp. nov.
 - 2' Posterior margin of terga I-V smooth, with spines on tergum VI-X (those of terga VI-VIII, very small), right mandible with outer set of incisors with four denticles.....
.....*Nanomis galera*
 - 3 Outer margin of fore femur with row of 8–10 clavate setae posterior margin of terga I-IX smooth.....*Nanomis mariquitensis* Salinas, sp. nov.
 - 3' Outer margin of fore femur with more of 10 clavate setae.....4
 - 4 Outer margin of fore femur with row of 18–19 clavate setae posterior margin of terga I-IV smooth with spines on tergum V-X.....*Nanomis antoniae* Salinas, sp. Nov.
 - 4' Outer margin of fore femur with row of 11–15 clavate setae, posterior margin of terga I-VIII smooth, with spines on terga IX-X.....*Nanomis rasmusseni*

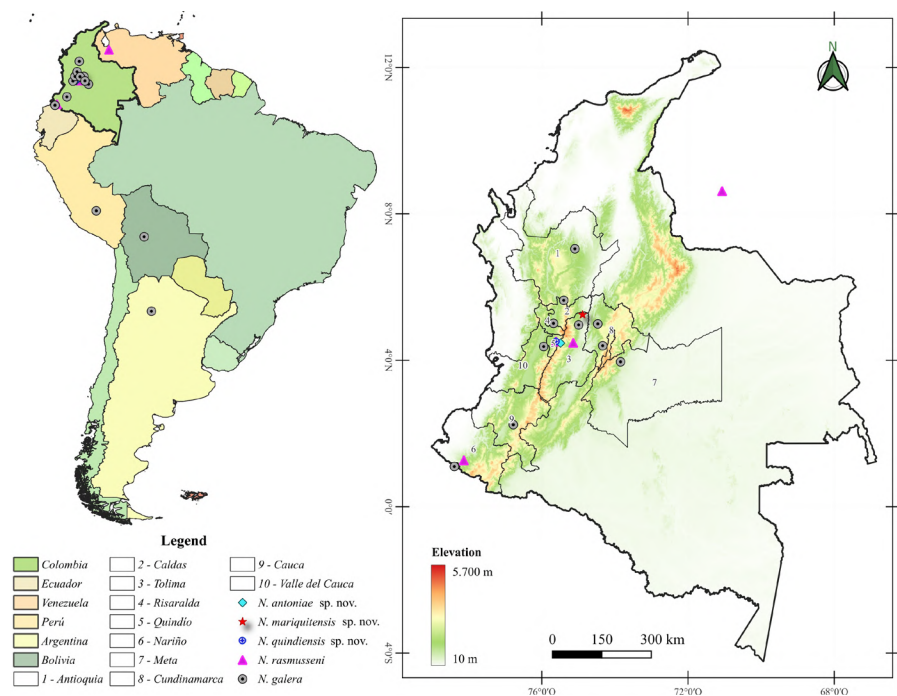


Figure 10. Distribution of the *Nanomis* species in Colombia and South America

General discussion

Intraspecific variation plays an important role in ecology and evolution (**Gentile et al.**, 2021) but information on how species and populations vary remains scarce, particularly for insects (**Gentile et al.**, 2021). Here, the individuals of the three different species described do not present a marked intraspecific variation and the analyzed nymphs are morphologically homogeneous.

The abdominal coloration patterns of *Nanomis* species can be useful in the identification process, for example, *N. galera* and *N. quindiensis* sp. nov. have a relatively uniform coloration, the first one with entirely yellowish-red body (**Chacon et al.**, 2015) and the latter with yellowish brown body. In contrast, *N. antoniae* sp. nov., *N. rasmusseni*, and *N. mariquitensis* sp. nov. present a coloration pattern with contrasting brown spots and other markedly lighter areas. The general brown coloration is darker in *N. antoniae* sp. nov. compared to the other species, but the head of *N. rasmusseni* is markedly darker than the rest of the body (**Chacon et al.**, 2013). Although they have conspicuous coloration patterns, we observed that nymphs may present variations, and, therefore, we recommend using other characters described in the key we present to differentiate between species: the spines of the posterior margin of terga, the segment II of the labial palp, and the clavate setae on the outer margin of the fore femur.

Chacon et al. (2013) mentioned that *N. galera* and *N. rasmusseni* are adapted to different environmental conditions, but it is necessary to expand the sampling effort of the new species we describe here to confirm their distribution pattern and tolerance to environments with anthropogenic alteration. Based on the information available to date, *N. galera* is the most widely distributed species of the genus (**Lugo-Ortiz & McCafferty**, 1999; **Domínguez et al.**, 2006; **Chacón et al.**, 2013; **Salinas et al.**, 2017).

Conclusion

The new species we describe here increase the number of species in the genus to five, thus contributing to the knowledge of *Nanomis* for Colombia and South America and improving its diagnosis with the addition of character states.

Acknowledgements

We thank Ramiro García A at the Faculty of Basic Sciences, Universidad del Quindío for the financial support granted to L.G.S.J. for three of the research visits (second semester, 2015, second semester, 2016, and June 2018). Cesar Román Valencia is grateful to the Research Vice-Rector at Universidad del Quindío for its financial support (project 824).

Authors' contributions

LGSJ: Conceptualization; LGSJ, CRV, LGD: Methodology, writing of the original draft; visualization and research. LGSJ, CRV, LGD: Writing, review, and editing of the manuscript. CRV: Funding acquisition. LGD: Supervision. All authors actively participated in the discussion of the results and they reviewed and approved the final version of the paper.

Conflicts of interest

The authors declare there are no conflicts of interest.

References

- Chacón, M. M., Pescador, M. L., Segnini, S.** (2013). New species of *Nanomis*. Lugo-Ortiz and McCafferty, 1999 (Ephemeroptera: Baetidae) from Venezuela. *Aquatic Insects: International Journal of Freshwater Entomology*, 35, 1-14.
- Dias, L.G., Zuñiga, M.C., Bacca, T.** (2009). Estado Actual del Conocimiento del Orden Ephemeroptera en Colombia. In: Congreso Sociedad Colombiana de Entomología, 36°. Memorias. Colombia, Sociedad Colombiana de Entomología, p. 236-253.

-
- Domínguez, E., Molineri, C., Pescador, M.L., Hubbard, M.D., Nieto, C.** (2006). Diversidad Acuática en América Latina. Vol. 2: Ephemeroptera de América del Sur. Sofía-Moscú, Pensoft.
- Gentile, G., Bonelli, S., Riva, F.** (2021). Evaluating intraspecific variation in insect trait analysis. *Ecological Entomology*, 46(1), 11-18.
- Hadley, A.** (2010). CombineZ software. <http://www.hadleyweb.pwp.blueyonder.co.uk/CZP/Installation.htm>
- Lugo-Ortiz, C.R. & McCafferty, W.P.** (1999). Three New Genera of Small Minnow Mayflies (Insecta: Ephemeroptera: Baetidae) from the Andean and Patagonia. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 34, 88-104.
- Salinas-Jiménez, L.G., Rojas-Peña, J.I., Osorio-Ramírez, D.P., Caro-Caro, C.I.** (2017). New records of Ephemeroptera from the Colombian Orinoco River basin of the Meta department. *Revista Colombiana de Entomología*, 43(2),271-276.
- Salinas-Jiménez, L.G., Villegas, P.A., Román-Valencia, C.** (2018). First record of the nymph of *Nanomis rasmusseni* Chacon, Pescador & Segnini, 2013 (Ephemeroptera: Baetidae) from Colombia. *Papéis Avulsos de Zoologia*, 58, 1-4.
- Salles, F.F. & Nieto, C.** (2008). The Adult Stages of *Nanomis* and *Spiritiops* (Ephemeroptera: Baetidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 67, 35-39.

Artículo original

Primer reporte de anfibios y reptiles en el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (Lima-Perú)

First report of amphibians and reptiles in The Pantanos de Villa Wildlife Refuge (Lima-Peru)

Diego A. Barrera-Moscoso^{1,2,*}, Grecia Torres-Ccasani¹, Dámaso W. Ramírez³

¹Departamento de Herpetología, Museo de Historia Natural, Lima, Perú.

²Laboratorio de Ecología Integrativa, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

³Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú.

Resumen

La necesidad de información biológica en las áreas naturales protegidas (ANPs) se presenta con mayor énfasis en los grupos taxonómicos de menor desplazamiento, como lo son anfibios y reptiles. Debido a esto, la presencia y reportes de distribuciones son considerados información relevante que ayuda a visibilizar la diversidad existente. El objetivo de la investigación es presentar una primera lista de anfibios y reptiles para el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (RVSPV) y delimitar la distribución dentro de esta ANP. El estudio se realizó entre el año 2019 al 2022 y tuvo como resultado el reporte de nueve especies. Reportamos dos especies de anfibios: *Rhinella marina* (Linnaeus, 1758) y *Hyloxalus littoralis* (Péfaur, 1984). También, reportamos siete especies de reptiles: *Stenocercus modestus* (Tschudi, 1845), *Pseudalsophis elegans* (Tschudi, 1845), *Microlophus thoracicus* (Tschudi, 1845), *Microlophus peruvianus* (Lesson, 1830), *Phyllodactylus microphyllus* (Cope, 1875), *Mastigodryas heathii* (Cope, 1875) y *Epictia tessellata* (Tschudi, 1845). Adicionalmente, delimitamos la distribución de las especies en las áreas evaluadas por hábitat: arenal, gramadal, arbustos, juncal, totoral y cuerpos de agua. Asimismo, presentamos un sonograma para *H. littoralis*, una especie endémica del Perú, actualizando sus parámetros bioacústicos. Estas contribuciones adicionan cuatro nuevos registros para el humedal: un anfibio y tres reptiles. Reportar la presencia y distribución de las especies permite visibilizarlos y generar una mejor toma de decisiones que ayudará a la conservación de este humedal.

Palabras clave: Humedales; Nuevos registros; Herpetofauna; Pantanos de Villa; Área costera; Inventario.

Abstract

The need for biological information on species in protected natural areas (PNA) occurs with greater emphasis on taxonomic groups with less movement, such as amphibians and reptiles. Due to this, distribution lists and reports are considered relevant information that helps make visible the existing diversity. The research aims to present a first list of amphibians and reptiles for the Los Pantanos de Villa Wildlife Refuge (RVSPV) and delimit the distribution within this ANP. The study was carried out between 2019 and 2022 and resulted in the report of nine species. We reported two species of amphibians: *Rhinella marina* (Linnaeus, 1758) and *Hyloxalus littoralis* (Péfaur, 1984). Also, we found seven species of reptiles: *Stenocercus modestus* (Tschudi, 1845), *Pseudalsophis elegans* (Tschudi, 1845), *Microlophus thoracicus* (Tschudi, 1845), *Microlophus peruvianus* (Lesson, 1830), *Phyllodactylus microphyllus* (Cope, 1875), *Mastigodryas heathii* (Cope, 1875), and *Epictia tessellata* (Tschudi, 1845). In addition, we delimited the species distribution in the different evaluated areas: sandy areas, grassland, bushes, reedbeds, reeds, and bodies of water. Likewise, we present a sonogram for *H. littoralis*, a species endemic to Peru, updating its bioacoustic parameters. These contributions add four new records: one amphibian and three reptiles. Reporting the presence and distribution of species makes them visible and generates better decision-making that will help the conservation of this wetland.

Keywords: Wetlands; New records; Herpetofauna; Pantanos de Villa; Coastal area; Inventory.

Citación: Barrera-Moscoso DA, *et al.* Primer reporte de anfibios y reptiles en el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (Lima-Perú). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):595-605, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.2561>

Editor: Martha Patricia Ramírez Pinilla

***Correspondencia:**

Diego A. Barrera-Moscoso;
diego.barrera@gmail.com

Recibido: 10 de febrero de 2024

Aceptado: 31 de agosto de 2024

Publicado en línea: 20 de septiembre de 2024



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

Introducción

Los humedales son considerados uno de los ecosistemas más productivos del planeta, albergando una importante diversidad biológica y brindando múltiples servicios ambientales a la humanidad, como captura de carbono y reservorio de agua dulce (Mitsch y Gosselink, 2015; Cronk y Fennessy, 2002; RAMSAR, 2006). Sin embargo, durante el siglo XX y principios del siglo XXI se perdieron entre el 64% y 71% de la superficie de estos ecosistemas a nivel mundial (Davidson, 2014). En consecuencia, los servicios ecosistémicos y la biodiversidad de estos ambientes se han reducido o degradado a tasas críticas y requieren acciones urgentes de conservación (Meleod *et al.*, 2011).

En el Perú, los humedales costeros son refugios de una biodiversidad frágil, no obstante, muchos han sido degradados o reducidos alterando sus procesos ecológicos y diversidad biológica (Cano y Young, 1998; Ramírez y Cano, 2010; Aponte y Cano, 2013; Ramírez *et al.*, 2018). Los Pantanos de Villa, por su diversidad de flora y fauna, es uno de los humedales más importantes de la costa central del Perú (León *et al.*, 1995; Cano y Young, 1998; Iannacone y Alvariano, 2007; Ramírez y Cano, 2010; Pacheco *et al.*, 2015). Una de las características resaltantes de esta ANP es su importancia como zona de descanso para aves migratorias, así mismo representa uno de los pocos humedales costeros dentro del casco urbano de Lima Metropolitana, por lo cual actúa como un refugio para la flora y fauna nativa de estos ecosistemas, y a su vez forma parte de un corredor biológico junto a otros humedales de la costa central del Perú. Destaca la fauna de vertebrados reportada en este lugar, entre ellas las aves (Pulido, 2018), mamíferos (Pacheco *et al.*, 2015) y peces (Cano y Young, 1998). En el caso de anfibios y reptiles reportados para el área, entre los primeros registros se menciona a la especie *Hyloxalus littoralis* pues tendría una población resguardada en el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (RVSLPV), así mismo también se menciona la introducción de otras especies como el *Caiman crocodilus* (Linnaeus, 1758) “Caiman blanco” (Icochea, 1998). Una guía fotográfica publicada por Tello y Castillo (2010), reconoce a dos especies de anfibios (*Hyloxalus littoralis* y *Rhinella limensis*) y cuatro especies de reptiles (*Microlophus peruvianus*, *Microlophus thorarcicus*, *Stenocercus modestus* y *Pseudoalsophis elegans*). El objetivo de esta investigación es registrar la presencia de especies de anfibios y reptiles para el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa, así como también delimitar la distribución de los anfibios y reptiles que habitan esta área natural protegida.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

El estudio fue llevado a cabo en el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (RVSLPV), ubicado en la Provincia de Lima, en el distrito de Chorrillos, entre los kilómetros 18 y 21 de la Antigua Carretera Panamericana Sur (12°12.665' Sur, 76°59.343' Oeste, 5 m.s.n.m.) (Figura 1). Este humedal comprende una superficie de 263 hectáreas (Ministerio de Agricultura, 2006), sin embargo, el presente estudio abarcó 242,24 hectáreas debido a la accesibilidad del área. El RVSPV se caracteriza por poseer seis espejos de agua de diferentes tamaños, que debido a la dinámica anual del humedal, puede variar su grado de inundación; canales alimentados por dos afloramientos (puquios) que abastecen al humedal; zonas pantanosas con abundante materia orgánica de origen vegetal (gramadales, juncales, totorales) y terrenos calcáreos-arenosos (Ramírez y Cano, 2010). La precipitación anual promedio es de 16 mm, los meses más cálidos son de noviembre a abril y los más fríos de mayo a octubre, la temperatura anual promedio es de 18,7 °C con una variación de 7,7 °C (Climate-data, 2020).

Diseño de muestreo y colecta de datos

El período de evaluación fue entre abril del 2019 a febrero del 2022 cubriendo así las épocas invierno (junio - septiembre) y verano (diciembre - marzo). El estudio se planificó y desarrolló siguiendo como referencia al “Mapa de Cobertura Vegetal del Refugio de

Vida Silvestre Los Pantanos de Villa”, propuesto en **Aponte *et al.* (2021)**. En el diseño muestral se delimitaron seis zonas de evaluación (**Figura 1**), tomando en cuenta el sustrato predominante y los hábitats presentes:

1. Arenal: Se caracteriza por poseer el suelo arenoso y sin vegetación. Se encuentra representado en dos áreas cercanas a zonas urbanas, colindante con las zonas de evaluación de gramadal, totoral, arbustiva y cuerpos de agua (laguna Marvella). Adicionalmente, es la única zona de evaluación que limita con el litoral del Pacífico Peruano.

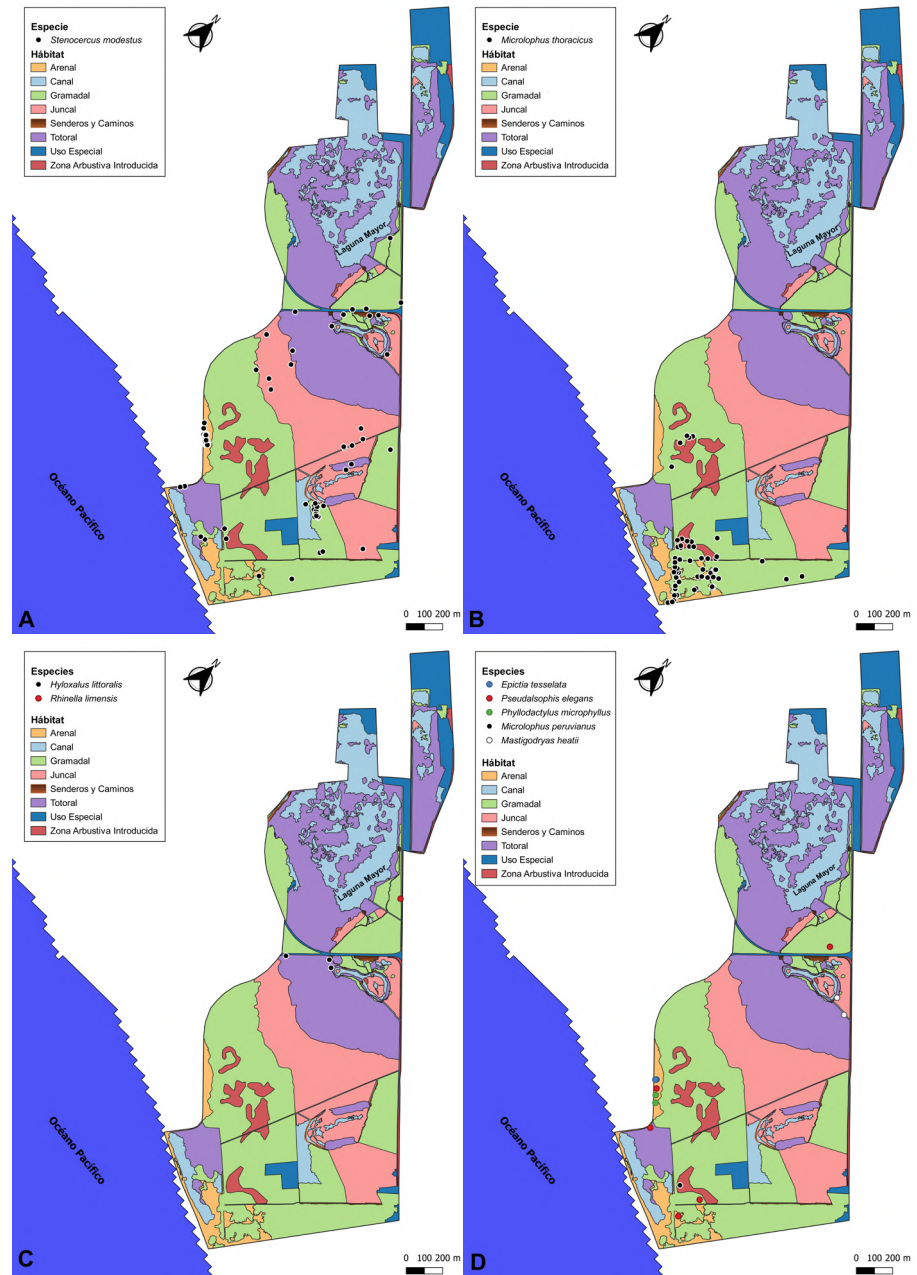


Figura 1. A. Distribución de *Stenocercus modestus* en los hábitats evaluados en el Refugio de Vida Silvestre los Pantanos de Villa. B. Distribución de *Microlophus thoracicus* en los hábitats evaluados en el Refugio de Vida Silvestre los Pantanos de Villa. C. Distribución de anfibios en los hábitats evaluados en el Refugio de Vida Silvestre los Pantanos de Villa. D. Distribución de otros reptiles en los hábitats evaluados en el Refugio de Vida Silvestre los Pantanos de Villa.

2. Gramadal: Se encuentra ubicado principalmente en el lado sur del humedal. Esta zona se caracteriza por estar dominado por las especies halófitas *Distichlis spicata* (L.) Greene y *Sporobolus virginicus* (L.) Kunth (Poaceae) conocidas como “grama salada” la vegetación es de porte herbáceo y presenta una altura promedio de 30–50 cm. El suelo es arenoso y húmedo con la napa freática próxima a la superficie (60-80 cm aproximadamente).

3. Totoral: Se encuentra principalmente en el lado Nor–Este del humedal. Posee un sustrato caracterizado por estar siempre inundado y la vegetación se distribuye asociada a los cuerpos de agua. Esta zona presenta una predominancia de totora (*Typha dominguensis* Pers.), otras especies secundarias son el carrizo (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud) y corta-corta (*Cladium jamaicense* (L.) Pohl); la vegetación alcanza una altura promedio de 2,5 – 3 m.

4. Juncal: Se encuentra principalmente en el lado Sur–Este del humedal. Esta zona se encuentra dominado por el junco (*Schoenoplectus americanus* (Pers.) Volk. ex Schinz & R. Keller), en algunos sectores puede encontrarse una codominancia con *Distichlis spicata* (L.) Greene; la vegetación presenta una altura de 1 –1,5 m. El sustrato se encuentra saturado e inundado, el grado de inundación del humedal puede cambiar debido a la dinámica anual.

5. Arbustiva: Se encuentra distribuido en cinco parches y posee un sustrato arenoso u orgánico dependiendo del parche. La zona se caracteriza por la presencia de especies arbustivas nativas como el manglillo (*Myrsine manglilla* (Lam.) R. Br.) e introducidas como la casuarina (*Casuarina equisetifolia* L.); la vegetación presenta una altura promedio de 3 – 6 m.

6. Cuerpos de agua: La zona incluye a las lagunas y los canales. Las lagunas son cuerpos de agua más grandes, se encuentran principalmente en el lado Nor–Oeste del humedal y uno adyacente al mar. Los canales alimentan al humedal y lo atraviesan hasta unirse a las lagunas.

El estudio abarcó un total de 73 unidades muestrales que fueron evaluadas en la época de verano e invierno, y el horario de las evaluaciones fue entre las 08:00 - 19:00 h. En cada zona de evaluación el número de unidades de muestreo varió de manera proporcional a la extensión del área y del grado de accesibilidad al humedal (**Tabla 1 y Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2561/4448>). En cada evaluación se realizó la metodología Relevamiento por Encuentros Visuales o VES (“*Visual Encounter Survey*”), la cual es estandarizada por el tiempo de búsqueda (**McDiarmid et al.**, 2012), y complementada con Registros Oportunistas (**Manzanilla y Péfaur.** 2000). Cada VES fue estandarizado a 30 minutos y realizado por dos observadores. Además, para la Laguna Mayor (**Figura 1**), perteneciente a la zona de evaluación de los cuerpos de agua, se realizó un recorrido en bote únicamente con la metodología de Registros Oportunos. Las evaluaciones contaron con la autorización de la Resolución Jefatural N° 008-2019-SERNANP-JEF, obtenida del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP).

Tabla 1. Hábitats delimitados para el presente estudio

Hábitats evaluados	Unidades de Muestreo	Hectáreas	Porcentaje
Arenal	10	6,88 ha	2,84%
Gramadal	19	73 ha	30,14%
Totoral	10	67,4 ha	27,82%
Juncal	23	52,2 ha	21,55%
Zona Arbustiva	7	5,86 ha	2,42%
Cuerpos de agua	4	36,9 ha	15,23%

La identificación de especies se realizó mediante la captura temporal (algunos individuos) y toma de fotografías. Las capturas temporales fueron manuales, y los individuos capturados se almacenaron en bolsas de plástico (anfibios) y en bolsas de tela (reptiles); posteriormente los individuos fueron liberados en el lugar donde fueron capturados. En las tomas fotográficas de las especies registradas se usó el equipo Canon EOS T6 con lentes de 18-55 mm y 75-300 mm. Se hizo énfasis en: el dorso, vientre, vista lateral y dorso lateral. A todos los individuos capturados se tomaron medidas de hocico-cloaca (SVL) con un vernier de dial de 150 mm. En el caso de la especie *Hyloxalus littoralis*, no se pudo llegar a detectar de manera visual, por lo que se registró su canto usando una grabadora digital Zoom H1 (formato de archivo de almacenamiento wav, 24 bits, 44.1 kHz), a una distancia mínima de un metro de la fuente de sonido.

Análisis de datos

Para la clasificación sistemática y taxonómica para anfibios se utilizó la recomendada por **Frost** (2024) y para reptiles según **Uetz et al.** (2023). Los datos obtenidos en los muestreos, a excepción de los registros oportunos, fueron usados para construir una matriz de especies. Los registros oportunos se emplearon solo para complementar la lista de especies. Los datos fueron analizados mediante el paquete “vegan” (**Oksanen et al.**, 2022) en la plataforma de R Studio (**RStudio Team**, 2016). A partir de la matriz se elaboró una curva de acumulación de especies usando la función “specaccum” de forma aleatorizada con 100 permutaciones. También se usó la función “specpool” para poder elaborar una curva de predicción de especies usando el estimador de Jackknife 1. Se utilizó este estimador debido a que presenta menos sesgo que otros estimadores comúnmente usados (**Brito et al.**, 2021). En la elaboración de los mapas se usó el programa ArcMap 10.6 (**ESRI**, 2018). Finalmente, para la especie *Hyloxalus littoralis* se realizó un análisis acústico en el programa Audacity 2.1.1 (**Audacity Team**, 2017). Se delimitaron las variables acústicas espectrales (frecuencia dominante y armónicas) y temporales (duración del canto, tiempo de incremento del canto, intervalo entre notas y pulsos), siguiendo lo sugerido por **Köhler et al.** (2017) y comparando a su vez la descripción del canto para la especie descrita por **Morales** (1998). Para los gráficos acústicos se usó el paquete “seewave” (**Sueur et al.**, 2008) en la plataforma de RStudio (**RStudio Team**, 2016).

Resultados

Riqueza de especies

Se registraron un total de nueve especies, dos anfibios de las familias Bufonidae y Dendrobatidae (**Tabla 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2561/4448>); y siete reptiles, de las familias Tropiduridae, Phyllodactylidae, Colubridae y Leptotyphlopidae (**Tabla 3S y Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2561/4448>). Cabe indicar que dos especies de serpientes, *Mastigodryas heathii*, *Epictia tessellata*, fueron registradas exclusivamente mediante Registros Oportunos, mientras que todas las demás fueron registradas en las unidades de muestreo.

La curva de acumulación de especies basada en el esfuerzo de muestreo realizado (73 VES) nos indica que la pendiente está aún en crecimiento (**Figura 1Sa**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2561/4448>) al solo contar con 7 especies como registros cuantitativos. Esto es verificado por el índice de Jackknife 1 que predice que el total de especies para el área sería de 11 (**Figura 1Sb**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2561/4448>), indicando que se registró el 63.6% de las especies estimadas por este indicador para la metodología cuantitativa de VES. Con los registros oportunos de las dos especies se tendría un total de nueve para el humedal, que representaría el 82% de las especies estimadas para el ANP.

Distribución de especies

Las especies de anfibios *Rhinella marina* y *Hyloxalus littoralis* fueron avistados en cuerpos de agua o total predominantemente húmedo. En el caso de *Rhinella marina*, fue

registrada dentro de una zona húmeda cerca de un canal ubicado en la zona de uso turístico del RVSPV (**Figura 1c y 2Sa**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/articulo/view/2561/4448>); esta especie es reportada como nuevo registro para el RVSPV. Por otro lado, *Hyloxalus littoralis* se registró en el hábitat de totoral, caracterizado por tener un sustrato muy húmedo con presencia densa de totora. La especie se confirmó debido a la identificación del canto de tres individuos (**Tabla 2 y figura 2**). Estos cantos se registraron en dos diferentes lugares dentro del RVSPV, pero debido a la inaccesibilidad del lugar no se pudo realizar la captura de los individuos.

Las especies de saurios reportados en el estudio fueron *Pseudalsophis elegans*, *Epictia tessellata*, *Phyllodactylus microphyllus*, *Microlophus peruvianus*, *Microlophus thoracicus* y *Stenocercus modestus*. La serpiente *Pseudalsophis elegans* se encuentra ubicada en las zonas de gramadal y arenal. Mientras, *Mastigodryas heathii*, fue encontrada en la zona de totoral (**Figura 1 y Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/articulo/view/2561/4448>); este sería el primer registro de la especie para el RVSLPV. Por otro lado, *Epictia tessellata*, fue reportada en la zona de arenal, debajo de los cúmulos de hojas

Tabla 2. Comparación de parámetros acústicos entre el presente estudio y Morales (1998) para la población de Lima de la especie *Hyloxalus littoralis*

Parámetros acústicos	Morales (1998) N=2	Presente estudio N=3
Duración del canto (s)	0,143	0,156
Tiempo de incremento del canto (s)	N.E.	0,042
Intervalo entre notas (s)	N.E.	0,878
Pulsos	13,5	13,5
Frecuencia dominante (Hz)	3860,4	3961,5
Presencia de frecuencias armónicas	N.E.	1

N.E.: No evaluado

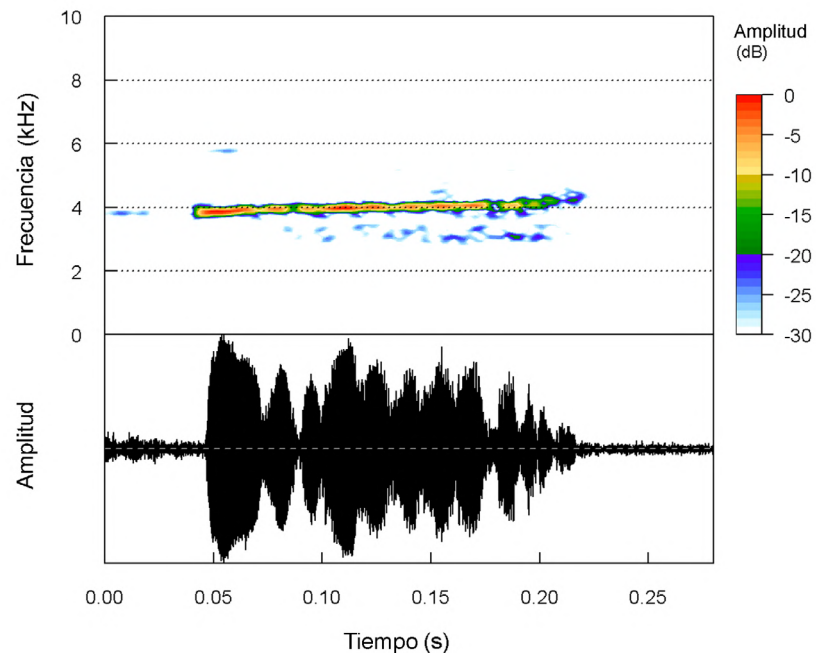


Figura 2. Representación acústica (espectrograma y oscilograma) del canto de *Hyloxalus littoralis*.

de palmeras aledañas (**Figura 3Sb**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2561/4448>). Este reporte es el primer registro de la especie para el RVSLPV. Tanto *Phyllodactylus microphyllus* como *Microlophus peruvianus*, fueron reportadas en la zona de arenal (**Figura 1d**) (**Figura 3Sa, d**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2561/4448>), ambas se reportan por primera vez en el RVSLPV. Asimismo, los individuos de *Microlophus thoracicus*, fueron encontrados en gramadal y arenal aledañas al mar y la Laguna Marvilla (**Figura 1B**). Finalmente, la especie *Stenocercus modestus*, fue avistada en la mayoría de las zonas como gramadal, arbustos, arenal, totoral y juncal (**Figura 1A y Figura 3Sb**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/2561/4448>).

Discusión

El presente estudio reportó un total de nueve especies de herpetozoos, siendo mayor el número de especies de reptiles (siete) que de anfibios (dos). La localidad de estudio se ubica dentro del bioma de desierto costero del centro del Perú, por lo que la predominancia de reptiles sobre anfibios era esperada debido a que es un paisaje árido (**Icochea**, 1998).

Para la región de Lima, **Aguilar et al.** (2007) reporta con base en registros propios y en los estudios previos de **Rodríguez et al.** (1993) y **Carrillo e Icochea** (1995) la presencia de siete especies de anfibios y 33 de reptiles, debido a que abarca la parte de costa y sierra de dicho departamento. Por otro lado, **Tello y Castillo** (2010) reportan para Pantanos de Villa dos especies de anfibios y tres de reptiles, dando un total de cinco especies de herpetozoos.

Dentro de los anfibios reportados actualmente se cuenta con la especie *Rhinella marina*, la cual es considerada una especie introducida en el área de estudio, ya que presenta una distribución cuyo origen se da en los bosques tropicales y subtropicales de los países centro y sur – americanos (**Ward-Fear et al.**, 2016; **Vallinoto et al.**, 2010). Por otro lado, en Australia se considera una especie invasora, pues se han registrado numerosos casos de desplazamientos ecológicos y competencia con especies nativas (**Shine**, 2014). El avistamiento de esta especie fue principalmente en hábitats de cuerpo de agua, sin embargo, en el estudio de **Tello y Castillo** (2010) se reportaba a *Rhinella limensis* cuyos hábitats propicios son los mismos (**Angulo y Aguilar**, 2003). La ausencia de la especie podría deberse a que las interacciones de *Rhinella marina* con otros anuros en un mismo ecosistema pueden variar desde depredación, competencia hasta transferencia de parásitos (**Shine**, 2014), por lo que puede llegar a ser una amenaza para las comunidades de anfibios donde su presencia no es natural. Esto último ocurre ya que el método de supervivencia de *R. marina* es aprovechar los cuerpos de agua, por más pequeño o grande que sea; este tipo de comportamiento flexible le ha permitido invadir y colonizar nuevos territorios (**Tingle y Shine**, 2011). Por otra parte, *Hyloxalus littoralis*, descrita en las costas del litoral peruano (**Péfaur**, 1984), es considerada introducida pues su distribución abarca los valles interandinos de regiones centro del Perú (**Morales**, 1998). Adicionalmente, en el RVSLPV las poblaciones están presentes debido al abundante flujo de agua, alta vegetación y ausencia de depredadores potenciales (**Morales**, 1998). Asimismo, el canto de la especie obtenido en el presente estudio coincide con las características acústicas para la población de Lima descrita por **Morales** (1998) pues la duración de cada canto de 0,15 segundos estaba constituido por 13 a 14 notas y su frecuencia dominante con un promedio de 3961 Hz (**Tabla 2**).

Finalmente, se adicionan variables acústicas temporales (tiempo de incremento de canto e intervalo de notas) y espectrales (frecuencia fundamental y frecuencias armónicas) a las descritas por **Morales** (1998) siguiendo lo recomendado por **Köhler et al.** (2017) de proveer la mayor cantidad de información para descripciones de cantos de anfibios.

En el caso de los reptiles la especie que más destaca dentro de este grupo debido a su importancia en aspectos de conservación es *Stenocercus modestus*. Esta especie fue reportada para el RVSLPV por **Tello y Castillo** (2010), sin embargo, no existía detalle relacionado a su ubicación y estatus poblacional (**Ramírez et al.**, 2018). En el presente estudio se reportó un número considerable de individuos en diferentes estadios etarios, además de su presencia en

casi todas las áreas zonificadas para el presente estudio del RVSLPV; esto es importante para poder tomar decisiones en cuanto a los esfuerzos de conservación en torno a esta especie, pues su categoría de En Peligro por el Estado Peruano en el D.S. N° 004-2014-MINAGRI y la IUCN (2023) es justificada por el desconocimiento en cuanto a su distribución y sus tamaños poblacionales y los impactos en su hábitat (Pérez y Ramírez, 2016). Asimismo, *S. modestus* fue avistado en áreas con predominancia de totoral y juncal, lo que ampliaría los microhábitats presentados en el estudio de Pérez *et al.* (2012).

Las especies *Epictia tessellata*, *Phyllodactylus microphyllus* y *Microlophus peruvianus* poseen como único hábitat al arenal; esto concuerda con su distribución conocida en zonas costeras desérticas como dunas, arenales y playas (Dixon y Huey, 1970; Carrillo e Icochea, 1995; Pérez y Llellish, 2015; Mármol-Guijarro y Galarza-Verkovitch, 2019). Sin embargo, sobre *Epictia tessellata* se conoce muy poco, pues se sabe que tiene hábitos fosoriales, la localidad tipo está en Lima Metropolitana y está presente en los parques y jardines, además de haberse registrado dentro de casas (Schmidt y Walker, 1943; Carrillo, 1970).

Otras especies como *Hyloxalus littoralis* y *Mastigodryas heathii* fueron avistadas únicamente en el totoral, ello corresponde con la distribución de ambas especies en zonas costeras del Perú, en el caso específico de *H. littoralis*, con predominancia de hábitats con presencia de agua y herbáceas (Montingelli y Zaher, 2011; Pazmiño-Otamendi, 2020; Péfaur, 1984).

Las especies *Pseudalsophis elegans* y *Microlophus thoracicus* prefieren al gramadal y el arenal; ambas especies habitan en zonas desérticas costeras e interiores (Myers y Hoogmoed, 1974). En el caso específico de *Microlophus thoracicus*, el hábitat recurrente de esta especie son las playas rocosas, dunas, con o sin vegetación (Dixon y Wright, 1975).

El Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa tendría un rol importante como área de conservación pese a haber perdido más del 70 % de su tamaño original histórico (Instituto Nacional de Recursos Naturales, 1998). Además, posee una población endémica de la especie *Stenocercus modestus* reportada dentro de una ANP. Por ello, se recomienda reforzar la gestión del RVSLPV para que se cumpla con los límites y funciones de las zonas de Protección Estricta, Silvestre y Recuperación y por ende sean respetadas en pro de preservar y asegurar la continuidad de las comunidades de herpetozoos.

Información suplementaria

Consultar la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2561/4448>

Agradecimientos

Agradecemos por los permisos brindados para la presente investigación a la Jefatura del Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (RJ N° 008-2019-SERNANP-JEF) y a la Autoridad Municipal de los Pantanos de Villa PROHVILLA, así como a los directores y personal de cada institución quienes nos brindaron las facilidades durante el trabajo de campo. A su vez, agradecemos a la Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Universidad Científica del Sur por el respaldo institucional y financiamiento mediante el proyecto 026-2020-PR099. Los autores agradecen a Alejandro Mendoza y Angelika Lujan por el apoyo para la elaboración de los mapas. Agradecemos a José Pérez y Alejandro Mendoza por la revisión preliminar del manuscrito. Agradecemos a Jorge Luis Ubillas Herrera por facilitarnos una foto de la especie *Mastigodryas heathii*. Finalmente, agradecemos a Adrian Wong, Martin Silva y Helena Vásquez por ser parte del equipo de campo.

Contribución de los autores

D.B.M.: conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, software, administración del proyecto, supervisión, visualización, preparación del borrador original, redacción, revisión y edición del manuscrito. G.T.C.: conceptualización, administración del

proyecto, supervisión, análisis formal, investigación, metodología, preparación del borrador original, redacción, revisión y edición del manuscrito. D.R.H.: conceptualización, recursos, adquisición de fondos, investigación, revisión y edición del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Aguilar, C., Lundberg, M., Siu-Ting, K., Jiménez, M. E.** (2007). Nuevos registros para la herpetofauna del departamento de Lima, descripción del renacuajo de *Telmatobius rimac* Schmidt, 1954 (Anura: Ceratophryidae) y una clave de los anfibios. *Revista Peruana de Biología*, 14(2), 209-216. <https://doi.org/10.15381/rpb.v14i2.1736>
- Angulo, A., Aguilar, C.** (2003). The tadpole of *Bufo limensis* (Werner, 1901) (Anura: Bufonidae). *Amphibia-Reptilia*, 24(3), 400-405. <https://doi.org/10.1163/156853803322440862>
- Aponte, H., Cano, A.** (2013). Estudio florístico comparativo de seis humedales de la costa de Lima (Perú): Actualización y nuevos retos para su conservación. *Revista Latinoamericana de Conservación*, 3(2), 15-27.
- Aponte, H., Corvacho, M.F., Lertora, G., Ramírez, D.** (2021). Reserva de Carbono en un humedal del desierto costero de Sudamérica. *Gayana Botánica*, 78(2), 184-190. <https://doi.org/10.4067/s0717-66432021000200184>
- Audacity Team.** (2017). *Audacity(R): Free audio editor and recorder*. Version 2.2.1. [Revisada en: 2 feb 2022]. <https://www.audacityteam.org>
- Brito P.G., Jovem-Azevêdo, D., de Araújo Campos, M., Paiva, F. F., Molozzi, J.** (2021). Performance of richness estimators for invertebrate inventories in reservoirs. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(10), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09487-z>
- Cano, A., Young, K. R.** (1998). *Los Pantanos de Villa: Biología y Conservación. Serie de Divulgación No. 11*. Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Carrillo, N., Icochea, J.** (1995). Lista taxonómica preliminar de los reptiles vivientes del Perú *Publicaciones del Museo de Historia Natural "Javier Prado", Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Serie A, Zoología*, 49, 1-27.
- Carrillo de Espinoza, N.** (1970). Contribución al conocimiento de los reptiles de Perú (Squamata, Crocodylia, Testudinata, Reptilia). *Publicaciones del Museo de Historia Natural "Javier Prado", Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Serie A, Zoología*, 22, 1-63.
- Climate-Data.** (2020). *Clima Lima: temperatura, climograma y tabla climática para Lima*. [Revisada en: 18 jun 2020]. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/peru/lima/lima-1014/>
- Cronk, J. K., Fennessy, M. S.** (2002). Wetland plants: biology and ecology. *Choice Reviews Online*, 39(08), 39-4566. <https://doi.org/10.5860/choice.39-4566>
- Davidson, N. C.** (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10), 934-941. <https://doi.org/10.1071/MF14173>
- Dixon, J. R., Huey, R. B.** (1970). Systematics of the lizards of the gekkonid genus *Phyllodactylus* of mainland South America. *Contributions in Science*, 192, 1-78. <https://www.biodiversitylibrary.org/part/241179>
- Dixon, J. R., Wright, J. W.** (1975). A review of the lizards of the iguanid genus *Tropidurus* in Peru. *Contributions in Science*, 271, 1-39. <https://www.biodiversitylibrary.org/part/214214>
- ESRI** (2018). *ArcGIS Desktop: Release 10.6*. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. [Revisada en: 27 mar 2022]. <https://www.esri.com/en-us/home>
- Frost, D. R.** (2024). Amphibian Species of the World: An Online Reference. Version 6.1. Electronic Database accessible at <https://amphibiansoftheworld.amnh.org/index.php>. American Museum of Natural History, New York, USA.
- Iannacone, J., Alvarino, L.** (2007). Diversidad y abundancia de comunidades zooplanctónicas litorales del humedal Pantanos de Villa, Lima, Perú. *Gayana*, 71(1), 49-65. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382007000100006>
- Icochea, J.** (1998). Lista roja preliminar de los anfibios y reptiles amenazados del departamento de Lima. En A. Cano y K. Young (Eds.), *Los Pantanos de Villa: Biología y Conservación* (pp. 217-229). Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Serie de Divulgación No. 11.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA].** (1998). *Plan Maestro del Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa 1998-2003*. <https://aquadocs.org/handle/1834/8241>

- Köhler, J., Jansen, M., Rodriguez, A., Kok, P. J., Toledo, L. F., Emmrich, M., Glaw, F., Haddad, C. F. B., Rödel, M.O., Vences, M.** (2017). The use of bioacoustics in anuran taxonomy: theory, terminology, methods and recommendations for best practice. *Zootaxa*, 4251(1), 1-124. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4251.1.1>
- León, B., Cano, A., Young, K. R.** (1995). La flora vascular de los Pantanos de Villa, Lima, Perú: Adiciones y guía para las especies comunes. *Publicaciones del Museo de Historia Natural, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Serie Botánica* (B), 38, 1-39.
- Manzanilla, J., Péfaur, J. E.** (2000). Consideraciones sobre métodos y técnicas de campo para el estudio de anfibios y reptiles. *Revista de Ecología Latino Americana*, 7(12),17-30.
- Mármol-Guijarro, A., Galarza-Verkovitch, D.** (2019). *Microlophus peruvianus* En: Torres-Carvajal O, Pazmiño-Otamendi G, Salazar-Valenzuela D. Reptiles del Ecuador. Version 2019.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. [Revisada en: 7 nov 2021]. <https://bioweb.bio/faunaweb/reptiliaweb/FichaEspecie/Microlophus%20peruvianus>
- McDiarmid, R., Foster, M., Guyer, C., Gibbons, J., Chernoff, N.** (2012). *Reptile Biodiversity: Standard Methods for Inventory and Monitoring*. Berkeley: University of California Press. <https://doi.org/10.1525/9780520952072>
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Bjork, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., Silliman, B. R.** (2011). A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10): 552-560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Ministro de Agricultura.** (2006). Decreto Supremo N° 055-2006-AG-Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa. Diario Oficial El Peruano. <https://legislacionanp.org.pe/wp-content/uploads/2006/09/Decreto-Supremo-No-055-2006-AG.pdf>
- Ministro de Desarrollo Agrario y Riego.** (2014). Decreto Supremo N° 004-2014-MINAGRI-Actualización de la Lista de Clasificación y Categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas. Diario Oficial El Peruano. <https://www.senace.gob.pe/wp-content/uploads/filebase/senacenormativa/NAT-3-3-05-DS-004-2014-MINAGRI.pdf>
- Mitsch, W., Gosselink, J.** (2015). *Wetlands*, 5th edition (5th edition). John Wiley & Sons. https://archive.org/details/Wetlands_5th_Edition_by_William_J._Mitsch_James_G._Gosselink
- Montingelli, G. G., Zaher, H.** (2011). New Species of *Mastigodryas* Amaral, 1934 from Brazilian Amazonia and Guyana (Serpentes: Colubridae). *Journal of Herpetology*, 45(1),111–119. <https://doi.org/10.1670/09-170.1>
- Morales, V.R.** (1998). Observaciones sobre la historia natural del *Colostethus littoralis* (Amphibia, Anura, Dendrobatidae). En Cano, A. and Young, K.R. (Eds), *Los Pantanos de Villa. Biología y Conservación* (pp. 211-216). Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Serie de Divulgación No. 11.
- Myers, C. W., Hoogmoed, M. S.** (1974). Zoogeographic and taxonomic status of the South American snake *Tachymenis surinamensis* (Colubridae). *Zoologische Mededelingen*, 48(17),187-194. <https://repository.naturalis.nl/pub/318431/ZM1974048017.pdf>
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'hara, R. B., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H., Wagner, H., Oksanen, M. J.** (2022). *vegan: Community Ecology Package, (version 2.62)*. En <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/index.html>
- Pacheco, V., Zevallos, A., Cervantes, K., Pacheco, J., Salvador, J.** (2015). Mamíferos del Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa, Lima-Perú. *Científica*, 12(1), 26-41.
- Pazmiño-Otamendi, G.** (2020). *Mastigodryas heathii* En: Torres-Carvajal, O., Pazmiño-Otamendi, G., Ayala-Varela, F. y Salazar-Valenzuela, D. Reptiles del Ecuador. Version 2021.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. [Revisada en: 7 nov 2021] <https://bioweb.bio/faunaweb/reptiliaweb/FichaEspecie/Mastigodryas%20heathii>
- Péfaur, J. E.** (1984). A new species of Dendrobatid frog from the coast of Peru. *Journal of herpetology*, 18(4) 492-494. <https://doi.org/10.2307/1564113>
- Pérez, J., Echevarría, L. Y., Álvarez, S. C., Vera, A., Alarcon, G., Andia, M.** (2012). Ecología trófica de la lagartija *Stenocercus modestus* (Squamata: Tropiduridae) en una zona urbana, Lima, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 19(3), 323-325. <https://doi.org/10.15381/rpb.v19i3.1047>
- Pérez, Z.J., Llellish, M.** (2015). Reptiles terrestres de la isla San Lorenzo, Lima, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 22(1), 119-122. <https://doi.org/10.15381/rpb.v22i1.11130>
- Pérez, J., Ramirez-Peralta, A.** (2016). *Stenocercus modestus*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2016*: e.T48617147A48617165. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-1.RLTS.T48617147A48617165.en>

- Pulido, V.** (2018). Ciento quince años de registros de aves en Pantanos de Villa. *Revista Peruana de Biología*, 25(3), 291-306. <https://doi.org/10.15381/rpb.v25i3.15212>
- RAMSAR.** (2006). *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)* (4a ed.). Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar.
- Ramírez, D. W., Aponte, H., Lertora, G., Gil, F.** (2018). Incendios en el humedal Ramsar Los Pantanos de Villa (Lima-Perú): Avances en su conocimiento y perspectivas futuras. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(3), 347-360. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2018.398>.
- Ramírez, D. W., Cano, A.** (2010). Estado de la diversidad de la flora vascular de los Pantanos de Villa (Lima - Perú). *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 111-114. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v17i1.58>
- Rodríguez, L. O., Córdova, J. H., Icochea, J.** (1993). Lista preliminar de los anfibios del Perú. *Publicaciones del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Serie A*, 45, 1-22.
- RStudio Team.** (2016). *RStudio: Integrated Development for R*. Version 3.6.3. Inc. Boston. [Revisada en: 7 feb 2022]. <http://www.rstudio.com/>.
- Schmidt, K. P., Walker, J. R.** (1943). Snakes of the Peruvian coastal region. *Zoological Series Field Museum of Natural History, Chicago*, 24, 297-327. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/21044>
- Shine, R.** (2014). A review of ecological interactions between native frogs and invasive cane toads in Australia. *Austral Ecology*, 39(1), 1-16. <https://doi.org/10.1111/aec.12066>
- Sueur J, Aubin T, Simonis C.** (2008). Seewave: a free modular tool for sound analysis and synthesis. *Bioacoustics*, 18(2): 213-226. <https://doi.org/10.1080/09524622.2008.9753600>
- Tello, A., Castillo, L.** (2010). *Humedales de la región Lima: Guía de su fauna y flora silvestre* (Primera Edición). Gobierno Regional de Lima.
- Tingley, R., Shine, R.** (2011). Desiccation risk drives the spatial ecology of an invasive anuran (*Rhinella marina*) in the Australian semi-desert. *PLoS ONE*, 6(10), e25979. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025979>
- Uetz, P., Freed, P., Aguilar, R., Reyes, F., Kudera, J., Hošek, J.** (2023) *The Reptile Database*. <http://www.reptile-database.org>
- Vallinoto, M., Sequeira, F., Sodr , D., Bernardi, J. A. R., Sampaio, I., Schneider, H.** (2010). Phylogeny and biogeography of the *Rhinella marina* species complex (Amphibia, Bufonidae) revisited: implications for Neotropical diversification hypotheses. *Zoologica Scripta*, 39(2), 128-140. <https://doi.org/10.1111/j.1463-6409.2009.00415.x>
- Ward-Fear, G., Greenlees, M. J., Shine, R.** (2016). Toads on Lava: Spatial Ecology and Habitat Use of Invasive Cane Toads (*Rhinella marina*) in Hawai'i. *PLoS ONE*, 11(3), e0151700. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151700>

Artículo original

Ampliación del ámbito geográfico de isópodos terrestres (Oniscidea) para el Caribe colombiano y primer registro de *Nagurus nanus* (Trachelipodidae) para Colombia

Geographic range extension of terrestrial isopods (Oniscidea) for the Colombian Caribbean and first record of *Nagurus nanus* (Trachelipodidae) for Colombia

Agustín E. Bravo-Rodríguez¹, Carlos Mario López-Orozco^{2,3}, Carlos A. Nisperuza-Pérez^{1,4}, Jorge A. Quirós-Rodríguez⁴, Néstor Hernando Campos-Campos^{5,*}

¹ Grupo de Investigación en Biotecnología - GRUBIODEQ, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia

² Grupo de Investigación Hidrobiología, Programa de Biología, Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia

³ Laboratório de Estudos Subterrâneos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil

⁴ Grupo de Investigación Química de los Productos Naturales - PRONAT, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Química, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia

⁵ Instituto de Estudios en Ciencias del Mar - CECIMAR, Universidad Nacional de Colombia, San Andrés Islas, Colombia

Citación: Bravo-Rodríguez AE, et al., Ampliación del ámbito geográfico de isópodos terrestres (Oniscidea) para el Caribe colombiano y primer registro de *Nagurus nanus* (Trachelipodidae) para Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):606-622, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.2630>

Editor: Juan Manuel Díaz Merlano

***Correspondencia:** Néstor Hernando Campos-Campos; nhcamposc@unal.edu.co

Recibido: 19 de abril de 2024

Aceptado: 5 de septiembre de 2024

Publicado en línea: 18 de septiembre de 2024

Resumen

Los isópodos terrestres constituyen uno de los grupos con mayor diversidad dentro del orden Isopoda. Hasta la fecha no se había documentado la presencia de estos organismos en el departamento de Córdoba. Recientes exploraciones en diferentes zonas del departamento permitieron identificar un total de 17 especies pertenecientes a las familias Ligiidae, Tylidae, Detonidae, Halophilosciidae, Stenoniscidae, Rhyscotidae, Platyarthridae, Trachelipodidae, Agnaridae y Armadillidae; estos son los primeros registros del grupo en el departamento. *Nagurus nanus* se registra por primera vez en el país y *Rhyscotoides parallelus* en el Caribe colombiano. Se brindan datos de la historia natural y la distribución global y local de cada una de estas especies.

Palabras clave: Cochinillas; Crustáceos; Departamento de Córdoba, Colombia; Distribución; Neotrópico.

Abstract

Terrestrial isopods represent one of the most diverse groups within Isopoda. To date, their presence had not been documented in the department of Córdoba, Colombia. After examining material from different areas of the department, we identified 17 species belonging to the Ligiidae, Tylidae, Detonidae, Halophilosciidae, Stenoniscidae, Rhyscotidae, Platyarthridae, Trachelipodidae, Agnaridae, and Armadillidae families recording them for the first time for Córdoba. *Nagurus nanus* is recorded for the first time for the country and *Rhyscotoides parallelus* for the Colombian Caribbean. We also provide information on natural history and global and local distribution data for each species.

Keywords: Woodlice; Crustaceans; Department of Córdoba, Colombia; Distribution; Neotropics.

Introducción

Los isópodos terrestres son crustáceos del orden Isopoda, suborden Oniscidea, comúnmente conocidos como “cochinillas de humedad” o “marranitos de tierra”. Este grupo representa el único linaje dentro de los crustáceos que ha logrado colonizar completamente el ambiente terrestre y habita en desiertos, áreas húmedas, zonas intermareales, cuevas y



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

sitios por encima de los 4.000 m s.n.m. (Warburg, 1993; Schmalzfuss, 2003; Sfenthourakis *et al.*, 2020). Actualmente se reconocen más de 4.000 especies a nivel mundial, agrupadas en más de 500 géneros y 38 familias (Javidkar *et al.*, 2015, 2017; Sfenthourakis & Taiti, 2015; Dimitriou *et al.*, 2019). En cuanto a su filogenia, varios autores consideraban el suborden como un grupo monofilético con base en datos morfológicos (Schmalzfuss, 1989; Wägele, 1989; Erhard, 1998; Schmidt, 2008), pero los más recientes estudios moleculares relacionan el género *Ligia* con grupos marinos, lo que pone en duda la monofilia de Oniscidea (Lins *et al.*, 2017; Dimitriou *et al.*, 2019).

En los ecosistemas naturales los isópodos terrestres desempeñan un papel fundamental en el procesamiento de la materia orgánica y el ciclo de los nutrientes (Zimmer & Topp, 1999; Špaldoňová & Frouz, 2014; Abd El-Wakeil, 2015). Estos organismos y otros detritívoros son los responsables de fragmentar la hojarasca acumulada, contribuyendo a la desintegración, reciclaje y eliminación de elementos tóxicos en los entornos naturales y facilitando la liberación de nutrientes esenciales para el desarrollo de la flora circundante (Quadros & Araujo, 2008; Da Silva *et al.*, 2014). Por otra parte, la presencia de isópodos terrestres sinantrópicos (aquellos que se han adaptado a ambientes modificados por humanos), puede tener efectos negativos en la estructura del suelo y generando problemas en entornos naturales, cultivos y jardines (Martínez *et al.*, 2014; García, 2015).

Aunque los estudios sobre Oniscidea han aumentado a nivel global (Vittori & Dominko, 2022), en Colombia han sido intermitentes (Richardson, 1912; Pearse, 1915; Vandell, 1972; Taiti *et al.*, 1995; Leistikow, 2001a, 2001b; Schmidt, 2007; Martínez *et al.*, 2014). En los últimos años se han registrado y descrito varias especies, lo que evidencia la elevada riqueza del grupo a nivel nacional. Hasta el 2023, se habían registrado en Colombia 72 especies de Oniscidea, agrupadas en 18 familias y 34 géneros, 41 de ellas en el Caribe (López-Orozco *et al.*, 2014, 2016, 2017, 2022; Carpio-Díaz *et al.*, 2016, 2018, 2021, 2023a, 2023b; Campos-Filho *et al.*, 2020). La mayor parte de los registros provienen del centro del país, en tanto que en el Caribe corresponden a los departamentos de Bolívar y Magdalena, sin que hasta la fecha existieran registros en Córdoba.

Recientes exploraciones en diversos ambientes de la región cordobesa revelaron la existencia de 17 especies de isópodos terrestres que representan los primeros datos sobre la presencia del grupo en el departamento. Entre dichas especies se encuentra el primer registro de *Nagurus nanus* (Budde-Lund, 1908) en Colombia y *Rhyscotoides parallelus* (Budde-Lund, 1893) en el Caribe colombiano.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el departamento de Córdoba, en el suroccidente del Caribe colombiano, entre los 9°26'16" N - 74°47'43" W y los 74°22'05" N - 76°30'01" W (Figura 1). Esta región abarca cerca de 3.570 km² de área protegida en el Parque Nacional Natural Paramillo en la zona sur, con 140 km de costa marina, 1.000 km² de humedales permanentes y 1.220 km de ríos. Los principales ecosistemas naturales suman 487.871 ha de manglares, estuarios, sabanas costeras, complejos lagunares, bosque seco y bosque húmedo tropical, entre otros. El clima es cálido, con una temperatura promedio anual de 27 a 28 °C, una humedad relativa del 80 % y periodos secos y lluviosos (Ballesteros & Linares, 2015; FUNSOSTENIBLE & CVS, 2017).

Las especies se recolectaron en los municipios de Tierralta, Montería, San Pelayo, Momil, San Antero y Puerto Escondido, pertenecientes a cuatro subregiones del departamento: Alto Sinú, entre los municipios de Tierralta y Valencia, donde se encuentra aproximadamente el 60 % del bosque húmedo tropical de Córdoba; Medio Sinú, que comprende los municipios de Montería, San Pelayo, Ciénaga de Oro y San Carlos, cuya vegetación natural ha desaparecido debido a la expansión de las actividades agropecuarias, quedando únicamente pequeños parches de vegetación riparia localizados a las orillas del río; Bajo Sinú, en la parte baja del departamento, municipios de Lorica, Chimá, Purísima,

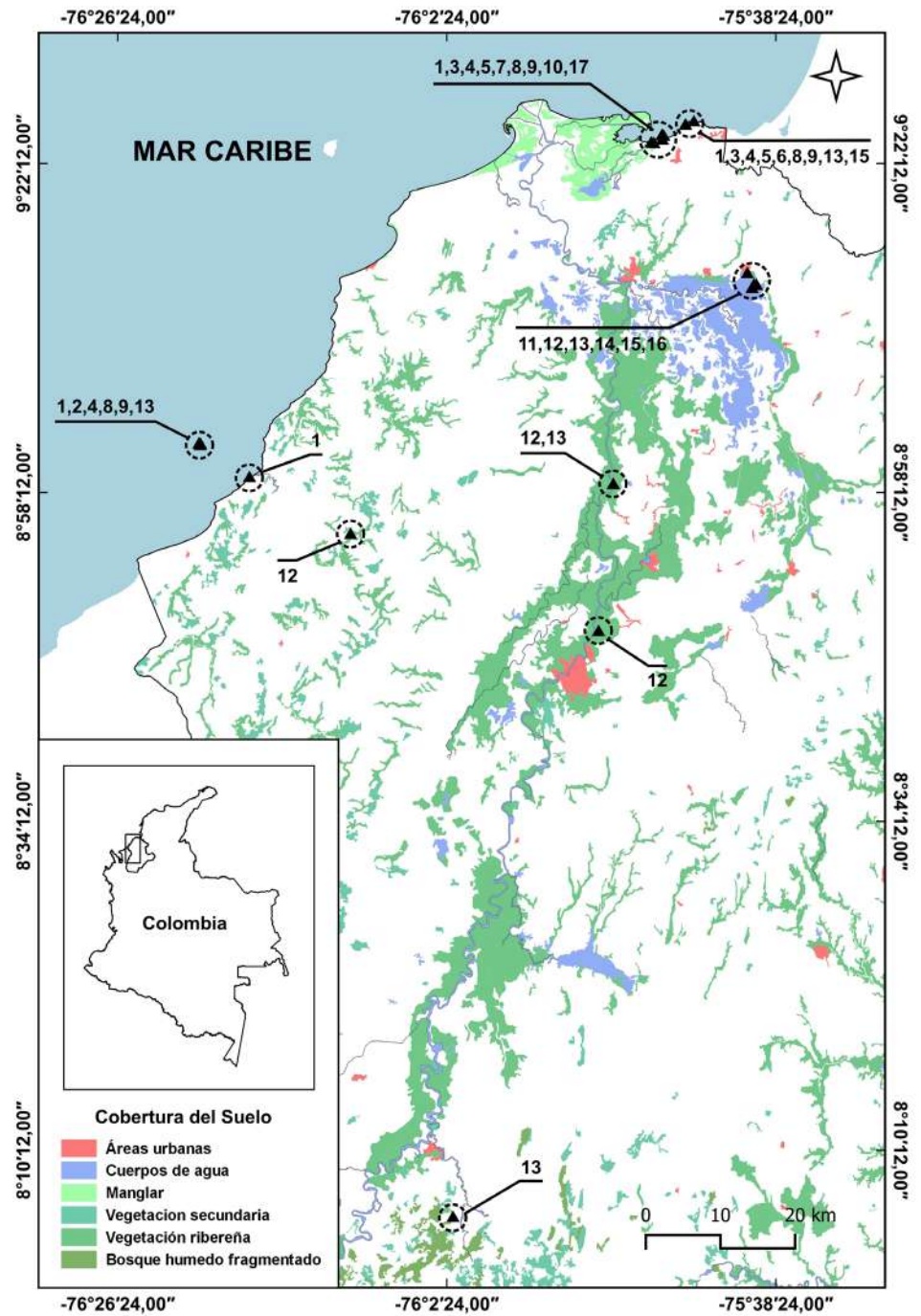


Figura 1. Mapa del área de estudio y distribución de las especies de isópodos terrestres en el departamento de Córdoba. 1. *Ligia baudiniana* Milne-Edwards, 1840. 2. *Tylos marcuzzii* Giordani Soika, 1954. 3. *Tylos negroi* López-Orozco, Carpio-Díaz & Campos-Filho, 2022. 4. *Tylos niveus* Budde-Lund, 1885. 5. *Armadilloniscus caraibicus* Paoletti & Stinner, 1989. 6. *Armadilloniscus luisi* Carpio-Díaz, Taiti & Campos-Filho, 2022. 7. *Armadilloniscus ninae* Schultz, 1984. 8. *Littorophiloscia denticulata* (Ferrara & Taiti, 1982). 9. *Littorophiloscia tropicalis* Taiti & Ferrara, 1986. 10. *Stenoniscus nestori* López-Orozco, Taiti & Campos-Filho, 2022. 11. *Rhyscotoides parallelus* (Budde-Lund, 1893). 12. *Trichorhina bermudezae* Carpio-Díaz, López-Orozco & Campos-Filho, 2018. 13. *Trichorhina heterophthalma* Lemos de Castro, 1964. 14. *Nagurus nanus* (Budde-Lund, 1908). 15. *Agnara madagascariensis* (Budde-Lund, 1885). 16. *Ctenorillo dazai* Carpio-Díaz, López-Orozco & Campos-Filho, 2018. 17. *Ctenorillo tuberosus* (Budde-Lund, 1904)

Momil y Cotorra, caracterizada por presentar un complejo de ecosistemas cenagosos con una vegetación adaptada a los cambios espacio-temporales de los pulsos del río Sinú, y la subregión costera, municipios de San Antero, San Bernardo del Viento, Moñitos, Puerto Escondido, Canalete y Los Córdoba, con una vegetación típica de bosque seco tropical (BST) fuertemente intervenido y un ecosistema de lagunas costeras y bosques de manglar (Ballesteros & Linares, 2015). Los lugares de recolección del material incluyeron tanto ecosistemas naturales como intervenidos por el hombre (urbanos).

Recolección e identificación

Los ejemplares se recolectaron mediante búsquedas intuitivas directas en arena, materia orgánica en descomposición, raíces, corteza de árboles, troncos caídos y debajo de rocas (Taiti & Wynne, 2015; López-Orozco *et al.*, 2022). Los especímenes se preservaron en etanol al 70 % y se identificaron a partir de los caracteres morfológicos con base en la literatura especializada. La lista de sinónimos incluye la descripción original y los trabajos en los que se mencionan las especies en Colombia. Además, para cada especie se presenta el material examinado y los datos de historia natural y distribución. Todas las imágenes se capturaron con las cámaras Olympus Tough TG4 y Nikon D3500 equipada con una lente macro Fujian de 35 mm. El material analizado se depositó en el Laboratorio de Zoología de la Universidad de Córdoba (LZUC).

Resultados

Orden **Isopoda** Latreille, 1817

Suborden **Oniscidea** Latreille, 1802

Familia **Ligiidae** Leach, 1814

Género **Ligia** Fabricius, 1798

Ligia baudiniana Milne-Edwards, 1840

Figs. 1, 3A.

Ligia baudiniana Milne-Edwards, 1840: 155–156.

Ligia baudiniana – Ríos & Ramos (1990): 93, fig. 7; Schmalzfuss (2003): 124; Lazarus-Agudelo & Cantera-Kintz (2007): 226; López-Orozco *et al.* (2014): 196, fig. 1-3; Santamaría *et al.* (2014): 10, fig. 4; López-Orozco *et al.* (2022): 7, fig. 1; Carpio-Díaz *et al.* (2023a): 400, fig. 1.

Referencias de identificación. Jackson (1922); Schultz (1984); Knsley & Schotte (1989); Leistikow (1997).

Material examinado. Colombia: 17 ♂♂, 19 ♀♀, Córdoba, San Antero, Playa Nisperal, 9°23'38,77" N - 75°47'28,59" W, 26 mar. 2021, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0031]; 2 ♂♂, 6 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Calao, 9°24'56,66" N - 75°44'59,21" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0036]; 1 ♂, Córdoba, Puerto Escondido, Isla Tortuguilla, 9°1'39,52" N - 76°20'22,21" W, 11 may. 2023, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0044]; 2 ♂♂, 1 ♀, Córdoba, Puerto Escondido, Playa Verde, 8°59'14,05" N - 76°16'47,45" W, 29 oct. 2023, A.E. Bravo-Rodríguez y J.C. Ruiz, [LZUC:Crustac:0050].

Historia natural. Los especímenes se recolectaron en las zonas supramareal e intermareal sobre sustrato arenoso-rocoso, ocultos entre raíces de manglar, bajo hojarasca, en acantilados o en la playa desplazándose sobre la superficie a gran velocidad (Figura 2C, E). Se observaron variaciones en la coloración y el tamaño según el hábitat de recolección. Los ejemplares se recolectaron junto a individuos de *Tylos niveus*, por lo general en sustratos calcáreos y con una gruesa capa de hojarasca.

Distribución. En el Atlántico desde Bermuda, Bahamas, islas Vírgenes, Carrie Bow Cay, Belize, Bonaire, Aruba, Trinidad, Tobago hasta el Golfo de México (Kensley & Schotte, 1989). En Estados Unidos, Venezuela, norte de Brasil, en la costa del Pacífico desde Costa Rica hasta Ecuador (Santamaría *et al.*, 2014). En el Caribe colombiano se ha reportado en Bolívar y Atlántico (López-Orozco *et al.*, 2014, 2022; Carpio-Díaz *et al.*,

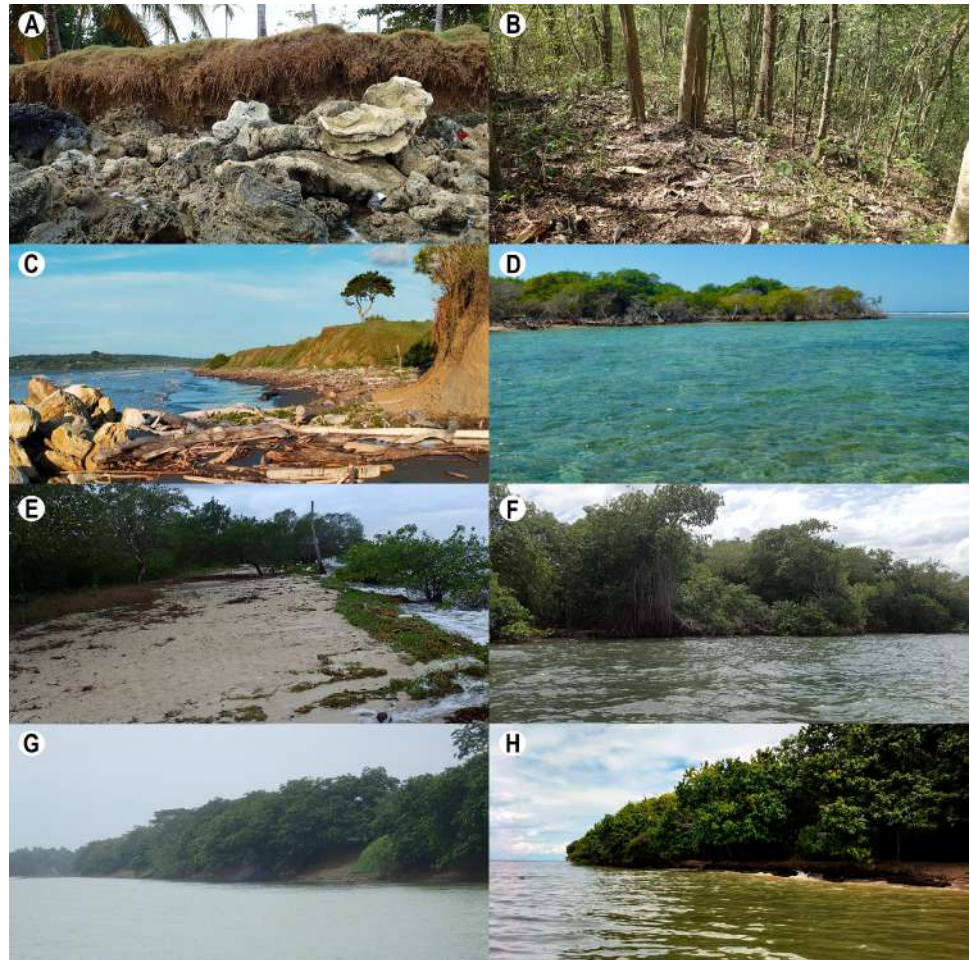


Figura 2. Localidades. **A.** Punta Bello. **B.** Cerro Mohan. **C.** Playa Verde. **D.** Isla Tortuguilla. **E.** Playa Nisperal. **F.** Punta Rebujina. **G.** Corredor Ecológico Carrillo. **H.** Punta Calao

2023a) y en la costa del Pacífico en Bahía Málaga, Valle del Cauca (Ríos & Ramos, 1990; Lazarus-Agudelo & Cantera-Kintz, 2007). Este es el primer registro en el departamento de Córdoba y en la ecorregión Darién, Caribe colombiano (Figura 1).

Familia **Tylidae** Dana, 1852

Género **Tylos** Audouin, 1826

Tylos marcuzzii Giordani Soika, 1954

Figs 1, 3B.

Tylos marcuzzii Giordani Soika, 1954: 79, fig. 10/1.

Tylos marcuzzii – López-Orozco *et al.* (2022): 9, figs 1, 2A.

Referencias de identificación. Giordani (1954); Schultz (1974); Kensley & Schotte (1989).

Material examinado. Colombia: 5 ♂♂, 6 ♀♀, Córdoba, Puerto Escondido, Isla Tortuguilla, 9°1'34,39" N - 76°20'23,17" W, 11 may. 2023, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0045].

Historia natural. Los individuos se encontraron enterrados en la arena hasta 8 cm por debajo del sustrato calcáreo expuesto a una radiación solar intensa (Figura 2D). Se recolectaron junto a individuos de *T. niveus* en la línea de deriva de la playa, donde la intensidad del oleaje modifica y contribuye a la formación de acantilados y procesos erosivos.

Distribución. Esta especie se distribuye en el Atlántico al sureste de Estados Unidos, en Florida, y en el Caribe en las Bahamas, Islas de Sotavento, Cayo Ambergris, Belize, Venezuela y Cuba (Kensley & Schotte, 1989; Schmalfuss *et al.*, 2000; Schmalfuss, 2003; Hurtado *et al.*, 2014). López-Orozco *et al.* (2022) la reportaron en Colombia en el departamento de Bolívar, Islas del Rosario e Isla Grande. Este estudio amplía la distribución de la especie en el Caribe suroccidental colombiano, departamento de Córdoba, ecorregión del Darién (Fig.1).

Tylos negroi López-Orozco *et al.*, 2022

Figs. 1, 3C.

Tylos negroi López-Orozco, *et al.*, 2022: 11, fig. 2B.

Tylos negroi – López-Orozco *et al.* (2022): 11, figs. 1, 2B; Carpio-Díaz *et al.* (2023a): 401, fig. 1.

Referencias de identificación. López-Orozco *et al.* (2022); Carpio-Díaz *et al.* (2023a).

Material examinado. Colombia: 1 ♂, Córdoba, San Antero, Playa Nisperal, 9°23'38,77" N - 75°47'28,59" W, 19 may. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0032]; 2 ♂♂, 2 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Calao, 9°24'56,66" N - 75°44'59,21" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0037]; 1 ♀, Córdoba, San Antero, Punta Rebujina, 9°24'11,62" N - 75°46'41,38" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0051].

Historia natural. Los especímenes se recolectaron en áreas provistas de sombra y alta humedad, enterrados en sustratos constituidos por arena, fragmentos de hojarasca, troncos y rocas coralinas (Figura 2F, H). *Tylos negroi* se registró compartiendo hábitat con *T. niveus* en Punta Calao y Punta Rebujina.

Distribución. Hasta la fecha la especie solo se ha registrado en Colombia exclusivamente en el departamento de Bolívar, Caribe colombiano (López-Orozco *et al.*, 2022; Carpio-Díaz *et al.*, 2023a). Este representa el primer registro para el golfo de Morrosquillo en Córdoba (Figura 1).

Tylos niveus Budde-Lund, 1885

Figs. 1, 3D.

Tylos niveus Budde-Lund, 1885: 278.

Tylos niveus – Carpio-Díaz *et al.* (2016): 435, figs 1, 3; López-Orozco *et al.* (2022): 8, fig. 1.

Referencias de identificación. Kensley & Schotte (1989); Silva & Alves (2000); Hurtado *et al.* (2014); Carpio-Díaz *et al.* (2016); Taiti *et al.* (2018).

Material examinado. Colombia: 5 ♂♂, 12 ♀♀, Córdoba, San Antero, Playa Nisperal, 9°23'38,77" N - 75°47'28,59" W, 26 mar. 2021, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0033]; 9 ♂♂, 7 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Calao, 9°24'56,66" N - 75°44'59,21" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0038]; 10 ♂♂, 9 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Rebujina, 9°24'11,62" N - 75°46'41,38" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0052]; 1 ♂, 3 ♀♀, Córdoba, Puerto Escondido, Isla Tortuguilla, 9°1'34,39" N - 76°20'23,17" W, 11 may. 2023, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0046].

Historia natural. Se recolectó en la zona supralitoral alimentándose principalmente de algas y otros restos arrojados a la orilla por la acción de las olas (Figura 2E). Los ejemplares se encontraron entre grietas, rocas y restos de corales con hojarasca acompañados de *L. baudiniana* en la playa Nisperal y *Trichorhina heterophthalma* en Punta Calao (Figura 2E, H).

Distribución. Florida, Bahamas, Bermudas, Cuba, Tobago, Antillas Menores, Bonaire, Dominica, Curazao, Islas Vírgenes, Puerto Rico, Costa Rica, México, Belice, Panamá, Venezuela, Brasil (Schultz, 1974; Kensley & Schotte, 1989; Leistikow & Wagele, 1999; Taiti *et al.*, 2018). En Colombia se ha registrado en Cartagena de Indias habitando en la zona costera de Islas del Rosario en Isla Grande y la Península de Barú (Carpio-Díaz *et al.*, 2016; López-Orozco *et al.*, 2022). Este registro amplía la distribución de la especie a las áreas costeras y a una isla continental del departamento de Córdoba (Figura 1).

Familia **Detonidae** Budde-Lund, 1904

Género *Armadilloniscus* Uljanin, 1875

Armadilloniscus caraibicus Paoletti & Stinner, 1989

Figs. 1, 3E.

Armadilloniscus caraibicus Paoletti & Stinner, 1989: 73, fig. 6–12.

Armadilloniscus caraibicus – López-Orozco *et al.* (2022): 19, figs 1, 2D.

Referencias de identificación. Paoletti & Stinner (1989).

Material examinado. Colombia: 2 ♂♂, Córdoba, San Antero, Punta Bello, 9°25'10,77" N - 75°44'22,37" W, 6 jun. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0058]; 2 ♂♂, 1 ♀, Córdoba, San Antero, Punta Rebusina, 9°24'11,62" N - 75°46'41,38" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0053].

Historia natural. Los especímenes fueron recolectados en terrazas coralinas protegidas del oleaje y debajo de sustratos conformados por restos calcáreos y acumulación de troncos a lo largo de la línea costera en Punta Rebusina (**Figura 2A, F**), donde la acción erosiva del oleaje incide de manera significativa en el sustrato que sirve de hábitat para la especie. Los ejemplares se registraron junto a individuos de *A. ninae*, *T. niveus*, *T. negroi*, y *S. nestori*.

Distribución. Venezuela (Paoletti & Stinner, 1989; Schmidt, 2001; Schmalfuss, 2003). En Colombia fue reportada por López-Orozco *et al.* (2022) en Isla Grande, norte de Bolívar, lo que constituye el primer registro para la parte continental del Caribe colombiano (**Figura 1**).

Armadilloniscus luisi Carpio-Díaz, Taiti & Campos-Filho, 2022

Fig. 1.

Armadilloniscus luisi Carpio-Díaz, Taiti & Campos-Filho, 2022: 21, fig. 2E.

Armadilloniscus luisi – López-Orozco *et al.* (2022): 21, figs. 1, 2E; Carpio-Díaz *et al.* (2023a): 401, fig. 1.

Referencias de identificación. López-Orozco *et al.* (2022); Carpio-Díaz *et al.* (2023a).

Material examinado. Colombia: 2 ♂♂, 5 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Bello, 9°25'10,77" N - 75°44'22,37" W, 19 may. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0059].

Historia natural. Los especímenes se recolectaron enterrados debajo de cascajo de coral en terrazas coralinas protegidas por la acumulación de rocas y troncos en la playa por acción del oleaje (**Figura 2A**). Esta especie fue registrada compartiendo hábitat con *A. caraibicus* y se distinguía fácilmente en campo por una característica coloración rojiza.

Distribución. Hasta la fecha, *A. luisi* presenta una distribución restringida al Caribe colombiano, en los departamentos de Atlántico y Bolívar (López-Orozco *et al.*, 2022; Carpio-Díaz *et al.*, 2023a). Este estudio amplía la distribución de la especie al sur del Caribe colombiano, representando el primer registro para el departamento de Córdoba y el golfo de Morrosquillo (**Figura 1**).

Armadilloniscus ninae Schultz, 1984

Figs. 1, 3F.

Armadilloniscus ninae Schultz, 1984: 4, figs. 1 y 2.

Armadilloniscus ninae – López-Orozco *et al.* (2022): 26, figs 1, 2F.

Referencias de identificación. Schultz (1984); López-Orozco *et al.* (2022).

Material examinado. Colombia: 6 ♂♂, 11 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Calao, 9°24'56,66" N - 75°44'59,21" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0039]; 23 ♂♂, 40 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Rebusina, 9°24'11,62" N - 75°46'41,38" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0054].

Historia natural. De las tres especies pertenecientes a la familia Detonidae reportadas en este estudio, *A. ninae* fue la más abundante de forma constante a lo largo de toda la costa, aunque se observó que la acción erosiva del oleaje afectará el sustrato que sirve de hábitat para la especie. Los especímenes se recolectaron debajo de sustrato formado por restos calcáreos y troncos acumulados en la playa a lo largo de la línea costera (**Figuras 2F, H**).

Distribución. Belize (Schultz, 1984; Schmalzfuss, 2003); Colombia y Cuba (López-Orozco *et al.*, 2022). Primer registro para la parte continental del Caribe colombiano (Figura 1).

Familia **Halophilosciidae** Verhoeff, 1908

Género **Littorophiloscia** Hatch, 1947

Littorophiloscia denticulata (Ferrara & Taiti, 1982)

Figs. 1, 3G.

Bilawrencia denticulata Ferrara & Taiti, 1982: 469, figs. 6 y 7.

Littorophiloscia denticulata – López-Orozco *et al.* (2022): 34, figs 1, 2I.

Referencias de identificación. Ferrara & Taiti (1982); Taiti & Ferrara (1986); Leistikow (2000).

Material examinado. Colombia: 9 ♂♂, 8 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Calao, 9°24'56,66"N - 75°44'59,21" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0040]; 2 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Rebujina, 9°24'11,62" N - 75°46'41,38" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0055]; 2 ♂♂, Córdoba, Puerto Escondido, Isla Tortuguilla, 9°1'39,52" N - 76°20'22,21" W, 11 may. 2023, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0047].

Historia natural. En San Antero los ejemplares fueron recolectados en sustratos arenoso provistos de sombra y elevada humedad, cubiertos por hojarasca de *Conocarpus erectus* L. 1753 y *Rhizophora mangle* L. 1773 en la zona supralitoral (Figuras 2F, H). Sin embargo, en Isla Tortuguilla los ejemplares fueron recolectados en un sustrato formado por rocas coralinas cubiertas con hojarasca de *Ficus benjamina* L. 1767, aproximadamente a 20 metros de la costa, en un área expuesta a una radiación solar intensa.

Distribución. Islas Andamán, Brasil y Guatemala (Taiti & Ferrara, 1986; Leistikow, 2000; Schmalzfuss, 2003; Lisboa *et al.*, 2017). En Colombia se reporta en el área insular de Cartagena de Indias, Islas del Rosario, Isla Grande (López-Orozco *et al.*, 2022). Este reporte es el primero para la parte continental del Caribe colombiano (Figura 1).

Littorophiloscia tropicalis Taiti & Ferrara, 1986 Figs. 1, 3H.

Littorophiloscia tropicalis Taiti & Ferrara, 1986: 1361, fig. 9.

Littorophiloscia tropicalis – López-Orozco *et al.* (2022): 35, figs 1, 2J.

Referencias de identificación. Taiti & Ferrara (1986).

Material examinado. Colombia: 8 ♂♂, 14 ♀♀, Córdoba, San Antero, muelle turístico, 9°23'50,99"N - 75°46'40,38" W, 10 jul. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0060]; 6 ♂♂, 10 ♀♀, Córdoba, San Antero, Playa Nisperal, 9°23'38,77" N - 75°47'28,59" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0034]; 2 ♂♂, 2 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Calao, 9°24'56,66" N - 75°44'59,21" W, 6 jun. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0041]; 18 ♂♂, 16 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Rebujina, 9°24'11,62" N - 75°46'41,38" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0056]; 18 ♂♂, 26 ♀♀, Córdoba, Puerto Escondido, Isla Tortuguilla, 9°1'39,52" N - 76°20'22,21" W, 11 may. 2023, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0048].

Historia natural. En San Antero los ejemplares fueron recolectados en un sustrato artificial junto a *T. heterophthalma*; además, en las zonas constituidas por un sustrato arenocalcáreo cubierto por el dosel de *R. mangle* los individuos se recolectaron con individuos de *L. baudiniana* y *L. denticulata*. En Isla Tortuguilla se recolectó compartiendo hábitat con *L. baudiniana* en un área semi-inundada por acción de oleaje, sobre montículos de hojarasca, ramas y troncos (Figura 2D).

Distribución. Esta especie presenta una distribución circumtropical, reportándose en Florida, Belize, México, Venezuela, Brasil, Ascension Island, St. Helena Island, Camerún, Sudán, Somalia, archipiélago Socotra, India, Maldivas e isla Socotra, Yemen (Leistikow & Wagele, 1999; Schmalzfuss, 2003; Taiti & Ferrara, 2004; Taiti & Checucci, 2009; Taiti, 2014; Lisboa *et al.*, 2017). En el Caribe colombiano fue reportada por López-Orozco *et al.* (2022) en Isla Grande, Bolívar, y constituye el primer registro para la parte continental del Caribe colombiano (Figura 1).

Familia *Stenoniscidae* Budde-Lund, 1904

Género *Stenoniscus* Aubert & Dollfus, 1890

Stenoniscus nestori López-Orozco, Taiti & Campos-Filho, 2022

Figs. 1, 3I.

Stenoniscus nestori López-Orozco, Taiti & Campos-Filho, 2022: 14, fig. 2C.

Stenoniscus nestori – López-Orozco *et al.* (2022): 14, figs 1, 2C.

Referencias de identificación. López-Orozco *et al.* (2022).

Material examinado. Colombia: 4 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Rebusina, 9°24'11,62"N-75°46'41,38"W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0057].

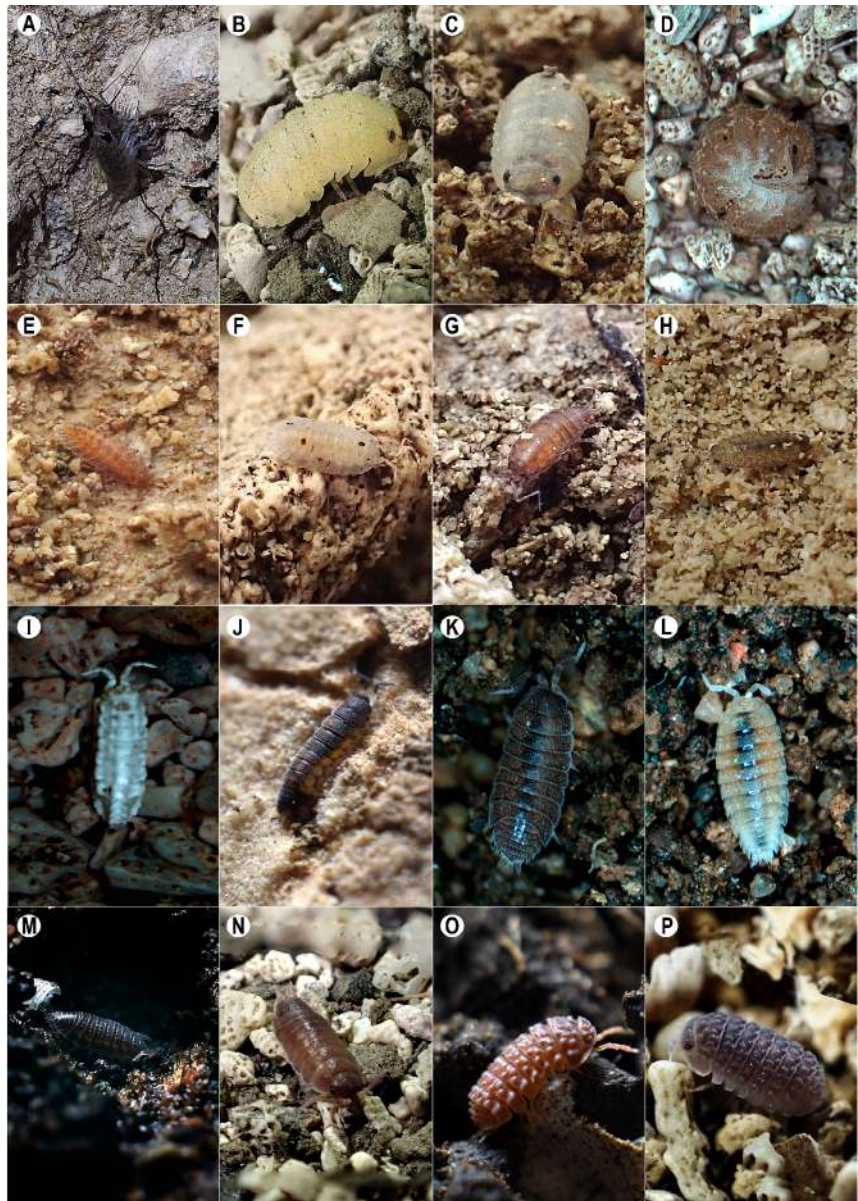


Figura 3. Isópodos terrestres del departamento de Córdoba. **A.** *Ligia baudiniana*. **B.** *Tylos marcuzzii*. **C.** *Tylos negroi*. **D.** *Tylos niveus*. **E.** *Armadilloniscus caraibicus*. **F.** *Armadilloniscus ninae*. **G.** *Littorophiloscia denticulata*. **H.** *Littorophiloscia tropicalis*. **I.** *Stenoniscus nestori*. **J.** *Rhyscotoides parallelus*. **K.** *Trichorhina bermudezae*. **L.** *Trichorhina heterophthalma*. **M.** *Nagurus nanus*. **N.** *Agnara madagascariensis*. **O.** *Ctenorillo dazai*. **P.** *Ctenorillo tuberosus*

Historia natural. Los ejemplares se recolectaron enterrados a 8 a 15 cm de profundidad, bajo sustrato calcáreo en la línea de marea alta en donde se da la acumulación de fragmentos pequeños de plástico, madera, conchas y algas. Aunque se recolectaron en el mismo hábitat de *A. ninae*, *T. niveus* y *T. negroi*, se encuentran comúnmente en un gradiente de profundidad mayor.

Distribución. Actualmente conocida sólo de Isla Grande, Bolívar, Caribe colombiano (López-Orozco *et al.*, 2022). Estos datos extienden la distribución de la especie a las costas del departamento de Córdoba y representan el primer registro para la parte continental del Caribe colombiano y el departamento (Figura 1).

Familia **Rhyscotidae** Budde-Lund, 1904

Género **Rhyscotoides** Schmalzfuss & Ferrara, 1978

Rhyscotoides parallelus (Budde-Lund, 1893)

Figs. 1, 3J.

Rhyscotus parallelus Budde-Lund, 1893: 119

Rhyscotoides parallelus – Vandel (1972): 150.

Referencias de identificación. Mulaik (1960); Vandel (1981).

Material examinado. Colombia: 10 ♂, Córdoba, Momil, Cerro Mohán, 9°13'17,27" N - 75°39'58,96" W, 16 m.s.n.m., 9 dic. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0061].

Historia natural. Los especímenes se recolectaron en la corteza de *Chloroleucon mangense* (Jacq.) Britton & Rose, habitando con hormigas arrieras en un agroecosistema cercano al complejo cenagoso del bajo Sinú. Cabe destacar que los individuos de *C. mangense* están distanciados entre sí debido a la fragmentación del hábitat y el efecto de la ganadería.

Distribución. México, Islas Galápagos, Venezuela, Angola (Leistikow & Wagele, 1999; Schmalzfuss, 2003). En Colombia la especie fue registrada por Vandel (1972) para el valle medio del Magdalena en Icononzo, Tolima, representada por un solo individuo, en lo que constituye el primer registro para el Caribe colombiano (Figura 1).

Familia **Platyarthridae** Verhoeff, 1949

Género **Trichorhina** Budde-Lund, 1908

Trichorhina bermudezae Carpio-Díaz, López-Orozco & Campos-Filho, 2018

Figs. 1, 3K.

Trichorhina bermudezae Carpio-Díaz, López-Orozco & Campos-Filho, 2018: 307, fig. 1–6.

Trichorhina bermudezae – Carpio-Díaz *et al.* (2018): 307, figs 4, 29–50; López-Orozco *et al.* (2022): 35, fig. 1.

Referencias de identificación. Carpio-Díaz *et al.* (2018).

Material examinado. Colombia: 4 ♂♂, 1 ♀, Córdoba, Momil, Cerro Mohán, 9°13'14,64" N - 75°39'48,14" W, 53 m.s.n.m., 26 oct. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0062]; 1 ♂, 3 ♀♀, Córdoba, Montería, zonas periurbanas, 8°47'59,77" N - 75°51'19,54" W, 14 m.s.n.m., 11 feb. 2023, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0066]; 1 ♀, Córdoba, Puerto Escondido, Morindó, 8°55'4,81" N - 76°9'24,98" W, 79 m.s.n.m., 8 abr. 2023, J. Charrasquiell, [LZUC:Crustac:0067]; 22 ♂♂, 22 ♀♀, Córdoba, San Pelayo, Corredor Ecológico Carrillo, 8°58'43,49" N - 75°50'15,10" W, 11 m.s.n.m., 22 jul. 2023, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0068].

Historia natural. Los ejemplares fueron recolectados bajo troncos en descomposición en áreas periurbanas, fragmentos de bosques y bosques ribereños. La especie se observó compartiendo hábitat con *T. heterophthalma* en San Pelayo.

Distribución. Hasta la fecha la especie había sido registrada en el BST del departamento de Bolívar, Caribe colombiano (Carpio-Díaz *et al.*, 2018; López-Orozco *et al.*, 2022). Nuestros resultados extienden su distribución al departamento de Córdoba (Figura 1).

Trichorhina heterophthalma Lemos de Castro, 1964

Figs. 1, 3L.

Trichorhina heterophthalma Lemos de Castro, 1964: 2, figs. 1 y 2.

Trichorhina heterophthalma – **Carpio-Díaz *et al.*** (2018): 303, fig. 3; **López-Orozco *et al.*** (2022): 36, fig. 1; **Carpio-Díaz *et al.*** (2023a): 403, fig. 2.

Referencias de identificación. Lemos de Castro (1964); **Carpio-Díaz *et al.*** (2018).

Material examinado. Colombia: 4 ♂♂, 9 ♀♀, Córdoba, San Antero, muelle turístico, 9°23'50,99" N - 75°46'40,38" W, 6 jun. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0073]; 1 ♂, 7 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Calao, 9°24'56,66" N - 75°44'59,21" W, 27 nov. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0042]; 1 ♀, Córdoba, Momil, Cerro Mohán, 9°13'1,98" N - 75°40'7,90" W, 20 m.s.n.m., 26 oct. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0063]; 3 ♂♂, 19 ♀♀, Córdoba, Puerto Escondido, Isla Tortuguilla, 9°1'40,65" N - 76°20'28,58" W, 11 may. 2023, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0049]; 9 ♂♂, 12 ♀♀, Córdoba, San Pelayo, corredor ecológico Carrillo, 8°58'43,49" N - 75°50'15,10" W, 11 m.s.n.m., 22 jul. 2023, A.E. Bravo-Rodríguez y J. Yépez, [LZUC:Crustac:0069]; 2 ♂♂, 7 ♀♀, Córdoba, Tierralta, Palmira, 8°5'14,70" N - 76°1'56,51" W, 126 m.s.n.m., 7 oct. 2023, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0070];

Historia natural. Los especímenes se recolectaron en áreas húmedas y provistas de sombra, debajo de troncos, piedras y hojarasca, desde el BST hasta bosques ribereños fragmentados, humedales y bosques de manglar en las subregiones del medio y bajo Sinú, así como en la zona costera del departamento (**Figura 1**).

Distribución. Especie con distribución pantropical. En América ha sido reportada en Estados Unidos, Cuba, Islas Vírgenes, Islas Galápagos, Isla Clipperton, Venezuela, Brasil (**Leistikow & Wagele**, 1999; **Schmalfuss**, 2003). En Colombia solo se ha reportado en Bolívar y Cundinamarca (**Carpio-Díaz *et al.***, 2018; 2023a; **López-Orozco *et al.***, 2022). Nuestro estudio amplía la distribución de la especie hasta el departamento de Córdoba (**Figura 1**).

Familia **Trachelipodidae** Strouhal, 1953

Género *Nagurus* Holthuis, 1949

Nagurus nanus (Budde-Lund, 1908)

Figs. 1, 3M.

Porcellio (Nagara) nana Budde-Lund, 1908: 285, Taf. 14, fig. 40–47.

Referencias de identificación. **Kwon & Taiti** (1993).

Material examinado. Colombia: 4 ♂♂, 11 ♀♀, Córdoba, Momil, zona urbana, 9°14'6,41" N - 75°40'28,35" W, 8 m.s.n.m., 24 oct. 2023, L.A. Suárez-Martínez, [LZUC:Crustac:0071].

Historia natural. Los especímenes se recolectaron en un entorno residencial en el municipio de Momil, específicamente en el área exterior de una vivienda rodeada por muros, entre plantas y cepas muertas de *Musa paradisiaca* L. 1753.

Distribución. Pantropical, introducida a menudo en hábitats sinantrópicos (**Schmalfuss**, 2003; **Gregory**, 2014). Este es el primer registro para Colombia (**Figura 1**).

Familia **Agnaridae** Schmidt, 2003

Género *Agnara* Budde-Lund, 1908

Agnara madagascariensis (Budde-Lund, 1885)

Figs. 1, 3N.

Metoponorthus Madagascariensis Budde-Lund, 1885: 189.

Agnara madagascariensis – **López-Orozco *et al.*** (2022): 37, figs 1, 2K; **Carpio-Díaz *et al.*** (2023a): 405, fig. 1.

Referencias de identificación. **Schmalfuss & Ferrara** (1978); **Ferrara & Taiti** (1986); **López-Orozco *et al.*** (2022).

Material examinado. Colombia: 1 ♂, 1 ♀, Córdoba, San Antero, Punta Calao, 9°24'56,66" N - 75°44'59,21" W, 6 jun. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0043]; 1 ♂, 3 ♀♀, Córdoba, Momil, Cerro Mohán, 9°13'14,64" N - 75°39'48,14" W, 39 m.s.n.m., 9 dic. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0064].

Historia natural. En Momil los ejemplares fueron recolectados sobre troncos y hojarascas desplazándose a gran velocidad en un fragmento de BST (**Figura 2B**). En San Antero se recolectaron escondidos bajo la hojarasca y ramas de manglar en zonas húmedas y provistas de sombra (**Figura 2H**).

Distribución. Guinea Bissau, Senegal, Madagascar, península arábiga, sur de China, Taiwán y Venezuela (**Schmidt, 2001; Guo-Xiao, 2003; Schmalfuss, 2003; Taiti & Ferrara, 2004; Dimitriou et al., 2018**). En Colombia la distribución reportada se limita a los departamentos de Bolívar y Cesar (**López-Orozco et al., 2022; Carpio-Díaz et al., 2023a**). Este estudio amplía la distribución geográfica de la especie hasta el departamento de Córdoba (**Figura 1**).

Familia **Armadillidae** Brandt, 1831

Género **Ctenorillo** Verhoeff, 1942

Ctenorillo dazai Carpio-Díaz, López-Orozco & Campos-Filho, 2018

Figs. 1, 3O.

Ctenorillo dazai Carpio-Díaz, López-Orozco & Campos-Filho, 2018: 311, fig. 61–74.

Ctenorillo dazai – **Carpio-Díaz et al. (2018): 311, figs 5, 51-74; Carpio-Díaz et al. (2023b): 55, fig. 1.**

Referencias de identificación. **Carpio-Díaz et al. (2018).**

Material examinado. Colombia: 7 ♂♂, 9 ♀♀, Córdoba, Momil, Cerro Mohán, 9°13'14,64" N - 75°39'48,14" W, 43 m.s.n.m., 29 oct. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0065].

Historia natural. Los ejemplares fueron recolectados al interior de un fragmento de BST en un sustrato compuesto principalmente por hojarasca y troncos, en un entorno caracterizado por un suelo relativamente seco (**Figura 2B**). Cabe resaltar que la especie compartía hábitat con miriápodos y esquizómidos.

Distribución. Conocida en los departamentos de Bolívar y Atlántico (**Carpio-Díaz et al., 2018; 2023b**), el primer reporte de la especie se hizo en el BST del sur del Caribe colombiano, en el departamento de Córdoba (**Figura 1**).

Ctenorillo tuberosus (Budde-Lund, 1904)

Figs. 1, 3P.

Armadillo tuberosus Budde-Lund, 1904: 109, pl. X figs 1-4.

Ctenorillo tuberosus – **López-Orozco et al. (2022): 38, figs 1, 2L; Carpio-Díaz et al. (2023b): 56, fig. 1.**

Referencias de identificación. **Budde-Lund (1904); Campos-Filho et al. (2017); López-Orozco et al. (2022).**

Material examinado. Colombia: 1 ♂, 6 ♀♀, Córdoba, San Antero, playa Nisperal, 9°23'35,44" N - 75°47'17,02" W, 19 may. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0035]; 15 ♂♂, 29 ♀♀, Córdoba, San Antero, Punta Bonita, 9°24'8,23" N - 75°46'34,41" W, 18 abr. 2022, A.E. Bravo-Rodríguez, [LZUC:Crustac:0072].

Historia natural. Los especímenes se recolectaron en un área provista de sombra, enterrados bajo un sustrato arenoso cubierto por raíces y hojas de *Ipomoea pes-caprae*. *Ctenorillo tuberosus* podría estar amenazada en el área por el turismo, ya que el personal local arranca *Ipomoea pes-caprae* para despejar la playa en beneficio de los bañistas, lo que podría afectar a las poblaciones locales y su papel en el ecosistema.

Distribución: Haití, Brasil (**Schmalfuss, 2003; Campos-Filho et al., 2017**). En Colombia la distribución está limitada al departamento de Bolívar (**López-Orozco et al., 2022; Carpio-Díaz et al., 2023b**). Este estudio amplía la distribución de la especie hasta el sur del Caribe colombiano en el departamento de Córdoba (**Figura 1**).

Discusión

Entre las especies reportadas, 13 fueron registradas por **López-Orozco et al. (2022)** en el ambiente marino costero de Isla Grande, Archipiélago de San Bernardo, Caribe

colombiano: *Ligia baudiniana*, *T. niveus*, *T. negroi*, *T. marcuzzii*, *A. caraibicus*, *A. luisi*, *A. ninae*, *L. denticulata*, *L. tropicalis*, *S. nestori* y *C. tuberosus*. El resto de especies, *A. madagascariensis*, *C. dazai*, *T. bermudezae* y *T. heterophthalma*, fueron recolectadas en ambientes de BST, lo que concuerda con los datos aportados por **Carpio-Díaz et al.** (2018; 2023a; 2023b) para los departamentos del Atlántico, Bolívar y Cesar. Además, se reporta por primera vez la presencia de *N. nanus* en Colombia y de *R. parallelus* en el Caribe colombiano. Con nuestros resultados, se aumenta a 73 el número de especies de isópodos terrestres de Colombia y a 42 las presentes en el Caribe colombiano.

La mayoría de especies registradas en este trabajo tienen distribución amplia en el Caribe (**Schmalfuss**, 2003), excepto *A. luisi*, *C. dazai*, *S. nestori*, *T. bermudezae* y *T. negroi*, que solo se registran en Colombia (**López-Orozco et al.**, 2022; **Carpio-Díaz et al.**, 2018; 2023a; 2023b). Por otra parte, la interacción de estos organismos con los sustratos demuestra la notable capacidad de adaptación que exhiben. En Córdoba *L. baudiniana* fue hallada en la zona supramareal y la intermareal desplazándose entre raíces, hojarasca, rocas y acantilados, lo cual coincide con las observaciones realizadas por **Lazarus-Agudelo & Cantera-Kintz** (2007) y **López-Orozco et al.** (2014, 2022) en el Pacífico y Caribe colombianos, en tanto que *T. marcuzzii*, *T. negroi*, *T. niveus*, *S. nestori*, *A. caraibicus*, *A. luisi* y *A. ninae* solo se encontraron habitando entre grietas y hendiduras, así como enterradas bajo arena, hojarasca, cascajo de coral y detritos, lo que valida la información reportada por **Schultz** (1984), **Carpio-Díaz et al.** (2016) y **López-Orozco et al.** (2022). Por su parte, las especies del género *Littorophiloscia* prefirieron sustratos arenosos con sombra y alta humedad, como bosques de manglar (**Lisboa et al.**, 2017; **López-Orozco et al.**, 2022). *R. parallelus* se encontró entre cortezas de árboles en agroecosistemas cercanos al complejo cenagoso del bajo Sinú, contrariamente a lo reportado por **Vandel** (1972), quien registró la especie en un fragmento de bosque natural cubierto de hojarasca al suroeste de Bogotá. En cuanto a *C. tuberosus*, se la halló enterrada bajo un sustrato arenoso cubierto por raíces de *I. pes-caprae*. **López-Orozco et al.** 2022 y **Carpio-Díaz et al.** 2023b la reportaron en bosques de manglar y áreas urbanas. *N. nanus* se recolectó en un entorno residencial entre cepas de plátano, mientras que **Gregory** (2014) recolectó algunos ejemplares en una muestra de basura de ecosistemas tropicales, por lo que se considera una especie de hábitats perturbados (**Schmalfuss**, 2003).

En la última década los estudios con isópodos terrestres en Colombia han aumentado considerablemente. Los trabajos realizados por **López-Orozco et al.** (2014, 2016, 2017, 2022), **Carpio-Díaz et al.** (2016, 2018, 2021; 2023a; 2023b) y **Campos-Filho et al.** (2020) han permitido que el conocimiento de la riqueza del grupo haya aumentado a nivel nacional. No obstante, aún existen áreas inexploradas en las que se desconoce si hay isópodos terrestres. Además, un número considerable de ejemplares depositados en las colecciones biológicas nacionales permanecen sin determinar (Obs. Per. C.M. López-Orozco). Lo anterior, combinado con el bajo número de profesionales dedicados al conocimiento de la biología de este grupo, puede repercutir en la adopción de estrategias de manejo, conservación y uso sostenible del grupo en el corto plazo. En ese sentido, es necesario continuar realizando estudios que permitan conocer la riqueza del grupo en las diferentes regiones del país. Además, teniendo en cuenta la diversidad ecosistémica del departamento de Córdoba (bosques, sabanas, ciénagas, agroecosistemas, ríos, estuarios y manglares) (**Ballesteros & Linares**, 2015; **Ruiz & Saab**, 2020), es posible concluir que el inventario de los isópodos terrestres del departamento está lejos de ser completado. Este trabajo abre la posibilidad de seguir descubriendo la biodiversidad de oniscídeos que todavía no se ha documentada en el departamento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Córdoba (Colombia), al Grupo de Estudios de Isópodos Terrestres de Colombia (GEIT Colombia), al Grupo de Investigación Hidrobiología de la Universidad de Cartagena y al Instituto de Investigaciones Marinas y

Costeras José Benito Vives de Andrés (INVEMAR) por su apoyo logístico para examinar los ejemplares. Se hace un reconocimiento especial a Valeria Charrasquiél-González, Ramón Hernández, a Leiner Suárez-Martínez, José Charrasquiél-Campos, Jorge Llorente y a la Asociación de Caimaneros, ASOCAIMAN, por su ayuda en campo.

Contribución de los autores

AEBR: redacción del manuscrito, identificación del material recolectado; CMLO: validación taxonómica, identificación, redacción y edición; CANP: supervisión, revisión y edición; JAQR: revisión y edición; NHCC: validación taxonómica y aprobación de la versión final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Abd El-Wakeil, A. F.** (2015). Effects of terrestrial isopods (Crustacea: Oniscidea) on leaf litter decomposition processes. *The Journal of Basic & Applied Zoology*, 69, 10-16.
- Ballesteros, J., Linares, J.** (2015). Fauna de Córdoba, Colombia. Grupo de investigación Biodiversidad Unicórdoba. Facultad de Ciencias Básicas. Fondo Editorial Universidad de Córdoba. Colombia.
- Budde-Lund, G.** (1904). A Revision of Crustacea Isopoda Terrestria, with Additions and Illustrations. Pt 1 Eubelum, Pt 2 Spherilloninae, Pt 3 Armadillo. Editorial Kjøbenhavn, H. Hagerup. Copenhagen, Denmark. DOI: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.9883> <https://www.biodiversitylibrary.org/item/40106>
- Budde-Lund, G.** (1908). Isopoda von Madagaskar und Ostafrika. Mit Diagnosen verwandter Arten. En: Voeltzkow, A (Ed). Reise in Ostafrika in den Jahren 1903-1905. Wissenschaftliche Ergebnisse 2, 265-308, pls 12-18.
- Campos-Filho, I. S., Montesanto, G., Araujo, P. B., Taiti, S.** (2017). New species and new records of terrestrial isopods (Crustacea, Isopoda, Oniscidea) from Brazil. *Iheringia, Série Zoologia*, 107:e2017034, 1-30. <https://doi.org/10.1590/1678-4766e2017034>
- Campos-Filho, I. S., López-Orozco, C. M., Carpio-Díaz, Y. M., Águilar, J. O., Navas, G. R.** (2020). Three new species of *Ischioscia* Verhoeff, 1928 (Isopoda, Oniscidea, Philosciidae) from Serranía de Perijá, Andean Cordillera, Colombian Caribbean. *Zoosystema*. 42(8), 115-130. <https://doi.org/10.5252/zoosystema2020v42a8>
- Carpio-Díaz, Y. M., López-Orozco, C. M., Herrera-Medina, Y., Navas, G. R., Bermúdez, A.** (2016). Primer registro de *Tylos niveus* y nuevo reporte de *Porcellionides pruinosus* (Oniscidea: Tyliidae y Porcellionidae) para Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(156), 433-437. <https://doi.org/10.18257/racefyn.343>
- Carpio-Díaz, Y. M., López-Orozco, C. M., Borja-Arrieta, R., Navas-S, G. R., Bermúdez, A., Neita-Moreno, J. C., Campos-Filho, I. S.** (2023a). New records of terrestrial isopods (Crustacea Isopoda Oniscidea) from Colombia. *Arthropoda Selecta*, 32(4), 399-408. <https://doi.org/10.15298/arthscl.32.4.04>
- Carpio-Díaz, Y. M., López-Orozco, C. M., Borja-Arrieta, R., Gutierrez-Estrada, M., Campos-Filho, I. S., Sfenthourakis, S., Taiti, S., Neita, J. C., Bermúdez, A., Navas-S, G. R., Bichuette, M. E.** (2023b). The genus *Ctenorillo* Verhoeff, 1942 (Oniscidea, Armadillidae) from Colombia: new records, new species, and conservation comments. *Tropical Zoology*, 36(3-4), 53-84. <https://doi.org/10.4081/tz.2023.141>
- Carpio-Díaz, Y. M., López-Orozco, C. M., Campos-Filho, I. S., Navas, G. R.** (2018). Terrestrial isopods (Isopoda: Oniscidea) of the Botanical Garden of Cartagena “Guillermo Piñeres”, Colombia, with the description of three new species. *Arthropoda Selecta*, 27(4), 301-318. <https://doi.org/10.15298/arthscl.27.4.05>
- Carpio-Díaz, Y. M., López-Orozco, C. M., Borja-Arrieta, R., Campos-Filho, I. S.** (2021). A new species and first record of *Trichorhina* Budde-Lund, 1908 (Oniscidea, Platyarthridae) from the Department of Norte de Santander, Colombia. *Nauplius*, 29:e2021028, 1-8. <https://doi.org/10.1590/2358-2936e2021028>
- Da Silva, P., Araujo, P. B., Mendonça, M., Ott, R.** (2014). Diversity and population characteristics of terrestrial isopods (Crustacea, Oniscidea) across three forest environments in southern Brazil. *Iheringia, Série Zoologia*, 104(3), 334-340. <https://doi.org/10.1590/1678-476620141043334340>

- Dimitriou, A. C., Taiti, S., Schmalzfuss, H., Sfenthourakis, S.** (2018). A molecular phylogeny of Porcellionidae (Isopoda, Oniscidea) reveals inconsistencies with present taxonomy. *ZooKeys*, 801, 163-176. <https://doi.org/10.3897/zookeys.801.23566>
- Dimitriou, A. C., Taiti, S., Sfenthourakis, S.** (2019). Genetic evidence against monophyly of Oniscidea implies a need to revise scenarios for the origin of terrestrial isopods. *Scientific Reports* 9:18508, 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55071-4>
- Erhard, F.** (1998). Phylogenetic relationships within the Oniscidea (Crustacea, Isopoda). *Israel Journal of Zoology*, 44(3-4), 303 - 309. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/loi/tiee19>
- Ferrara, F., Taiti, S.** (1982). Isopodi terrestri delle Isole And amane. *Bollettino del Museo civico di Storia naturale di Verona*, 8, 459-492.
- Ferrara, F., Taiti, S.** (1986). The terrestrial isopods (Oniscidea) of the Arabian Peninsula. *Fauna of Saudi Arabia*, 7, 93-121.
- Fundación para el Desarrollo Sostenible de las Regiones Colombianas – FUNSOSTENIBLE., Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge – CVS.** (2017). Actualización del plan de ordenación Forestal del departamento De Córdoba informe final. (J. C. Pérez, L. Schorr, F. Peñata, E. Alarcón, H. Egel, S. Espejo, K. Ruiz, H. Torres, E. Chaker, H. Galván, J. Sierra, A. Martínez, & W. Páez, Eds.).
- Garcia, L.** (2015). Orden Isopoda: Suborden Oniscidea. *Revista IDE@ - SEA*, (78), 1-12. Disponible en: www.sea-entomologia.org/IDE@
- Giordani, A.** (1954). Ecología, sistemática, biogeografía ed evoluzione del *Tylos latreillei*. *Bollettino del Museo civico di Storia naturale di Venezia*, 7, 63-83.
- Guo-Xiao, C.** (2003). Species Construction and Distribution of Terrestrial Isopoda in Typical Zones of China. *Journal of Jishou University (Natural Science Edition)*, 24(1), 1-6. Disponible en: <https://zkxb.jsu.edu.cn/EN/Y2003/V24/I1/14>
- Gregory, S.** (2014). Woodlice (Isopoda: Oniscidea) from the Eden Project, Cornwall, with descriptions of species new to Britain and poorly known British species. *Bulletin of the British Myriapod & Isopod Group*, 27, 1-26.
- Hurtado, L. A., Lee, E. J., Mateos, M., Taiti, S.** (2014). Global diversification at the harsh sea-land interface: Mitochondrial phylogeny of the supralittoral isopod genus *Tylos* (Tylidae, Oniscidea). *PLoS ONE*, 9(4), 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094081>
- Jackson, H. G.** (1922). A revision of the isopod genus *Ligia* (Fabricius). *Proceedings of the Zoological Society of London*, 92(3), 683-703. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1922.tb02164.x>
- Javidkar, M., Cooper, S. J. B., King, R. A., Humphreys, W. F., Austin, A.** (2015). Molecular phylogenetic analyses reveal a new southern hemisphere oniscidean family (Crustacea: Isopoda) with a unique water transport system. *Invertebrate Systematics*, 29(6), 554-577. <https://doi.org/10.1071/IS15010>
- Javidkar, M., King, R. A., Cooper, S. J. B., Humphreys, W. F., Austin, A.** (2017). Taxonomy of *Paraplathyarthrus* Javidkar and King (Isopoda: Oniscidea: Paraplathyarthridae) with description of five new species from Western Australia, and comments on Australian *Trichorhina* Budde-Lunde, 1908 (Plathyarthridae). *Zootaxa*, 4243(3), 401-431. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4243.3.1>
- Kensley, B., Schotte, M.** (1989). Guide to the marine isopod crustaceans of the Caribbean Smithsonian Institution Press, Washington. Disponible en <https://www.biodiversitylibrary.org/page/10950583>
- Kwon, D. H., Taiti, S.** (1993). Terrestrial Isopoda (Crustacea) from Southern China, Macao and Hong Kong. *Stuttgarter Beiträge zur Naturkund, Seria A* (490), 1-83.
- Lazarus-Agudelo, J. F., Cantera-Kintz, J. R.** (2007). Crustaceans (Crustacea: Sessilia, Stomatopoda, Isopoda, Amphipoda, Decapoda) de Bahía Málaga, Valle del Cauca (colombian Pacific). *Biota Colombiana*, 8(2), 221-239. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/240621967>
- Leistikow, A.** (1997). Terrestrial isopods from Costa Rica and a redescription of *Ischioscia variegata* (Dollfus, 1893) (Crustacea: Isopoda: Oniscidea). *Canadian Journal of Zoology*, 75(9), 1415-1464. <https://doi.org/10.1139/z97-768>
- Leistikow, A.** (2000). Terrestrial Isopoda from Guatemala and Mexico (Crustacea: Oniscidae: Crinocheta). *Revue suisse de Zoologie*, 107, 283-323. <https://doi.org/10.5962/bhl.part.80131>
- Leistikow, A.** (2001a). A new species of terrestrial Isopoda from the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia (Crustacea: Oniscidea: Crinocheta). *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 36(2), 151-158. <http://dx.doi.org/10.1076/snfe.36.2.151.2140>

- Leistikow, A.** (2001b). The genus *Erophiloscia*, Vandel, 1972 - its phylogeny and biogeography, with descriptions of three new species (Crustacea, Isopoda, Oniscidea). *Spixiana*, 24(1), 29-51.
- Leistikow, A., Wagele, J. W.** (1999). Checklist of the terrestrial isopods of the new world (Crustacea, Isopoda, Oniscidea). *Revista Brasileira de Zoologia*, 16(1), 1-72. <https://doi.org/10.1590/S0101-81751999000100001>
- Lemos de Castro, A.** (1964). *Trichorhina heterophthalma* nueva especie de isopodo terrestre cavernicola de Cuba. *Poeyana, Serie A* (2), 1-7.
- Lins, L. S. F., Ho, S. Y. W., Lo, N.** (2017). An evolutionary timescale for terrestrial isopods and a lack of molecular support for the monophyly of Oniscidea (Crustacea: Isopoda). *Organisms, Diversity & Evolution*, 17(4), 813-820. <https://doi.org/10.1007/s13127-017-0346-2>
- Lisboa, J. T., Campos-Filho, I. S., Couto, E. C. G., Araujo, P. B.** (2017). Distribution of terrestrial isopods of the genus *Littorophiloscia* (Isopoda, Halophilosciidae) along the Brazilian coast. *North-Western Journal of Zoology*, 13(2), 354-356.
- López-Orozco, C. M., Bermúdez, A., Navas, G. R.** (2014). Primer registro de *Ligia baudiniana* (crustacea: isopoda: oniscidea) para el Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 43(1), 195-200. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2014.43.1.41>
- López-Orozco, C. M., Carpio-Díaz, Y. M., Navas, G. R., Campos-Filho, I. S.** (2016). A new species and first record of *Androdeloscia* (Oniscidea: Philosciidae) from Colombia. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 52(1), 1-7. <https://doi.org/10.1080/01650521.2016.1254861>
- López-Orozco, C. M., Carpio-Díaz, Y. M., Navas, G. R., Campos-Filho, I. S.** (2017). A new species and first record of *Pulmoniscus* Leistikow, 2001 (Isopoda, Oniscidea, Philosciidae) from Colombia. *Nauplius*, 25:e2017014, 1-9. <https://doi.org/10.1590/2358-2936e2017014>
- López-Orozco, C. M., Carpio-Díaz, Y. M., Borja-Arrieta, R., Navas-S, G. R., Campos-Filho, I. S., Taiti, S., Mateos, M., Olazarán, A., Caballero, I. C., Jotty, K., Gómez-Estrada, H., Hurtado, L. A.** (2022). A glimpse into a remarkable unknown diversity of oniscideans along the Caribbean coasts revealed on a tiny island. *European Journal of Taxonomy*, 793, 1-50. <https://doi.org/10.5852/ejt.2022.793.1643>
- Martínez, J., Pérez, D., Espíndola, C.** (2014). Caracterización de isópodos terrestres y su impacto en cultivos hortícolas de Boyacá. *Revista De Ciencias Agrícolas*. 31(1), 55-64. <https://doi.org/10.22267/rcia.143101.42>
- Mulaik, S. B.** (1960). Contribución al conocimiento de los isópodos terrestres de México (Isopoda, Oniscoidea). *Revista de la sociedad Mexicana de Historia Natural*, XXI(1), 80-220.
- Paoletti, M., Stinner, B.** (1989). Two new terrestrial Isopoda (Oniscidea) from coralline cays of Venezuela's Caribbean coast. *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, 91(1), 71-80. Disponible en: <https://biostor.org/reference/56403>
- Pearse, A.** (1915). An account of the Crustacea collected by the Walker Expedition to Santa Marta, Colombia. *Proceedings of the United States National Museum*, 49, 531-556.
- Quadros, A. F., Araujo, P. B.** (2008). An assemblage of terrestrial isopods (Crustacea) in southern Brazil and its contribution to leaf litter processing. *Revista Brasileira de Zoologia*, 25(1), 58-66. <https://doi.org/10.1590/S0101-81752008000100009>
- Richardson, H.** (1912). Terrestrial isopods of Colombia. *Mémoires de la Société des Sciences Naturelles de Neuchâtel*, 5, 29-32.
- Ríos, R., Ramos, G. E.** (1990). Los isópodos (Crustacea: Isopoda) de Bahía Málaga, Colombia. *Revista de Ciencias*, 12, 84-96. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10893/4442>
- Ruiz, V. R., Saab H. P.** (2020). Diversidad florística del bosque seco tropical en las subregiones bajo y medio Sinú, Córdoba, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 68(1), 167-179. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68i1.38286>
- Santamaria, C. A., Mateos, M., Hurtado, L. A.** (2014). Diversification at the narrow sea-land interface in the Caribbean: Phylogeography of endemic supralittoral *Ligia* isopods. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2(Art.42), 1-15. <https://doi.org/10.3389/fevo.2014.00042>
- Silva, J., Alves, E.** (2000). *Tylos niveus* Budde-Lund, 1885 (Crustacea: Isopoda: Oniscidea: Tyliidae): redescricao e nova ocorrência para a praia de Taquaras, Santa Catarina, Brasil. *Acta Biológica Paranaense*, 29(1-4), 265-285. <https://doi.org/10.5380/abpr.v29i0.595>
- Schmalzfuss, H.** (1989). Phylogenetics in Oniscidea. *Monitore Zoologico Italiano*, 4, 3-27.
- Schmalzfuss, H.** (2003). World catalog of terrestrial isopods (Isopoda: Oniscidea). *Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie A* (654), 1-341.

- Schmalzfuss, H., Ferrara, F.** (1978). Terrestrial isopods from West Africa, Part 2: families Tylidae, Ligiidae, Trichoniscidae, Stytoniscidae, Rhyscotidae, Halophilosciidae, Philosciidae, Platyarthridae, Rhyscotidae, Trachelipidae, Porcellionidae, Armadillidiidae. *Monitore zoologico italiano, nuova serie, Supplemento, 11*(1), 15-97. <https://doi.org/10.1080/03749444.1978.10736575>
- Schmalzfuss, H., Vergara, K.** (2000). The Isopod genus *Tylos* (Oniscidea: Tylidae) in Chile, with Bibliographies of all described species of the genus. *Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, 612*, 1-42.
- Schmidt, C.** (2001). Lista preliminar de los isópodos terrestres (Crustacea, Isopoda, Oniscidea) de Venezuela. *Boletín de La Sociedad Venezolana de Espeleología, 35*, 1-12.
- Schmidt, C.** (2007). Revision of the Neotropical Scleropactidae (Crustacea: Oniscidea). *Zoological Journal of the Linnean Society, 151*(1), 1-339. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2007.00286.x>
- Schmidt, C.** (2008). Phylogeny of the terrestrial Isopoda (Oniscidea): A review. *Arthropod Systematics & Phylogeny, 66*(2), 191-226. <https://doi.org/10.3897/asp.66.e31684>
- Schultz, G. A.** (1974). Terrestrial isopod crustaceans (Oniscoidea) mainly from the West Indies and adjacent regions: 1. *Tylos* and *Ligia*. *Studies on the fauna of Curaçao and other Caribbean islands*, (149), 16-173. Disponible en: <http://www.repository.naturalis.nl/document/549820>
- Schultz, G. A.** (1984). Three new and five other species of Oniscoidea from Belize, Central America (Crustacea: Isopoda). *Journal of Natural History, 18*(1), 3-14. <https://doi.org/10.1080/00222938400770021>
- Sfenthourakis, S., Taiti S.** (2015). Patterns of taxonomic diversity among terrestrial isopods. *ZooKeys, 515*, 13-25. <https://doi.org/10.3897/zookeys.515.9332>
- Sfenthourakis, S., Myers, A. A., Taiti, S., Lowry, J. K.** (2020). Terrestrial environments. En: Thiel, M., Poore, G. (Eds). *Evolution and Biogeography of the Crustacea, the Natural History of the Crustacea*. Oxford University Press, Oxford, <https://doi.org/10.1093/oso/9780190637842.003.0014>
- Špaldonová, A., Frouz, J.** (2014). The role of *Armadillidium vulgare* (Isopoda: Oniscidea) in litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Applied Soil Ecology, 83*, 186-192. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.04.012>
- Taiti, S.** (2014). The terrestrial Isopoda (Crustacea, Oniscidea) of the Maldives. *Tropical Zoology, 27*(1), 9-33. <https://doi.org/10.1080/03946975.2014.894397>
- Taiti, S., Allspach, A., Ferrara, F.** (1995). A new family placement for the genus *Colomboscia* Vandel, 1972, with description of a new species (Crustacea, Oniscidea, Scleropactidae). *Studies on Neotropical Fauna and Environment, 30*(2), 91-100. <https://doi.org/10.1080/01650529509360945>
- Taiti, S., Checcucci, I.** (2009). New species and records of terrestrial Isopoda (Crustacea, Oniscidea) from Socotra Island, Yemen. *ZooKeys, 31*(6), 73-103. <https://doi.org/10.3897/zookeys.31.140>
- Taiti, S., Ferrara, F.** (1986). Taxonomic revision of the genus *Littorophiloscia* Hatch, 1947 (Crustacea, Isopoda, Oniscidea) with description of six new species. *Journal of Natural History, 20*(6), 1347-1380. <https://doi.org/10.1080/00222938600770911>
- Taiti, S., Ferrara, F.** (2004). The terrestrial Isopoda (Crustacea: Oniscidea) of the Socotra Archipelago. *Fauna of Arabia, 20*, 211-325.
- Taiti, S., Montesanto, G., Vargas, J.** (2018). Terrestrial isopoda (Crustacea, Oniscidea) from the coasts of Costa Rica, with descriptions of three new species. *Revista de Biología Tropical, 66*(Suppl. 1), S187-S210. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.33296>
- Taiti, S., Wynne, J.** (2015). The terrestrial Isopoda (Crustacea, Oniscidea) of Rapa Nui (Easter Island), with descriptions of two new species. *ZooKeys, 515*, 27-49. <https://doi.org/10.3897/zookeys.515.9477>
- Vandel, A.** (1972). Les isopodes terrestres de la Colombie. *Studies on Neotropical Fauna, 7*(2), 147-172. <https://doi.org/10.1080/01650527209360441>
- Vandel, A.** (1981). Les Isopodes terrestres et cavernicoles de l'île de Cuba. Second mémoire.
- Vittori, M., Dominko, M.** (2022). A bibliometric analysis of research on terrestrial isopods. *ZooKeys, 1101*, 13-34. <https://doi.org/10.3897/zookeys.1101.81016>
- Wägele, J. W.** (1989). Evolution und phylogenetisches System der Isopoda. *Zoologica, 140*, 1-262.
- Warburg, M. R.** (1993). *Evolutionary biology of land isopods*. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-21889-1>
- Zimmer, M., Topp, W.** (1999). Relationships between woodlice (Isopoda: Oniscidea) and microbial density and activity in the field. *Biology and Fertility of Soils, 30*, 117-123. <https://doi.org/10.1007/s003740050597>

Artículo original

Actividad larvica de extractos y fracciones proteicas de *Annona muricata* L. en *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae)

Larvicidal activity of extracts and protein fractions of *Annona muricata* L. on *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae)

Magaly Alejandra Brousett-Minaya^{1,2,*}, Juan Reyes-Larico², Edgar Chaparro³, Miguel Bobadilla Álvarez⁴

¹Laboratorio de Química, Facultad de Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de Alto Amazonas, Loreto, Perú

²Laboratorio de Química Orgánica, Facultad de Ciencias Naturales y Formales, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú

³Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

⁴Programa de Investigación Formativa, Vicerrectorado de Investigación, Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú

Resumen

En el campo de la salud pública, los programas de control de vectores priorizan el uso de insecticidas químicos, excluyendo métodos alternativos ecoamigables derivados de plantas. Se sabe que *Annona muricata* exhibe una actividad biológica insecticida que altera las etapas de desarrollo, los procesos fisiológicos y la mortalidad de insectos transmisores de enfermedades, pero los principios activos y las proteínas de esta especie de *Annonaceae* requieren validación entomotóxica en un modelo biológico de culicidos. Se evaluó la actividad de los extractos etanólico (ExtEtOH) y de alcaloides (ExtAlc) y de las fracciones proteicas (FP) de semillas de *A. muricata* en larvas del IV estadio temprano de *Culex quinquefasciatus* empleando un abordaje comparativo. El análisis cualitativo de metabolitos en ExtEtOH reveló la presencia de alcaloides, aminoácidos, lactonas, taninos, cardenólidos, acetogeninas y flavonoides. Mediante cromatografía de exclusión molecular se separaron cinco fracciones proteicas de las cuales se evaluó la tercera (FP3), la cual exhibió mayor letalidad larval (33 % con 0,5 mg/ml) y potencia revelada en la concentración letal media (CL₅₀) (0,66 mg/ml, p: 0,166). ExtAlc mostró valores de mortalidad cercanos a los de la FP3 (30 %) y su CL₅₀ (0,74 mg/ml, p: 0,754), en tanto que ExtEtOH confirió máxima mortalidad (100 %) y una CL₅₀ inferior (0,03 mg/ml, p: 0,976). Se observaron dos reacciones tóxicas: una respuesta inmediata en ExtEtOH (97 % en 12 h) y una respuesta aguda mediata en FP y ExtAlc extendida hasta finalizar el ensayo (72 % en 72h).

Palabras claves: Enfermedades transmitidas por vectores; Toxicidad; Proteínas de plantas; Extractos vegetales; Control de vectores.

Abstract

In public health, vector control programs prioritize the use of chemical insecticides and exclude alternative eco-friendly plant-derived methods. *Annona muricata* exhibits bioinsecticidal activity that can modify developmental stages, physiological processes, and lethality in disease-transmitting insects. However, *Annonaceae* species' active principles and proteins require entomotoxic validation using a *Culicidae* biological model. Ethanolic (ExtEtOH) and alkaloid (ExtAlc) extracts and (PF) protein fractions from *A. muricata* seeds were evaluated on 4th instar larvae of *Culex quinquefasciatus* using a comparative scheme. The qualitative chemical analysis of ExtEtOH revealed alkaloids, amino acids, lactones, tannins, cardenolides, acetogenins, and flavonoids. Protein extract molecular

Citación: Brousett-Minaya MA, et al. Actividad larvica de extractos y fracciones proteicas de *Annona muricata* L. en *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):623-637, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2649>

Editor: Myriam Sánchez de Gómez

***Correspondencia:**

Magaly Alejandra Brousett Minaya; mbrousett@unaaa.edu.pe

Recibido: 21 de mayo de 2024

Aceptado: 27 de julio de 2024

Publicado en línea: 29 de agosto de 2024



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

exclusion chromatography allowed the separation of five protein fractions. PF3 exhibited larval mortality of 33% with 0.5 mg/ml, LC_{50} 0.66 mg/ml (p : 0.166), and ExtAlc showed 30% with LC_{50} 0.74 mg/ml (p : 0.754) while ExtEtOH conferred 100% mortality and LC_{50} 0.03 mg/ml (p : 0.976). We observed immediate larvicidal reactions by ExtEtOH of 97% in 12 h and mediate reactions by PF and ExtAlc of 72% in 72 h.

Keywords: Vector-borne diseases; Toxicity; Plant proteins; Vegetable extracts; Vector control.

Introducción

La incidencia y la prevalencia de enfermedades transmitidas por vectores (ETV) en Perú van de la mano con el incremento de los índices de pobreza y se combaten siguiendo las políticas sanitarias de primera línea de acción que recomiendan el uso de insecticidas químicos (World Health Organization-WHO, 2014). En los programas de salud pública, frecuentemente se aplican organofosforados, organoclorados, neonicotenoides y piretroides durante los brotes de ETV, con una notoria disminución de los índices de morbimortalidad por dengue, Zika, chikungunya y malaria (Instituto Nacional de Salud (Perú), 2024). Sin embargo, el aumento inesperado de ETV en el primer trimestre de 2024 sugiere una asociación con el incremento poblacional de vectores primarios transmisores como *Aedes aegypti* y especies de *Anopheles* spp. (Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades, 2024). Aunque tal diseminación podría verse incentivada por el cambio climático, otra causa documentada es la adquisición de mecanismos de resistencia del vector debido, en parte, al poco control de emisión de insecticidas de origen agrícola, doméstico o comercial, que alteran el esquema químico impuesto por los sistemas de salud (Richards *et al.*, 2020). Además, el empleo aislado de insecticidas se contraponen a las directrices del manejo integrado de vectores (MIV) que recomiendan la integración de métodos complementarios (físicos, biológicos o de ordenamiento de hábitats), así como el uso de productos naturales (Rajput *et al.*, 2023).

Un aspecto desatendido en los programas de gestión de las ETV y vigilancia vectorial es la aparición de enfermedades asociadas con *Culex quinquefasciatus* Say. Las reacciones de hipersensibilidad a las molestas picaduras del adulto hematófago resultan en una respuesta distorsionada de los servicios de salud local, que anteponen el alivio de signos y síntomas en detrimento de la mitigación de los criaderos del agente vector (Vander Does *et al.*, 2022). En efecto, en estudios sobre el crecimiento poblacional de *C. quinquefasciatus* se predice un escenario a corto plazo de marcada distribución geográfica del insecto y de enfermedades como la filariasis linfática (FL), la encefalitis japonesa (VEJ) y la fiebre del Nilo occidental en nuevas áreas de dominio en Perú y Chile (Figueroa *et al.*, 2020; Shocket *et al.*, 2020). Este escenario epidemiológico parece ya confirmarse en ciertos países de Suramérica que revelan en *C. quinquefasciatus* la adquisición y transmisión del virus del oeste del Nilo (VON) y en la capacidad de albergar el virus Zika, lo que lo convierte en un doble propagador de la enfermedad junto con *A. aegypti* (Reis *et al.*, 2023). Dichos hallazgos, sumados a la presencia de hábitats condicionantes de alta diseminación del vector (aguas estancadas, plantación de arrozales y sistemas inadecuados de tratamiento de aguas residuales), constituyen indicadores de alerta epidemiológico-ambiental que ameritan un replanteamiento de las medidas preventivas de ordenamiento del medio y vigilancia poblacional de *C. quinquefasciatus*. (Ha *et al.*, 2021) mediante estrategias ecoamigables como el uso de insecticidas botánicos.

Los insecticidas botánicos incluyen los plaguicidas derivados de plantas con algún efecto biológico en organismos (Ayilara *et al.*, 2023). La obtención y procesamiento de la materia prima vegetal, la extracción y biodegradabilidad de los principios activos y la nula generación de resistencia son factores de creciente aceptación internacional ante los exigentes criterios de elección de nuevas categorías de insecticidas (Seiber *et al.*, 2014; Pant *et al.*, 2016). Además, la creación de estándares químicos para su validación y control de calidad (Heng *et al.*, 2013) ha incentivado la permanente innovación de insecticidas

botánicos de nueva generación (micro o nanoemulsiones, formulaciones de liberación controlada o en espiral, etc.), cuya potencia supera, incluso, la de los insecticidas sintéticos (**Bhandari et al.**, 2016).

Un buen prospecto de insecticida botánico es la especie *Annona muricata* L., la graviola o guanábana, por su amplia bioactividad derivada de acetogeninas, alcaloides, diterpenos, flavonoides y compuestos fenólicos (**Riley-Saldaña et al.**, 2017, **Durán-Ruiz et al.**, 2023). Las virtudes asociadas al control de las fases del desarrollo acuático y terrestre de los insectos holometábolos del orden Diptera son de especial interés en salud pública, dado el amplio espectro de acción del vegetal en varios niveles (repelencia, efecto disuasorio de la oviposición por contacto y digestivo), y los cortos periodos y baja concentración de los principios activos que requiere (**Rodrigues et al.**, 2019).

Aunque los modos de acción antivectorial señalados son habituales en moléculas sintetizadas a partir de una vía metabólica secundaria, el descubrimiento de proteínas tóxicas en semillas de *A. muricata* (lectinas, inhibidores de proteasas, proteínas inhibitoras de ribosomas (PIR) y ciclopéptidos), abre una ruta metabólica adicional de control de vectores (**Kocyigit et al.**, 2023). Las propiedades citotóxicas y de defensa frente al ataque de insectos de las proteínas vegetales son propias de varias familias (**Dang & Van Damme**, 2015). Sin embargo, en especies del género *Annona* la entomotoxicidad larvícida se da únicamente en *A. muricata* y en la acción de las lectinas de sus semillas en *C. quinquefasciatus* (**Parthiban et al.**, 2020a; **Parthiban et al.**, 2020b). En Perú no se ha hecho ninguna investigación de referencia que ilustre dicho efecto en la misma especie vegetal y el mismo vector.

En este contexto, nuestro estudio partió de la premisa de que el uso de extractos y fracciones proteicas de las semillas de guanábana en determinadas concentraciones y tiempos de exposición tiene un efecto larvícida y exhibe distintas respuestas tóxicas frente a un culícido modelo de amplia distribución, lo que promete escenarios positivos de un posible empleo de *A. muricata* como insecticida botánico para la disminución poblacional del insecto. En este sentido, se evaluó la actividad de los extractos etanólico y de alcaloides y de las fracciones proteicas de semillas de *A. muricata* en larvas de *C. quinquefasciatus* empleando un abordaje comparativo.

Materiales y métodos

Material vegetal

Los frutos de *A. muricata* se adquirieron en el mercado de Quillabamba - Cusco, situado a 1.050 m de altitud. Se separaron las semillas de 5 kg de frutos y se lavaron con hipoclorito de sodio (0,5 %) para su desinfección; posteriormente se secaron en estufa a 40 °C durante 10 h. Las semillas se molieron hasta obtener un polvo uniforme (**Alegre**, 2017).

Procesamiento de extractos y fracciones proteicas

Extracto etanólico (ExtEtOH). Las semillas pulverizadas (200g) se maceraron en 400 mL de etanol al 96 % en un recipiente de vidrio color ámbar herméticamente cerrado mantenido en oscuridad a 22 °C. El procedimiento incluyó la remoción continua del sistema durante una semana. El extracto etanólico filtrado se concentró en un rotaevaporador (LabTech EV311VA) a 370 mbar de presión y 40 °C (**Bobadilla**, 2005).

Extracto de alcaloides (ExtAlc). La harina de semillas así obtenida se desengrasó durante 8 horas con 2-propanol; luego, 100 g se homogeneizaron con 400 mL de ácido tricloroacético al 5 % en agitación constante durante 12 horas. La mezcla se centrifugó (6000 rpm x 15min) y el sobrenadante se alcalinizó con 10 mL de hidróxido de sodio 10 M en un embudo de separación. Los alcaloides se extrajeron con diclorometano (3 x 50 mL), se recuperó la fase orgánica y se evaporó en un rotaevaporador a 40 °C (**Zamora-Natera et al.**, 2005).

Fracciones proteicas (FP). Las semillas pulverizadas (20g) se desengrasaron con 2-propanol (proporción 1:4 p/v a 15 °C por 4 h). Una doble filtración al vacío eliminó la interferencia de contaminantes grasos. El material desengrasado y seco se extrajo en

solución salina de NaCl 0,15 M (proporción 10:90 p/v) a 4 °C durante 4 h (**Brandão-Costa *et al.*, 2018**). El extracto acuoso se centrifugó a 5000 rpm durante 15 min y el sobrenadante se filtró por jeringa Minisart® (0,22 µm). Las proteínas se separaron por cromatografía de exclusión molecular con Sephadex G-75, utilizando como eluyente el tampón Tris-HCl 50 mM, NaCl 100 mM, pH 8,0. La columna se equilibró y se colocaron las muestras con elución de 0,25 mL/min. Las fracciones recuperadas se leyeron por BioSpectrometer® Kinetic Eppendorf (Germany) a 280 nm. La concentración proteica se determinó por el método del ácido bicinonínico (BCA, sensibilidad entre 0,02 a 1,0 mg/mL). Para esto, una alícuota de 200 µl de BCA: CuSO₄ (50:1) se agregó a 25 µl de la muestra proteica y se incubó a 37 °C (en oscuridad durante 25 min en placa) y se leyó en el espectrofotómetro a 562 nm (**Brousett-Minaya, 2013**). Por último, los extractos etanólico y de alcaloides y las fracciones proteicas purificadas liofilizadas en un equipo Labconco (2,5 L) se almacenaron a 4 °C.

Tamizaje fitoquímico. El vegetal triturado (20g) fue macerado en diclorometano (CH₂Cl₂), etanol (EtOH) y agua de grado analítico durante cinco días. Para la marcha fitoquímica se empleó la técnica del Instituto Nacional de Salud (**INS, 1999**), que consiste en un conjunto de reacciones específicas de coloración y precipitación para detectar los tipos de metabolitos secundarios presentes.

Con los reactivos de Dragendorff, Mayer y Wagner se determinaron los alcaloides (**Coy, 2014;**), en tanto que con el reactivo de Liebermann-Burchard se rastrearon los esteroides y triterpenos (**Ardila, 2014**). Con las soluciones de Fehling, Baljet, Kedde y Shinoda se detectaron, respectivamente, azúcares reductores, lactonas, cardenólidos, acetogeninas y flavonoides (**Ardila, 2014;**). El hidrato de tricetohidrindeno (ninhidrina) reaccionó a la presencia de aminoácidos y con el ensayo de espuma se reconocieron las saponinas, en tanto que el viraje de color del cloruro férrico (FeCl₃) indicó la presencia de taninos (**Valencia, 2005**). El gradiente de presencia o ausencia de metabolitos se expresó como muy abundante (++++), abundante (+++), moderado (++) , leve (+) o ausente (-).

Material biológico. Las larvas y pupas de *C. quinquefasciatus* procedían de estanques artificiales del margen rural del distrito de La Yarada-Los Palos (Tacna, Perú) (**Figura 1**). Las larvas se mantuvieron hasta la emergencia de adultos dentro de cubetas de plástico protegidas con tela de tul, según el protocolo estándar (**Kauffman *et al.*, 2017**). En el

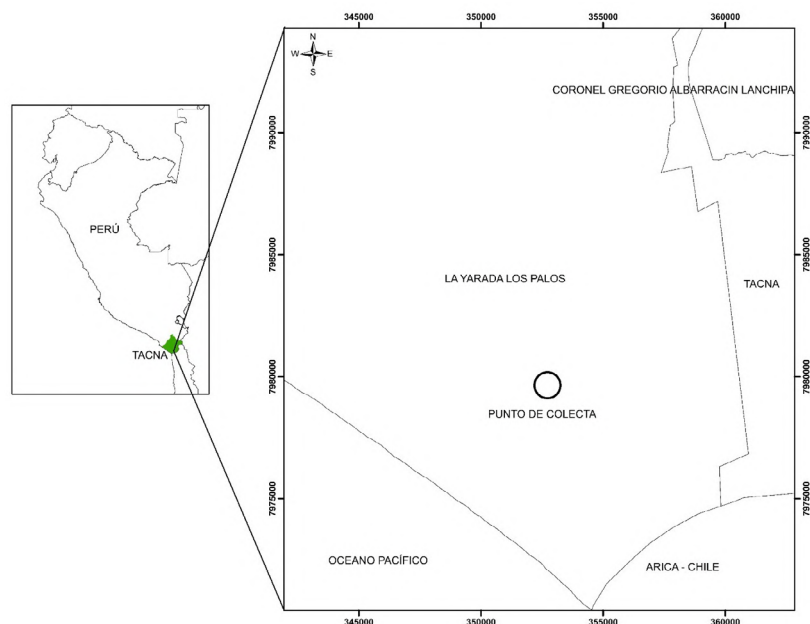


Figura 1. Mapa de ubicación del sitio de recolección de larvas de *C. quinquefasciatus*

laboratorio las variables abióticas registradas fueron las siguientes: temperatura de 20 a 23 °C, humedad relativa de 67 a 70 %, fotoperiodo de 12:12 h (claro: oscuro). Se criaron 300 larvas de mosquito en bandejas de plástico de 30,3 x 22,1 x 7,5 en un volumen de 3L alimentadas con el suministro diario de detrito vegetal mezclado con alimento estéril para peces en proporción de 1:1. La determinación taxonómica incluyó el análisis morfológico de las cerdas, el tamaño del sifón y la papila anal en larvas, los tergitos abdominales, la morfología y el color de las patas, y la disposición de las escamas cefálicas en las hembras adultas (**Consoli & Oliveira, 1994**).

Ensayo de mortalidad. Este se adecuó a partir de un modelo de bioensayo estándar para evaluar la potencia de sustancias derivadas de plantas (**Karunaratne et al., 2022; Ahmad et al., 2023**). Dado que se trataba de un estudio de base con el propósito de suministrar evidencias primarias de mortalidad de metabolitos proteicos, nuestro procedimiento no incluyó protocolos estrictos de vigilancia de la susceptibilidad con alguna cepa de referencia para detectar la resistencia a los insecticidas convencionales (**Grossman et al., 2020**). La revisión bibliográfica de reportes sobre el estado local del agua medido por estándares peruanos de calidad hídrica, demostró que esta es apta para el consumo de animales y humanos previa cloración (pH, coliformes, metales disueltos y otros) (**Chino, 2019**). Sin embargo, la ausencia total de reportes sobre la afectación ambiental por insecticidas se contraponen a la gran extensión de áreas agrícolas que al 2020 (**Alvarado et al., 2020**) se dedicaba a actividades económicas demandantes de cantidades considerables de agroquímicos debido al alto riesgo de que estos penetren los reservorios hídricos y, por ende, afecten a los invertebrados acuáticos. En ese contexto, en la evaluación de la mortalidad se emplearon larvas fl libres de insecticidas provenientes de la generación parental recolectada en campo (**WHO, 2005**).

La unidad experimental del ensayo consistió en un vaso de plástico estéril que contenía una solución bioinsecticida y 20 larvas del IV estadio temprano. En un volumen final de 150 ml, cada unidad experimental recibió tres réplicas de 0,05; 0,1; 0,3 y 0,5 mg/mL de ExtEtOH, ExtAlc y FPs, respectivamente, además de controles de agua potable sin cloro. Las concentraciones se determinaron con base en las experiencias previas con las semillas de la especie frente a *A. aegypti* (**Bobadilla, 2005**). La mortalidad registrada a las 24, 36, 48, 60 y 72 h fue acumulativa y se confirmó por inamovilidad corporal de los individuos al punzar el mesotórax con un estilete de extremo romo.

El porcentaje de mortalidad se corrigió empleando la fórmula de Abbott cuando la mortalidad en el control se situó entre el 5 y el 10 % (**Abbott, 1925**).

$$\% \text{ mortalidad corregida} = \frac{\% \text{ mortalidad en tto} - \% \text{ mortalidad en grupo control}}{100 - \% \text{ mortalidad grupo control}} \times 100$$

Análisis estadístico

Los datos transformados a función probit evidenciaron al linealizarse la naturaleza sigmoide de la respuesta (relación dosis-respuesta) para estimar la concentración letal media (CL_{50}) y comparar la bioactividad (**Robertson, 2017**). El valor de probabilidad (p) del ajuste ($p > 0,05$) o del ajuste no adecuado ($p < 0,05$) de los datos se confirmó con la prueba de bondad de ajuste de ji al cuadrado (X^2)

La mortalidad larval se evaluó en seis ocasiones (hora) en función de la concentración y el tipo de sustancia larvívica. Estos criterios fundamentaron la elección del análisis de varianza de medidas repetidas (RM-ANOVA) para determinar las diferencias significativas ($p < 0,05$) y no significativas ($p > 0,05$) en las concentraciones de FP, ExtEtOH y ExtAc (variable independiente) y la mortalidad (variable dependiente) (**Hothorn, 2014**). Los supuestos del RM-ANOVA incluyeron la verificación de la normalidad de los datos con el test de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$, se acepta la H_0 de distribución normal de datos inferior a 50 sujetos por unidad experimental) (1) y la prueba de esfericidad de Mauchly para la igualdad de varianzas (**Ohba et al., 2013**). El paquete “rstatix” en la librería (rstatix) del RStudio sirvió para desarrollar el test de bondad de ajuste de X^2 (función `chisq_test()`), además de aplicar el RM-ANOVA (función `anova_test()`), el test de Shapiro-Wilk (función `shapiro`).

test(x), donde x es un vector numérico con datos, y la prueba de esfericidad de Mauchly, la cual se reportó automáticamente con la función `anova_test()` (Kasaambara, 2023). Todo el análisis estadístico se procesó con el *software* libre RStudio, ver. 4.3.1, para Windows (R Project for Statistical Computing).

Resultados

Fraciones proteicas

El cromatograma reveló la separación de cinco fracciones proteicas (FP) (1 – 5) (Figura 2). La FP1 (0,5 mg/ml), la FP2 (0,3 mg/ml) y la FP3 (0,5 mg/ml) mostraron concentraciones aceptables y se eligieron para la evaluación larvicida.

Análisis fitoquímico

Se observó un mayor número e intensidad de metabolitos en la fracción correspondiente a ExtEtOH (Tabla 1), características relevantes para su elección en las pruebas larvicidas, al igual que en el extracto de alcaloides. La extracción orgánica con CH₂Cl₂ reveló una

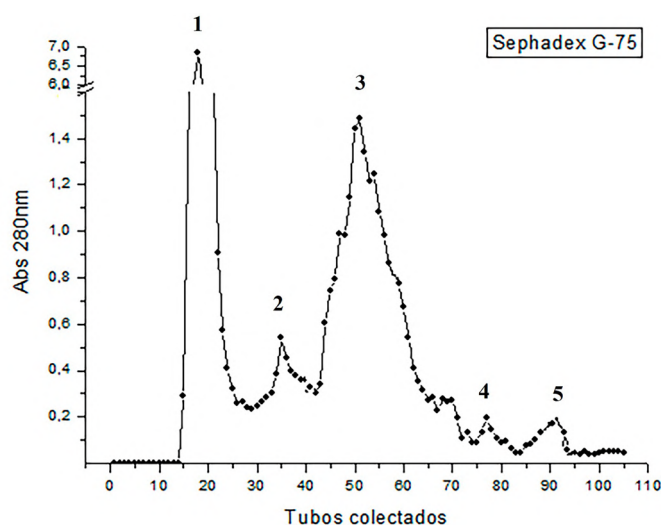


Figura 2. Cromatograma de exclusión molecular de semillas de *A. muricata* que revela cinco fracciones proteicas: 1.FP1; 2.FP2; 3.FP3; 4.FP4 y 5.FP5

Tabla 1. Tamizaje fitoquímico de las semillas de *A. muricata*

Solvente	Metabolitos	Intensidad ^a	Reactivos
EtOH	Alcaloides	++++	Dragendorff
		++++	Mayer
		++++	Wagner
	Lactonas	+	Baljet
	Flavonoides	++	Shinoda
	Aminoácidos	+++	Ninhidrina
	Cardenólidos/acetogeninas	++	Kedde
CH ₂ Cl ₂	Azúcares reductores	+	Felhing
		-	Liebermann-Burchard
H ₂ O	Saponinas	-	Espuma
	Taninos/fenoles	+	FeCl ₃

^a (++++) muy abundante, (+++) abundante, (++) moderado, (+) leve, (-) ausente.

EtOH: etanol al 96 %; CH₂Cl₂: diclorometano

intensidad nula de esteroides y triterpenos, o cualquier otro metabolito, y, juntamente con la extracción acuosa asociada con una débil o nula presencia de saponinas y fenoles, determinaron su exclusión de los ensayos larvicidas.

Actividad larvica

La FP3 mostró control larval a 0,5 mg/ml (7 %) en 12 h, en contraste con las FP1 y FP2, las cuales produjeron una mortalidad menor a 3 % entre las 24 y las 36 h. Si bien estas dos fracciones evidenciaron un control lento y progresivo hasta la finalización del ensayo (FP1: 25 % y FP2: 23 %), la FP3 tuvo un mayor efecto (70 %) en 72 h. La toxicidad de ExtEtOH (96 %) se evidenció en las primeras 24 h, con un patrón de control similar en potencia con la mínima concentración de 0,05 mg/ml, la cual indujo mortalidad desde el inicio del ensayo (12 %) hasta las 48 h (100 %). La mortalidad larval producida por ExtAlc fue, en general, inferior a la de ExtEtOH y la FP3 (**Tabla 2**).

El modelo probit ajustó los datos para el cálculo de las CL_{50} ($p > 0,05$, X^2) (**Tabla 3**). La disminución gradual de los valores de la CL_{50} fue inversa al incremento de los tiempos de exposición del bioensayo. Esto significa que mantener el patrón de mortalidad larval al 50 % requerirá de menor concentración de FP a medida que los tiempos de exposición aumentan. Al comparar las CL_{50} de las tres FP, la menor demanda gradual de FP3 entre las 36 h (0,66 mg/ml, $p = 0,166$) y las 72 h (0,28 mg/ml, $p = 0,227$) reveló mayor potencia larvica con respecto a las CL_{50} de FP1 y FP2. Sin embargo, la CL_{50} de ExtEtOH (0,03 mg/ml, $p = 0,976$) demostró un control larval superior a las 36 h que el de la FP3 y el ExtAlc (0,74 mg/ml, $p = 0,754$). El 100 % de mortalidad producida por ExtEtOH entre las 48 h y las 72 h imposibilitó el procesamiento de las CL_{50} , restricción que coincidió con las CL_{50} de FP y ExtAlc entre las 12 y las 24 h debido a la nula o baja mortalidad vectorial.

Análisis de la respuesta larvica frente a FP, ExtEtOH y ExtAlc

Factores de variación como la concentración, las fracciones proteicas y los extractos a lo largo de los seis tiempos de exposición implicaron respuestas larvicidas significativamente distintas ($p < 0,05$) (**Tabla 4**). Con ciertas excepciones en las que los valores de R^2 no se calcularon en FP1 y FP2 (**Figura 3a-c**), ni en ExtEtOH (**Figura 3d-f**) debido a registros extremos de mortalidad nula o total, el ajuste del modelo de regresión se explicó con el 50 % ($R^2 > 0,60$) de la variabilidad total. A lo largo del ensayo las sustancias ejercieron dos patrones de toxicidad: la asociada a la letalidad larval inmediata en ExtEtOH y la mediata en FP y ExtAlc. En el primer caso, la respuesta larvica iniciada a las 12 h ($R^2 = 0,75$) se incrementó hasta las 48 h ($R^2 = np$), momento que se refleja en la línea horizontal indicadora de máxima mortalidad (**Figura 3d-f**). En contraste, las respuestas larvicidas bajas y similares de FP y ExtAlc ($R^2: 0,50-0,89$) a partir de las 12 h tuvieron una evolución escalonada hasta un máximo a las 48 h ($R^2: 0,65-0,84$), con tendencia a la estabilización del control larval dentro de las 72 h ($R^2: 0,66-0,78$) (**Figura 3d-f**).

Tabla 2. Porcentaje de mortalidad de larvas de *C. quinquefasciatus* entre las 12 y las 72 horas de exposición al extracto etanólico (ExtEtOH), el extracto de alcaloides (ExtAlc) y las tres fracciones proteicas (FP1, FP2 y FP3)

Tiempos (h)	12				24				36				48				60				72							
Concentraciones (mg/ml)	0,05	0,1	0,3	0,5	0,05	0,1	0,3	0,5	0,05	0,1	0,3	0,5	0,05	0,1	0,3	0,5	0,05	0,1	0,3	0,5	0,05	0,1	0,3	0,5	0,05	0,1	0,3	0,5
ExtEtOH	12	32	42	97	53	68	83	100	92	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ExtAlc	0	0	3	3	0	12	15	18	0	23	25	30	0	30	32	38	0	32	37	42	0	32	37	43				
FP1	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	3	5	0	5	12	10	0	12	22	18	0	12	25	25				
FP2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	7	8	8	0	17	15	15	0	17	18	23				
FP3	0	0	0	7	0	0	3	15	0	15	18	33	7	30	35	52	12	43	45	63	12	50	50	70				
Control	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3. CL₅₀ (mg/ml) del extracto etanólico (ExtEtOH), el extracto de alcaloides (ExtAlc), y las fracciones proteicas (FP1, FP2 y FP3) de semillas de *A. muricata* en *C. quinquefasciatus*

Tiempos (h)	Extractos				Fracciones proteicas					
	ExtEtOH	X ² (p)*	ExtAlc	X ² (p)	FP1	X ² (p)	FP2	X ² (p)	FP3	X ² (p)
12	0,25	0,231	np	np	np	np	np	np	np	np
24	0,02	0,169	0,97	0,351	np	np	np	np	np	np
36	0,03	0,976	0,74	0,754	1,05	0,500	1,12	0,764	0,66	0,166
48	np**	np	0,60	0,708	1,17	0,106	1,55	0,135	0,47	0,140
60	np	np	0,54	0,336	0,91	0,098	1,40	0,054	0,34	0,241
72	np	np	0,52	0,389	0,73	0,113	0,88	0,075	0,28	0,227

* X² (p): valor de probabilidad del test de bondad de ajuste de ji al cuadrado

** np: valor de ji cuadrado no procesado

Tabla 4. ANOVA de medidas repetidas de concentraciones (Cc.) extractos (Extr.) y fracciones proteicas (FP) en seis tiempos de exposición (12, 24, 36, 48, 60 y 72 horas). Se muestran las diferencias significativas (p<0,05) en cada factor de variación.

	FV	SC	gl	CM	Razón F	p
12 h	Cc.	12,60	11	1,15	2,694	0,010
	Extr./FP	84,83	4	21,21	49,891	0,000
	Error	18,70	44	0,43		
	Total	116,13	59			
24 h	Cc.	20,37	11	1,85	4,302	0,000
	Extr./FP	141,92	4	35,48	82,412	0,000
	Error	18,94	44	0,43		
	Total	181,23	59			
36 h	Cc.	29,14	11	2,65	7,822	0,000
	Extr./FP	232,94	4	58,23	171,952	0,000
	Error	14,90	44	0,34		
	Total	276,98	59			
48 h	Cc.	24,02	11	2,18	9,729	0,000
	Extr./FP	202,23	4	50,56	225,217	0,000
	Error	9,88	44	0,22		
	Total	236,14	59			
60 h	Cc.	30,20	11	2,75	10,658	0,000
	Extr./FP	180,01	4	45	174,723	0,000
	Error	11,33	44	0,26		
	Total	221,54	59			
72 h	Cc.	34,09	11	3,10	11,803	0,000
	Extr./FP	173,84	4	43,46	165,487	0,000
	Error	11,56	44	0,26		
	Total	219,49	59			

FV: fuente de variación; SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrados medios

La evaluación independiente de cada sustancia indicó la tendencia de las larvas a responder diferencialmente a la potencia tóxica, con una mortalidad completa en ExtEtOH antes de las 48 horas (**Figura 4a**) en contraste con ExtAlc (**Figura 4b**) y FP3 (**Figura 4c**). Esta última, tomada como referente de mayor toxicidad de las fracciones proteicas, proporcionó, además, un esquema general de discreta respuesta inicial que se amplió gradualmente sin alcanzar la mortalidad total (72 h).

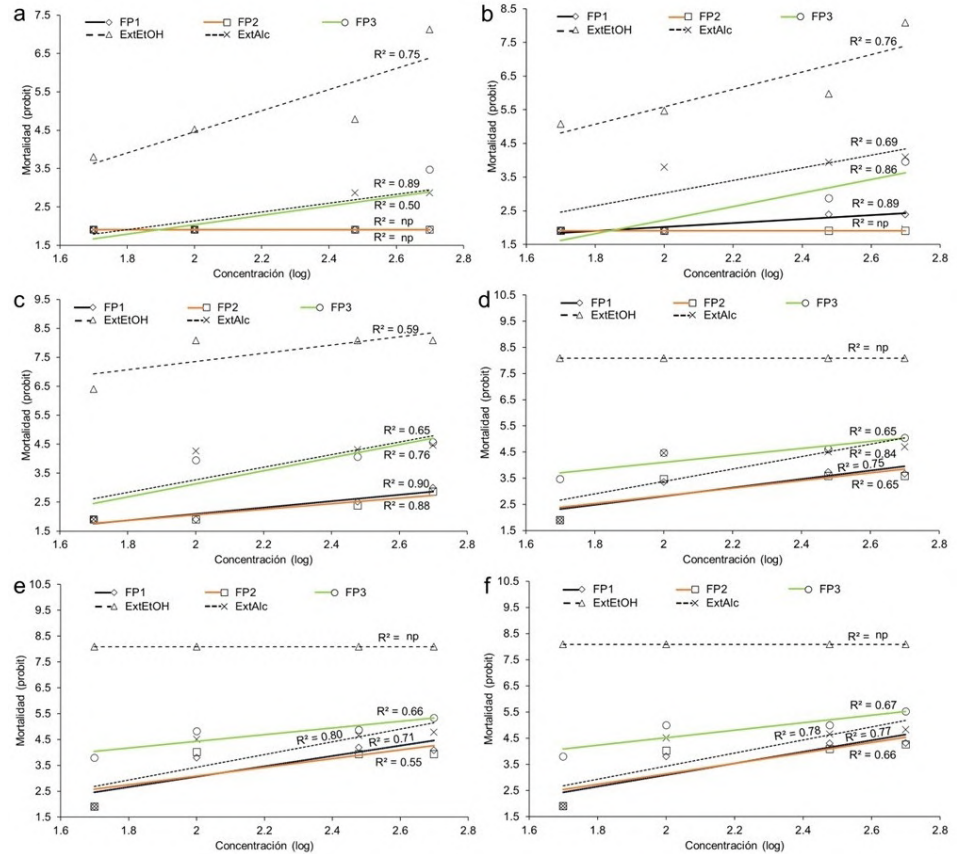


Figura 3. Actividad larvica basada en la concentración (log) del extracto etanólico (ExtEtOH), el extracto de alcaloides (ExtAlc) y tres fracciones proteicas (FP1, FP2 y FP3) Vs. mortalidad (probit) de *C. quinquefasciatus*. La mortalidad larval observada a las 12 h (a), 24 h (b), 36 h (c), 48 h (d), 60 h (e) y 72 h (f) se muestra en comparación con ExtEtOH y ExtAlc (líneas discontinuas), así como FP1 (línea sólida negra), FP2 (línea sólida anaranjada) y FP3 (línea sólida verde). Los coeficientes de determinación (R^2) se indican en el extremo de las líneas de tendencia y su no procesamiento se denota por np

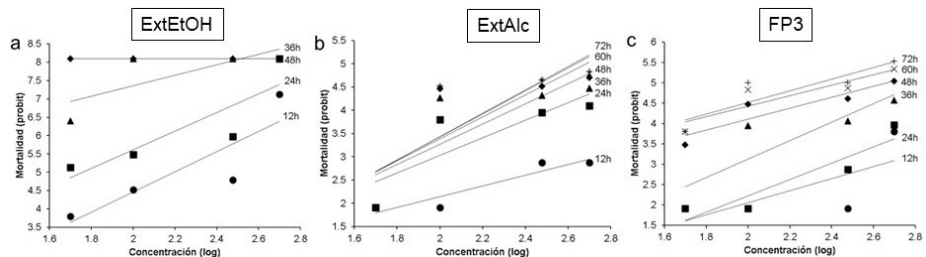


Figura 4. Diferencial tóxico del extracto etanólico ExtEtOH (a), el extracto de alcaloides ExtAlc (b) y la fracción proteica FP3 (c) en seis tiempos de exposición (12h, 24h, 36h, 48h, 60h y 72 h)

Discusión

Los distintos valores de mortalidad de las sustancias (ExtEtOH, ExtAlc y FP) sugieren dos mecanismos de toxicidad larval: la respuesta inmediata y la respuesta mediata. En la respuesta inmediata, las concentraciones, la parte vegetal y el solvente de extracción (etanol al 95 %) revelaron que el ExtEtOH ejerció un efecto temprano adverso sobre las larvas del culicido. La respuesta en las 12 h iniciales (12 - 97 %) fue total a las 48 h (**Tabla 2**), resultados que son congruentes con las pruebas de insecticidas en *A. aegypti* y *Anopheles* sp., incluso a partir de los 60 minutos de iniciado el bioensayo (**Bobadilla et al.**, 2002; **Bobadilla et al.**, 2005).

Una explicación del potente control larval se debería a los principios activos detectados en el tamizaje fitoquímico (**Tabla 1**). ExtEtOH se compone mayoritariamente de alcaloides, cardenólidos o acetogeninas y compuestos que contienen grupos aminos libres (aminoácidos, péptidos), como se ha reportado en trabajos previos (**Neglo et al.**, 2021; **Zubaidi et al.**, 2023). La intensa reacción observada en alcaloides puede indicar un marcado contenido de los clasificados como isoquinoleínicos, aporfínicos y protoberberínicos (**Moghadamtousi et al.**, 2015). A pesar de que su acción insecticida no ha sido completamente esclarecida en *A. muricata*, la citotoxicidad de estos compuestos en líneas celulares y el efecto inhibitorio a la acetilcolinesterasa encargada de la correcta transmisión neuromuscular (**Iranshahy et al.**, 2014), son hallazgos que sugieren la acción larvicida en *C. quinquefasciatus*.

La reacción positiva al reactivo de Kedde puede responder a la presencia de anillos α - β -insaturados o gamma-lactona saturados, los cuales revelan la presencia de acetogeninas (ACG) (**Aguilar-Hernández et al.**, 2020), lo que se relacionaría con la fuerte actividad larval en ExtEtOH, tal como se ha revelado en otro estudio (**Al Kazman et al.**, 2022). Por otro lado, la ninhidrina detectó una relativa intensidad de aminoácidos, aunque también demuestra su especificidad para péptidos y proteínas (**Friedman**, 2004). La presencia de estas moléculas sugiere la acción insecticida en ExtEtOH mediada por fitopéptidos tóxicos (orbítidos) inhibidores de proteasas (PIR ciclohexapéptido), lo que también se ha revelado en la extracción etanólica o metanólica de semillas de *A. muricata* (**Fisher et al.**, 2019).

El análisis de los principios activos contenidos en ExtEtOH sugiere que hay potencia larvicida de acción multiobjetivo en un patrón de interacción por contacto e ingesta. Conceptualmente la sinergia alude a valores muy altos de toxicidad en el efecto combinado de sustancias vegetales e insecticidas (**Mansour et al.**, 2010), en tanto que el control por contacto e ingesta en acetogeninas (**Costa et al.**, 2018;) y la neurotoxicidad de los alcaloides (**Riley-Saldaña et al.**, 2017) pueden ser indicadores del efecto combinado e independiente por interacción aditiva de los metabolitos (**Fong et al.**, 2017). Las evidencias que respaldan preliminarmente este postulado son la rápida mortalidad en ExtEtOH (**Tabla 2**), la relación dosis-respuesta (**Figura 4a**) y los mínimos valores de CL_{50} (**Tabla 3**), lo que sugiere una eficiente penetrabilidad de principios activos a los órganos blanco de la larva y su subsiguiente muerte. Aunque hay una posibilidad de interacción antagónica, como sucede en los biopesticidas (**Harte et al.**, 2024), ante el potente control larval de ExtEtOH se infiere una posible acción larvicida aditiva contra *C. quinquefasciatus* si ésta produce en concordancia con el modo de acción de los diversos metabolitos, comparada con la sola actividad del conjunto de alcaloides en ExtAlc y de las proteínas en FP. Sin embargo, la determinación exacta de las posibles interacciones de las sustancias en el extracto queda por resolverse en futuros análisis de fraccionamientos biodirigidos y modelamientos estadísticos (curvas de supervivencia de Kaplan-Meier y factor de toxicidad) (**Mansour et al.**, 2011) como respaldo de la hipotética respuesta inmediata.

Una posible explicación de la acción mediata de las FP respondería a la bioactividad de los inhibidores de proteasas y lectinas en la vía digestiva (**Vandenborre et al.**, 2011). Los inhibidores de proteasas pertenecientes a la familia Kunitz y Bowman-Birk (BBI) reprimen la bioquímica de la serina, la cisteína, el aspartato o las metaloproteinasas, disminuyendo la actividad de proteasas digestivas en el mesenterio de *C. quinquefasciatus*

con el subsiguiente efecto larvívica (Dantzger *et al.*, 2015; Ayana-Gayathri & Evans, 2018). Según estos antecedentes, los estudios más recientes de BBI extraídos de semillas de *A. muricata* han revelado la capacidad inhibitoria de las cisteína proteasas del mesenterio larval de *A. aegypti* (Aparna *et al.*, 2021), lo que se considera clave para entender el modo de acción similar de tales inhibidores en el aparato intestinal del vector en estudio. Otro grupo de proteínas circunscritas a lectinas confiere un efecto insecticida debido al enlazamiento químico con la membrana de borde en cepillo del epitelio intestinal y la membrana peritrófica en insectos (Lagarda-Díaz *et al.*, 2017). La letalidad de larvas de *A. aegypti* por deterioro y desorganización estructural del mesenterio sucede, al parecer, por la acción de las lectinas (Parthiban *et al.*, 2020a), en contraste con el control larval del contenido de fracciones proteicas. Ambos resultados se explican razonablemente por la ingestión de fuentes proteicas de alto peso molecular ya probada en experimentos *in vivo* e *in vitro* en larvas de culícidos (Al-Mehmadi & Al-Khalaf, 2010), lo cual valida nuestra hipótesis de la toxicidad digestiva de proteínas tóxicas que, análogamente, producen alteración del mesenterio en *C. quinquefasciatus*.

Por consiguiente, el efecto larvívica por ingesta de FP3 desde las 24 h, y en menor intensidad de FP1 y FP2 pasadas las 36 h (Figuras 3, 4), podría ser consecuencia de los daños en el aparato intestinal que se reflejan en la respuesta larvívica retardada. Mientras la alteración de la matriz peritrófica no haya sido evidenciada ultraestructuralmente en *C. quinquefasciatus*, es previsible que ocurra una respuesta enterotóxica muy semejante, tal como Parthiban *et al.* (2020b) lo plantearon en larvas de *A. aegypti*.

Conclusión

El extracto etanólico y de alcaloides y las fracciones proteicas de las semillas de *A. muricata* produjeron mortalidad en las larvas de *C. quinquefasciatus*. La letalidad del extracto etanólico fue inmediata y total hasta la mitad del tiempo del bioensayo, en contraste con el extracto de alcaloides y las fracciones proteicas, cuya toxicidad fue parcial y progresiva, extendiéndose al máximo tiempo de evaluación. La respuesta inmediata producida por el extracto etanólico puede explicarse por el efecto aditivo de contacto y digestivo de la bioactividad del amplio espectro de metabolitos, comparado con la sola acción digestiva del extracto de alcaloides y las fracciones proteicas de respuesta mediata.

Contribución de los autores

BM: concepción y diseño del proyecto, desarrollo de la parte experimental en el laboratorio, revisión de la literatura y escritura del manuscrito. JRL: monitoreo del desarrollo del proyecto, extracciones etanólicas, aislamiento de alcaloides. ECh: trabajo de campo relacionado con las larvas, aplicación de tratamientos. MB: planteamiento del diseño experimental, cálculos estadísticos, escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses, ni haber obtenido apoyo financiero para la realización del trabajo o la publicación del manuscrito de ninguna institución pública o privada.

Referencias

- Abbott, W. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18(2), 265-267. <https://doi.org/10.1093/jee/18.2.265a>
- Aguilar-Hernández, G., Vivar-Vera, M. D. L. Á., García-Magaña, M. D. L., González-Silva, N., Pérez-Larios, A., Montalvo-González, E. (2020). Ultrasound-Assisted extraction of total acetogenins from the soursop fruit by response surface methodology. *Molecules*, 25(5), 1139. <https://doi.org/10.3390/molecules25051139>
- Ahmad, A., Khan, G. Z., Ullah, M., Ahmed, N., Sohail, K., Ullah, I., Bukhari, N. A., Perveen, K., Ali, I., Li, K. (2023). Evaluation of different high doses aqueous plant extracts for the sustainable control of *Aedes aegypti* mosquitoes under laboratory conditions. *Journal of King Saud University - Science*, 35(11), 102991. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102991>

- Alegre, A., Iannacone, J., Carhuapoma, M.** (2017). Toxicidad del extracto acuoso, etanólico y hexánico de *Annona muricata*, *Minthostachys mollis*, *Lupinus mutabilis* y *Chenopodium quinoa* sobre *Tetranychus urticae* y *Chrysoperla externa*. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Science, exAgro-Ciencia*, 33(3), 273-284. <https://doi.org/10.4067/S0719-38902017005000705>.
- Alvarado, A., Capristán, P., Corahua, C., Ruiz, C., Velásquez, G.** (2020). Variación del área agrícola en el distrito La Yarada Los Palos, Tacna, Perú. *Espacio y Desarrollo*, 31(35), 99-120. <https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.202001.004>
- Ardila, D.** (2014). Evaluación de la actividad citotóxica de los extractos etanólicos de las plantas *Annona muricata*, *Annona cherimola* y *Physalis peruviana* en la línea celular MCF-7 de adenocarcinoma de seno. [Tesis], Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana.
- Al Kazman, B. S. M., Harnett, J. E., Hanrahan, J. R.** (2022). Traditional Uses, Phytochemistry and Pharmacological Activities of Annonaceae. *Molecules*, 27(11), 3462. <https://doi.org/10.3390/molecules27113462>
- Al-Mehmadi, R. M. & Al-Khalaf, A. A.** (2010). Larvicidal and histological effects of *Melia azedarach* extract on *Culex quinquefasciatus* Say larvae (Diptera: Culicidae). *Journal of King Saud University - Science*, 22(2), 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2010.02.004>
- Aparna, N., Parambil, R. P., George, N., Meethal, K. V.** (2021). Toxicity of plant extracts containing trypsin inhibitor to the larvae of *Aedes aegypti*. *International Journal of Mosquito Research*, 8(3), 22-27. <https://doi.org/10.22271/23487941.2021.v8.i3a.533>
- Ayana-Gayathri, R. V. & Evans, D. A.** (2018). *Culex quinquefasciatus* Say larva adapts to temperature shock through changes in protein turn over and amino acid catabolism. *Journal of Thermal Biology*, 74, 149-159. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.03.016>
- Ayilara, M. S., Adeleke, B. S., Akinola, S. A., Fayose, C. A., Adeyemi, U. T., Gbadegesin, L. A., Omole, R. K., Johnson, R. M., Uthman, Q. O., Babalola, O. O.** (2023). Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1040901. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1040901>
- Bhandari, P., Pant, M., Patanjali, P. K., Raza, S. K.** (2016). Advances in Bio-Botanicals Formulations with Incorporation of Nanotechnology in Intensive Crop Management. En R. Prasad (Ed.), *Advances and Applications Through Fungal Nanobiotechnology* (pp. 291-305). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42990-8_14
- Bobadilla-Álvarez, M., Zavaleta-Espejo, G., Gil-Franco, F., Pollack-Velásquez, L., Sisniegas-González, M.** (2002). Efecto bioinsecticida del extracto etanólico de las semillas de *Annona cherimolia* Miller “chirimoya” Y *A. muricata* Linnaeus “guanábana” sobre larvas del IV estadio de *Anopheles* sp. *Revista Peruana de Biología*, 9(2), 64-73. <https://doi.org/10.15381/rpb.v9i2.2525>
- Bobadilla, M., Zavala, F., Sisniegas, M., Zavaleta, G., Mostacero, J., Taramona, L.** (2005). Evaluación larvica de suspensiones acuosas de *Annona muricata* Linnaeus «guanábana» sobre *Aedes aegypti* Linnaeus (Diptera, Culicidae). *Revista Peruana de Biología*, 12(1), 145-152. <https://doi.org/10.15381/rpb.v12i1.2369>
- Brandão-Costa, R.M.P., Araújo, V.F., Porto, A.L.F.** (2018). CgTI, a novel thermostable Kunitz trypsin-inhibitor purified from *Cassia grandis* seeds: Purification, characterization and termiticidal activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118(Pt B), 2296-306. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.110>
- Brousett-Minaya, M.A., Baldasso, P.A., Marangoni, S.** (2013). Biochemical and Pharmacological Characterization of TLBbar, a New Serine Protease with Coagulant Activity from *Bothrops barnetti* Snake Venom. *Journal of Toxins*. 2013, 1-11, <https://doi.org/10.1155/2013/207170>
- Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades (CDC).** (2024). *Boletín Epidemiológico del Perú*. Ministerio de Salud. https://www.dge.gob.pe/epipublic/uploads/boletin/boletin_202422_08_080424.pdf
- Chino, M.** (2019). Identificación y evaluación de impactos ambientales por afluencia turística en la playa Los Palos – Tacna. [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental], Facultad de Ingeniería. Universidad Privada de Tacna.
- Consoli, R.A. & Oliveira, R.L.** (1994). *Principais mosquitos de importância sanitária no Brasil*. Fiocruz.
- Costa, M. D. S., De Paula, S. O., Martins, G. F., Zanuncio, J. C., Santana, A. E. G., Serrão, J. E.** (2018). Modes of action of squamocin in the anal papillae of *Aedes aegypti* larvae. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 101, 172-177. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2017.04.001>

- Coy, C., Parra, J., Cuca, L. (2014). Caracterización química del aceite esencial e identificación preliminar de metabolitos secundarios en hojas de la especie *Raputia heptaphylla* (Rutaceae). *Revista Elementos*, 4(4), 32-39. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/207170>
- Dang, L. & Van Damme, E. J. M. (2015). Toxic proteins in plants. *Phytochemistry*, 117, 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2015.05.020>
- Dantzer, M., Vasconcelos, I. M., Scorsato, V., Aparicio, R., Marangoni, S., Macedo, M. L. R. (2015). Bowman-Birk proteinase inhibitor from *Clitoria fairchildiana* seeds: Isolation, biochemical properties and insecticidal potential. *Phytochemistry*, 118, 224-235. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2015.08.013>
- Durán-Ruiz, C. A., González-Esquinca, A. R., de-la-Cruz-Chacón, I. (2024). *Annonaceous acetogenins*: A comparative analysis of insecticidal activity. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 46, e-508. <https://doi.org/10.1590/0100-29452024508>
- Figuroa, D. P., Scott, S., González, C. R., Bizama, G., Flores-Mara, R., Bustamante, R., Canals, M. (2020). Estimating the climate change consequences on the potential distribution of *Culex pipiens* L. 1758, to assess the risk of West Nile virus establishment in Chile. *Gayana (Concepción)*, 84 (1), 46-53. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382020000100046>
- Fisher, M. F., Zhang, J., Berkowitz, O., Whelan, J., Mylne, J. S. (2019). Novel Cyclic Peptides in Seed of *Annona muricata* are Ribosomally Synthesized. *Journal of Natural Products*, 83(4), 1167-1173 <https://doi.org/10.1101/647552>
- Fong, C. R., Bittick, S. J., Fong, P. (2018). Simultaneous synergist, antagonistic and additive interactions between multiple local stressors all degrade algal turf communities on coral reefs. *Journal of Ecology*, 106(4), 1390-1400. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12914>
- Friedman, M. (2004). Applications of the Ninhydrin Reaction for Analysis of Amino Acids, Peptides, and Proteins to Agricultural and Biomedical Sciences. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(3), 385-406. <https://doi.org/10.1021/jf030490p>
- Grossman, MK., Oliver, SV., Brooke, BD., Thomas, MB. (2020). Use of alternative bioassays to explore the impact of pyrethroid resistance on LLIN efficacy. *Parasites Vectors*, 13(1),179. <https://doi.org/10.1186/s13071-020-04055-9>.
- Ha, T. V., Kim, W., Nguyen-Tien, T., Lindahl, J., Nguyen-Viet, H., Thi, N. Q., Nguyen, H. V., Unger, F., Lee, H. S. (2021). Spatial distribution of *Culex mosquito* abundance and associated risk factors in Hanoi, Vietnam. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 15(6), e0009497. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0009497>
- Harte, S. J., Bray, D. P., Nash-Woolley, V., Stevenson, P. C., Fernández-Grandon, G. M. (2024). Antagonistic and additive effect when combining biopesticides against the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Scientific Reports*, 14(1), 6029. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56599-w>
- Heng, M. Y., Tan, S. N., Yong, J. W. H., Ong, E. S. (2013). Emerging green technologies for the chemical standardization of botanicals and herbal preparations. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 50, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.03.012>
- Hothorn LA. (2014). Statistical evaluation of toxicological bioassays – a review. *Toxicol Research*, 3(6), 418-32. <https://doi.org/10.1039/c4tx00047a>.
- Instituto Nacional de Salud. (2024). *Rotación de insecticidas para el control de Aedes aegypti*. Ministerio de Salud. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6028979/5338114-revision-rapida-n-01-2024-rotacion-de-insecticidas-y-aedes-aegypti%282%29.pdf>
- Instituto Nacional de Salud. (1999). *Registro y control de calidad de recursos y productos naturales de uso en salud*. Vol. 1. Ministerio de Salud. Lima. <https://repositorio.ins.gob.pe/handle/20.500.14196/169>.
- Iranshahy, M., Quinn, R. J., Iranshahi, M. (2014). Biologically active isoquinoline alkaloids with drug-like properties from the genus *Corydalis*. *RSC Advances*, 4(31), 15900. <https://doi.org/10.1039/C3RA47944G>
- Karunaratne, P., Pocquet, N., Labbé, P., Milesi, P. (2022). BioRssay: An R package for analyses of bioassays and probit graphs. *Parasites & Vectors*, 15(1), 35.
- Kassambara, A. (2023). *rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests (R package version 0.7.2)*. <https://CRAN.R-project.org/package=rstatix>.
- Kauffman, E., Payne, A., Franke, M., Schmid, M., Harris, E., Kramer, L. (2017). Rearing of *Culex* spp. and *Aedes* spp. Mosquitoes. *Bio Protocol*, 7(17), e2542. <https://doi.org/10.21769/BioProtoc.2542>
- Kocuyigit, E., Kocaadam-Bozkurt, B., Bozkurt, O., Ağagündüz, D., Capasso, R. (2023). Plant Toxic Proteins: Their Biological Activities, Mechanism of Action and Removal Strategies. *Toxins*, 15(6), 356. <https://doi.org/10.3390/toxins15060356>

- Lagarda-Díaz, I., Guzmán-Partida, A., Vázquez-Moreno, L.** (2017). Legume Lectins: Proteins with Diverse Applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(6), 1242. <https://doi.org/10.3390/ijms18061242>
- Mansour, S. A., Bakr, R. F., Hamouda, L. S.** (2010). Toxic and Synergistic Properties of Several Botanical Extracts against Larval and Adult Stages of the Mosquito, *Anopheles pharoensis*. *Biopesticides International*, 6(2), 129-145.
- Moghadamtousi, S., Fadaeinasab, M., Nikzad, S., Mohan, G., Ali, H., Kadir, H.** (2015). *Annona muricata* (Annonaceae): A Review of Its Traditional Uses, Isolated Acetogenins and Biological Activities. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(7), 15625-15658. <https://doi.org/10.3390/ijms160715625>
- Monsour, S. A., Bakr, R. F., Mohamed, R. I., Hasaneen, N. M.** (2011). Larvicidal Activity of Some Botanical Extracts, Commercial Insecticides and their Binary Mixtures Against the Housefly, *Musca domestica* L. *The Open Toxinology Journal*, 4(1), 1-13. <https://doi.org/10.2174/1875414701104010001>
- Neglo, D., Tettey, C. O., Essuman, E. K., Amenu, J. D., Mills-Robertson, F. C., Sedohia, D., Boakye, A. A., Abaye, D. A.** (2021). Evaluation of the Modulatory Effect of *Annona muricata* Extracts on the Activity of Some Selected Antibiotics against Biofilm-Forming MRSA. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/9342110>
- Ohba, S., Ohashi, K., Pujiyati, E., Higa, Y., Kawada, H., Mito, N., Takagi, M.** (2013). The Effect of Pyriproxyfen as a “Population Growth Regulator” against *Aedes albopictus* under Semi-Field Conditions. *PLoS ONE*, 8(7), e67045. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067045>
- Pant, M., Dubey, S., Patanjali, P. K.** (2016). Recent Advancements in Bio-botanical Pesticide Formulation Technology Development. En Vijay Veer & R. Gopalakrishnan (Eds.), *Herbal Insecticides, Repellents and Biomedicines: Effectiveness and Commercialization* (pp. 117-126). Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2704-5_7
- Parthiban, E., Arokiyaraj, C., Ramanibai, R.** (2020a). *Annona muricata*: An alternate mosquito control agent with special reference to inhibition of detoxifying enzymes in *Aedes aegypti*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 110050. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110050>
- Parthiban, E., Arokiyaraj, C., Janarthanan, S., Ramanibai, R.** (2020b). Purification, characterization of mosquito larvicidal lectin from *Annona muricata* and its eco-toxic effect on non-target organism. *Process Biochemistry*, 99, 357-366. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.09.025>
- Rajput, D., Patil, U. K., Chauhan, D. N., Shah, K., Chauhan, N. S.** (2023). Potentials of natural products in vector-borne diseases management: Current and future perspectives. En *Natural Products in Vector-Borne Disease Management* (pp. 1-25). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91942-5.00015-X>
- Reis, L. A. M., Silva, E. V. P. D., Dias, D. D., Freitas, M. N. O., Caldeira, R. D., Araújo, P. A. D. S., Silva, F. S. D., Rosa Junior, J. W., Brandão, R. C. F., Nascimento, B. L. S. D., Martins, L. C., Neto, J. P. N.** (2023). Vector Competence of *Culex quinquefasciatus* from Brazil for West Nile Virus. *Tropical Medicine and Infectious Disease*, 8(4), 217. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed8040217>
- Richards, S. L., Byrd, B. D., Reiskind, M. H., White, A. V.** (2020). Assessing Insecticide Resistance in Adult Mosquitoes: Perspectives on Current Methods. *Environmental Health Insights*, 14, 117863022095279. <https://doi.org/10.1177/1178630220952790>
- Riley-Saldaña, C. A., Cruz-Ortega, M. D. R., Martínez-Vázquez, M., De-la-Cruz-Chacón, I., Castro-Moreno, M., González-Esquince, A. R.** (2017). Acetogenins and alkaloids during the initial development of *Annona muricata* L. (Annonaceae). *Zeitschrift Für Naturforschung C*, 72(11-12), 497-506. <https://doi.org/10.1515/znc-2017-0060>
- Robertson, J.L.** (2017). *Bioassays with arthropods*. 3th. ed. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Rodrigues, A. M., Silva, A. A. S., Pinto, C. C. C., Santos, D. L. D., Freitas, J. C. C. D., Martins, V. E. P., Morais, S. M. D.** (2019). Larvicidal and Enzymatic Inhibition Effects of *Annona Muricata* Seed Extract and Main Constituent Annonacin against *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). *Pharmaceuticals*, 12(3), 112. <https://doi.org/10.3390/ph12030112>
- Seiber, J. N., Coats, J., Duke, S. O., Gross, A. D.** (2014). Biopesticides: State of the Art and Future Opportunities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(48), 11613-11619. <https://doi.org/10.1021/jf504252n>

- Shocket, M. S., Verwillow, A. B., Numazu, M. G., Slamani, H., Cohen, J. M., El Moustaid, F., Rohr, J., Johnson, L. R., Mordecai, E. A.** (2020). Transmission of West Nile and five other temperate mosquito-borne viruses peaks at temperatures between 23°C and 26°C. *eLife*, 9, e58511. <https://doi.org/10.7554/eLife.58511>
- Valencia, E., Mac, D., Cuyos, M., Dueñas, R.** (2005). Extracción, identificación y evaluación de saponinas. *Biotempo*, 5, 31-36. <https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Biotempo/article/download/889/805/1958>
- Vandenborre, G., Smagghe, G., Van Damme, E. J. M.** (2011). Plant lectins as defense proteins against phytophagous insects. *Phytochemistry*, 72(13), 1538-1550. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.02.024>
- Vander-Does, A., Labib, A., Yosipovitch, G.** (2022). Update on mosquito bite reaction: Itch and hypersensitivity, pathophysiology, prevention, and treatment. *Frontiers in Immunology*, 13, 1024559. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.1024559>
- World Health Organization (WHO).** (2014). *A global brief on vector-borne diseases*. World Health Organization. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/111008/WHO_DCO_WHD_2014.1_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- World Health Organization (WHO).** (2005). Guidelines for laboratory and field testing of mosquito larvicides. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/69101>
- Zamora-Natera, J.F., Bernal-Alcocer, A., Ruiz-López, M.** (2005). Perfil de Alcaloides de Semillas de *Lupinus exaltatus* Zucc. (Fabaceae) y la Evaluación Antifúngica del Extracto Alcaloideo y Lupanina contra Fitopatógenos. *Revista mexicana de fitopatología*, 23(2), 124-129.
- Zubaidi, S. N., Mohd Nani, H., Ahmad Kamal, M. S., Abdul Qayyum, T., Maarof, S., Afzan, A., Mohamad Misnan, N., Hamezah, H. S., Baharum, S. N., Mediani, A.** (2023). *Annona muricata*: Comprehensive Review on the Ethnomedicinal, Phytochemistry, and Pharmacological Aspects Focusing on Antidiabetic Properties. *Life*, 13(2), 353. <https://doi.org/10.3390/life13020353>

Artículo original

Astronomía en Colombia: una perspectiva bibliométrica

Astronomy in Colombia: a bibliometric perspective

Sofía Guevara-Montoya¹, Felipe Ortiz-Ferreira², María Paula Silva-Arévalo¹,
Paola A. Niño-Muñoz³, Jaime E. Forero-Romero^{3,4,*}

¹ Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

² Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

³ Departamento de Física, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

⁴ Observatorio Astronómico, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Resumen

En Colombia la investigación astronómica está experimentando un crecimiento acelerado. Para comprender mejor su evolución y estado actual, realizamos un estudio bibliométrico utilizando el Astrophysics Data System (ADS) y la Web of Science (WoS). En el ADS encontramos 422 publicaciones arbitradas desde 1980, año de la primera publicación, hasta 2023, año de corte del estudio. De las 25 instituciones colombianas con al menos una publicación, 14 son de origen privado y 11 son estatales. Más de la mitad de ellas se concentran en dos ciudades: Bogotá, con 11 instituciones, seguida por Medellín, con tres. Se destaca el número de contribuciones de cuatro universidades: la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad Industrial de Santander (UIS) y la Universidad de Antioquia (UdeA), con 104, 78, 68 y 67 publicaciones, respectivamente. Al cruzar la información del ADS y la WoS, encontramos que las áreas con las publicaciones de mayor impacto son tres: altas energías y física fundamental, estrellas y física estelar, y galaxias y cosmología. Según la WoS, Colombia se encuentra en el puesto 52 a nivel global en cantidad de publicaciones arbitradas entre 2019 y 2023, y en quinto lugar en América Latina. Además, encontramos tres publicaciones muy citadas (ubicadas en el 1% a nivel mundial) pertenecientes al área de cosmología observacional.

Palabras clave: Investigación astronómica; Análisis bibliométrico; Análisis de citas; Instituciones colombianas; *Rankings* globales.

Abstract

In Colombia, astronomical research is experiencing an accelerated growth. To better understand its evolution and current state, we conducted a bibliometric study by consulting the Astrophysics Data System (ADS) and the Web of Science (WoS). In the ADS, we identified 422 peer-reviewed publications from 1980, the year of the first publication, until 2023, the cut-off year of the study. Of the 25 Colombian institutions with at least one publication, 14 are private and 11 are state institutions. More than half of these institutions are concentrated in two cities: Bogotá with 11 institutions, followed by Medellín with three institutions. The number of contributions from four universities stands out: Universidad de los Andes, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Industrial de Santander, and Universidad de Antioquia with 104, 78, 68, and 67 publications, respectively. By cross-referencing the information from the ADS and the WoS, we found three areas with publications of the highest impact: high energies and fundamental physics, stars and stellar physics, and galaxies and cosmology. According to the WoS, at the global level, Colombia ranks 52nd in the number of peer-reviewed publications between 2019 and 2023 and fifth in Latin America. Additionally, we identified three highly cited publications (top 1% worldwide) belonging to the field of observational cosmology.

Keywords: Astronomical research; Bibliometric analysis; Citation analysis; Colombian institutions; Global rankings.

Citación: Guevara-Montoya S, *et al.* Astronomía en Colombia: una perspectiva bibliométrica. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):638-657, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2589>

Editor: Santiago Vargas Domínguez

***Correspondencia:**

Jaime E. Forero-Romero;
je.forero@uniandes.edu.co

Recibido: 5 de marzo de 2024

Aceptado: 9 de julio de 2024

Publicado en línea: 12 de agosto de 2024



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

Introducción

La astronomía tiene un papel protagónico en la investigación científica a nivel mundial, consolidado a lo largo de casi tres milenios como lo demuestran los primeros registros de observaciones astronómicas sistemáticas (Evans, 1998). Desde la revolución científica iniciada por Galileo en el siglo XVII (Koyre, 1943), la astronomía no solo nos proporciona una comprensión profunda del universo y sus complejidades, sino que también contribuye significativamente al desarrollo tecnológico, generando, por ejemplo, tecnologías para la creación de imágenes con diversas aplicaciones en agricultura, navegación y salud (Fabian, 2010). En el último siglo la astronomía ha impulsado la exploración espacial a través de misiones que recopilan datos cruciales y hacen descubrimientos sobre nuestro sistema solar y más allá (Iacomino, 2019). Hoy, el estudio de la evolución del universo, desde la formación de estrellas hasta la existencia de la materia oscura, pasando por la formación de sistemas planetarios, permite a los científicos explorar los aspectos más fundamentales de la realidad física (Mannheim, 2006).

En el siglo XX, la investigación astronómica experimentó una revolución con el desarrollo de tecnologías como el telescopio espacial y el uso de detectores más sensibles (Benn & Sánchez, 2001). El avance en la comprensión de la física cuántica y la teoría de la relatividad influyó significativamente en la interpretación de los datos astronómicos (Belenchia *et al.*, 2022). En el siglo XXI, la investigación astronómica ha entrado en la era de los *big data*, con telescopios avanzados que generan cantidades ingentes de información (Zhang & Zhao, 2015). El procesamiento computacional y el análisis de datos se han vuelto críticos, lo que ha exigido la convergencia de habilidades en astronomía y ciencias de la computación (Borne, 2010). Además, la cooperación global se ha intensificado aún más, con proyectos que involucran colaboraciones internacionales (Chang & Huang, 2013). Así pues, la astronomía no solo expande nuestro conocimiento del cosmos, sino que también cataliza avances tecnológicos, científicos, educativos y diplomáticos a escala global (Ribeiro *et al.*, 2013).

En ese contexto, las publicaciones arbitradas son cruciales en la investigación astronómica, pues son la principal vía para comunicar y validar los resultados científicos (Chen *et al.*, 2022). Estas revistas científicas, revisadas por pares, actúan como foros donde los astrónomos comparten sus descubrimientos, teorías y observaciones con la comunidad científica internacional. El proceso de revisión por pares asegura la calidad y la validez de la investigación antes de su publicación, contribuyendo a mantener altos estándares académicos (Kelly *et al.*, 2014).

¿Cuál es el grado de inserción de Colombia en estas tendencias globales de la investigación en astronomía? Aquí queremos empezar a dar respuesta a esta pregunta. Queremos dejar un registro histórico sobre la investigación astronómica en Colombia, entendida como la actividad científica que sigue los estándares establecidos en el siglo XX para la recolección de datos de interés astronómico (ya sean observados o simulados), además, hacer su análisis estadístico y una interpretación en términos de otras ciencias naturales en algunos casos para presentar sus principales procedimientos y conclusiones a través de publicaciones arbitradas (Mieg, 2022).

En cuanto a otros estudios similares ya publicados, que dan cuenta de la historia de la investigación astronómica recogida en publicaciones arbitradas, vale la pena mencionar tres precedentes de autores afiliados al Observatorio Astronómico Nacional (OAN) en Bogotá.

El primero, de 1993, corresponde al libro del historiador Jorge Arias de Greiff *La Astronomía en Colombia*, el cual ofrece una revisión histórica de la actividad astronómica en el territorio hoy conocido como Colombia desde la época precolombina (Arias de Greiff, 1993). En él no se mencionan, sin embargo, todas las actividades que permitieron la creación de las publicaciones arbitradas de la época. Solamente se dedican tres páginas a comentarios generales sobre las actividades del OAN entre 1985 y 1992, sin incluir los avances que ya se registraban en la Universidad de los Andes (Uniandes).

El segundo momento corresponde a 2006, cuando el astrónomo William E. Cepeda-Peña presentó una contribución al simposio Astronomy for the Developing World (Cepeda-Peña, 2006), en la que ofrecía una visión de la investigación en astronomía en Colombia que, nuevamente, se limitaba a presentar las actividades del Observatorio Astronómico Nacional (OAN), sin aludir a las actividades y publicaciones que ya existían en otras cuatro instituciones.

El astrónomo Mario A. Higuera-Garzón es el autor de la contribución más reciente, de 2016, presentada durante la XV Reunión Regional Latinoamericana de la Unión Astronómica Internacional (LARIM) en Cartagena, Colombia, en la cual abordó el estado de la astronomía en el país (Higuera-Garzón, 2017). Allí se ofrece un repaso del papel histórico del Observatorio Astronómico Nacional (OAN), seguido de una lista de grupos asociados a universidades que se dedican a la investigación, la enseñanza y la divulgación de la astronomía, mencionando de manera general la labor del OAN, de Uniandes, la UdeA y la UIS. A pesar de ofrecer una visión más amplia, el panorama presentado sigue siendo incompleto. Como veremos más adelante, para ese entonces ya existían por lo menos otras diez instituciones con publicaciones arbitradas en el campo de la astronomía.

Actualmente, entonces, todavía hace falta una visión integral que permita evaluar el alcance y el impacto de las investigaciones astronómicas realizadas en el país que pueden considerarse aportes a la comunidad internacional. En dicho contexto, nos propusimos dar un primer paso en esa dirección analizando aquellas publicaciones arbitradas en el ámbito de la astronomía que cuentan con participación de instituciones colombianas. Las publicaciones arbitradas, además de ser fundamentales para la difusión del conocimiento y la construcción del corpus científico en astronomía, permiten evaluar la reputación de un grupo o comunidad astronómica y su impacto en el quehacer científico global, destacando la importancia de este tipo de estudios en la carrera y el reconocimiento profesional en el campo de la investigación astronómica (Cortés *et al.*, 2018; Crabtree, 2014; Wang *et al.*, 2020).

Las cifras y estadísticas que aquí presentamos, además de haberse obtenido con una metodología que reduce los sesgos de anteriores reportes sobre la investigación astronómica en Colombia, nos permitieron comparar su estatus con el de otros países del mundo. En ese marco hicimos un análisis bibliométrico con el propósito de modelar la producción científica nacional en astronomía. En primer lugar abordamos la importancia y las ventajas de los diferentes criterios utilizados: cantidad de autores, citas, publicaciones, temáticas principales y selección de países para la comparación, y luego describimos las búsquedas de información en las bases de datos escogidas (Astrophysics Data System y Web of Science). Los resultados los presentamos en varias secciones: número de publicaciones, número de citas, publicaciones más citadas a nivel nacional, relación entre el número de citas y el número de autores, y posición de Colombia en el contexto mundial. Por último, concluimos y ofrecemos la perspectiva futura.

Aspectos principales de nuestro análisis bibliométrico

Énfasis en publicaciones arbitradas

Nos enfocamos en el análisis del número de publicaciones arbitradas y de citas, excluyendo consideraciones relacionadas directamente con la enseñanza o la divulgación, a menos que derivaran en publicaciones arbitradas. Por ejemplo, *The Educational and Influential Power of the Sun* (Cárdenas-Avenidaño *et al.*, 2019) es una publicación en el área de la educación y la divulgación que fue arbitrada, por lo que la incluimos en nuestro estudio, pero no tuvimos en cuenta aspectos como la organización de eventos, los trabajos de pregrado y posgrado, o cualquier otro tipo de publicación no arbitrada.

La razón de este enfoque es que los artículos arbitrados son ampliamente reconocidos como el principal resultado del proceso de creación de conocimiento científico. Otra importante motivación es que las publicaciones arbitradas reportan datos consolidados y reconocidos, lo que nos permitió reducir sesgos. En contraste, no existen bases de datos

homogeneizadas a nivel nacional e internacional para los aspectos relacionados con la enseñanza, en tanto que, a menudo, la divulgación científica no cuenta con un registro escrito unificado que pueda consultarse.

Para evitar ambigüedades en el análisis, decidimos utilizar dos plataformas de gran reconocimiento: el Astrophysics Data System (ADS) y la Web of Science (WoS), el primero principalmente para mediciones históricas de la investigación en Colombia, y la segunda, con el fin de hacer comparaciones con otros países del mundo.

Citaciones como índice de impacto

Utilizamos las citas como medida del impacto de las publicaciones de una comunidad científica. Esto tiene varias ventajas. En primer lugar, las citas ofrecen una forma objetiva de evaluar la influencia y la relevancia de un artículo en el campo científico, ya que reflejan el reconocimiento y la validación por parte de otros investigadores. Además, al analizar las citas a lo largo del tiempo, es posible evidenciar la evolución del impacto de un trabajo o área y su contribución continua al avance del conocimiento en un área determinada (Pearce, 2004). Ello permite determinar las publicaciones más influyentes y destacadas en el área de la astronomía, así como dar cuenta de los campos de mayor productividad e impacto dentro de las principales universidades del país.

Sin embargo, deben tenerse en cuenta las limitaciones de la medición del impacto a través de las citas. Por ejemplo, las citas pueden verse influenciadas por factores externos como el prestigio del autor o la revista donde se publicó el artículo, lo que distorsiona la percepción real del impacto de un trabajo (Castillo *et al.*, 2007). Además, el tiempo en que se mantienen las citas varía entre publicaciones, lo que dificulta su comparación.

Asimismo, utilizamos el índice-h, o índice de Hirsch (Hirsch, 2005), para abordar algunas de las limitaciones de las citas individuales tomando en cuenta aquellas recibidas por varias publicaciones en periodos extensos. Este índice se define como el número de artículos dentro de un conjunto que han sido citados al menos h veces cada uno. Si un conjunto de publicaciones tiene un índice-h de 10, significa que tiene como mínimo diez artículos que han sido citados al menos diez veces cada uno.

Por último, como medida del impacto de la investigación astronómica con participación colombiana en el contexto internacional, se utilizó el concepto de artículo altamente citado de WoS. Un artículo altamente citado es aquel que se encuentra en el 1% superior de los artículos con mayor número de citas a nivel mundial en el año de su publicación.

Sería sumamente enriquecedor para la comunidad que en futuros estudios se incluyera un análisis de las instituciones y países con los que más colabora Colombia y las palabras clave o palabras más comunes utilizadas en los resúmenes y los títulos de las publicaciones, con el fin de hacer un análisis de las redes bibliométricas más complejo.

Número de autores

Otro aspecto importante es el número de autores, pues permite estudiar la importancia de las colaboraciones en el desarrollo de artículos científicos, así como determinar las redes científicas que operan en Colombia y evaluar el impacto de las contribuciones individuales y colectivas.

Aunque el número de autores no determina la calidad del artículo, cuando este es elevado, el artículo tiende a tener mayor circulación, lo que incrementa su número de citas y su visibilidad (Tahamtan *et al.*, 2016). Por ello también cuantificamos el número de autores en las publicaciones para estimar hasta qué punto se correlacionaba con un mayor número de citas.

Temáticas

Las temáticas son un factor crucial al analizar los artículos, ya que representan los principales temas de trabajo en el país y en cada institución. Aquí nos enfrentamos a un reto, ya que el manejo de grandes bases de datos dificulta la determinación del tema

principal de cada artículo. Por esta razón, solamente clasificamos los de mayor impacto a partir de la clasificación de las nueve divisiones de trabajo establecidas por la Unión Astronómica Internacional (UAI):

- División A: Astronomía fundamental
- División B: Instalaciones, tecnologías y ciencia de datos
- División C: Educación, divulgación y patrimonio
- División D: Fenómenos de altas energías y Física fundamental
- División E: Sol y heliosfera
- División F: Sistemas planetarios y Astrobiología
- División G: Estrellas y Física estelar
- División H: Materia interestelar y universo local
- División J: Galaxias y Cosmología

En ese marco, pudimos determinar las áreas de investigación de las publicaciones más influyentes en nuestro país para así revisar las fortalezas en diferentes campos de estudio, y establecer los temas de menor interés y los problemas que no permiten su desarrollo al mismo nivel.

Selección de países para las comparaciones

Nos interesaba comparar la actividad astronómica colombiana con la de otros países del mundo. Para ello, comparamos el número total de publicaciones durante cinco años, del 2019 al 2023, utilizando los datos de WoS. Los países incluidos en nuestra comparación se dividen en dos grupos: el primero comprende aquellos con un número igual o mayor de publicaciones que Colombia, y el segundo está conformado por países de América Latina y el Caribe con al menos una publicación. Esto nos permitió compararnos con naciones que comparten similitudes lingüísticas, culturales e históricas, así como desafíos comunes en el desarrollo científico y tecnológico.

Bases de datos

Utilizamos dos bases de datos: el Astrophysics Data System (ADS) y la Web of Science (WoS). El ADS es un sistema de búsqueda y recuperación de información académica en el campo de la astronomía y la astrofísica ampliamente utilizado en la comunidad astronómica. Es una herramienta valiosa para la investigación y el acceso a la información en este campo. La plataforma es mantenida por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de los Estados Unidos y su interfaz web es de acceso público.

Web of Science (WoS) es una plataforma en línea que proporciona acceso a una amplia gama de recursos académicos y científicos. Desarrollada por Clarivate Analytics, es conocida por ser una de las bases de datos más completas y respetadas para la investigación científica y académica. El acceso completo a sus recursos requiere una suscripción paga.

En las dos bases de datos utilizamos la clasificación temática interna más cercana a la astronomía. En el caso de ADS, los artículos pueden recibir cuatro clasificaciones según la temática: Astronomía, Física, Ciencias de la Tierra y General. En la WoS, la clasificación abarca diez macrotemas; en ese marco la Astronomía y la Astrofísica constituyen un mesotema específico bajo el macrotema de Física. Otros mesotemas relacionados son, por ejemplo, Partículas y Campos, Ciencias Meteorológicas y Atmosféricas, y Ciencias Espaciales.

Para concentrarnos en la productividad de la investigación reconocida plenamente como astronomía, incluimos únicamente las publicaciones que se clasifican exclusivamente en el área “Astronomy” en el ADS o “Astronomy & Astrophysics” en la WoS. Con ello excluimos publicaciones relativas a la física de partículas, la teoría de campos y la gravitación. Además, en el caso del ADS, seleccionamos explícitamente registros de publicaciones arbitradas para evitar la inclusión de las no revisadas por pares en el repositorio arXiv, las cuales ya se encuentran excluidas de los resultados de la WoS.

Los resultados provenientes del ADS los utilizamos solamente para obtener estadísticas sobre Colombia, pero no sobre el resto de los países. La gran ventaja del ADS frente a la WoS es que incluye artículos desde 1800, lo cual nos sirve para trazar una historia desde las primeras épocas de las publicaciones arbitradas.

Astrophysics Data System

En la página del ADS hicimos una búsqueda de todos los artículos en los que la afiliación de los autores contenía la palabra “Colombia”. A diferencia de la WoS, el ADS no indexa las publicaciones con el país de origen de las instituciones asociadas a los autores. Por lo tanto, nos vimos obligados a utilizar la palabra “Colombia” en la búsqueda, lo que conlleva el riesgo de encontrar publicaciones que no están directamente relacionadas con el país, sino que simplemente incluyen una institución con la palabra “Colombia”. Para mitigar este riesgo, intentamos eliminar las combinaciones de palabras que podrían generar confusiones, como “Colombia Astrophysics Laboratory”, “British Colombia” o “Av. Gran Colombia”. Los resultados de esta búsqueda están disponibles en la siguiente página web del ADS: <https://ui.adsabs.harvard.edu/public-libraries/H5bjkAIXSYaZcO4qGcKxOw>.

Además, hicimos cuatro búsquedas adicionales para filtrar datos de las cuatro instituciones que más publican en el país; según la clasificación del ADS estas son la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad Industrial de Santander y la Universidad de Antioquia.

Otros resultados obtenidos del ADS incluyeron las citaciones por cada artículo, el número de autores para cada artículo, y el cálculo del índice-h para grupos de artículos. Las cifras provenientes del ADS correspondían a marzo del 2024.

Web of Science

En la Web of Science (WoS) buscamos en las “Web of Science Categories” todas las entradas bibliográficas clasificadas como “Astronomy & Astrophysics”. Luego, en la categoría “Citation Topics Meso” nos enfocamos exclusivamente en las entradas clasificadas bajo “5.20 Astronomy and Astrophysics” hasta el año 2023. Por último, seleccionamos los artículos que la WoS indexa como asociados a Colombia. Para asegurarnos de tener un conjunto de datos representativo de la actividad reciente, creamos otro conjunto en el que restringimos las publicaciones al periodo de 2019 a 2023, inclusive.

Es importante destacar que los datos que utilizamos corresponden a una consulta realizada en enero de 2024, cuando la WoS aún incluía publicaciones desde el año 1900. Sin embargo, la versión actual de la WoS (posterior al 4 de febrero de 2024) solamente considera publicaciones en esta área realizadas desde 1988 hasta la fecha.

A partir de los resultados obtenidos en la WoS, utilizamos los siguientes datos calculados dentro de la misma base de datos: la evolución temporal de las publicaciones y las citaciones de trabajos realizados en Colombia; el número de citaciones de las publicaciones más citadas de las principales universidades de Colombia mencionadas; el número total de publicaciones y las altamente citadas para los países de referencia en el periodo de cinco años (2019-2023).

Resultados

Número de publicaciones

En el ADS encontramos 422 publicaciones arbitradas relacionadas con Colombia. La **tabla 1** presenta información detallada sobre las 25 instituciones que identificamos en al menos una de las publicaciones. En la tabla se muestran el índice-h, el número total de publicaciones, el número total de citas para cada institución y el año de la primera publicación de cada institución. Se destacaron cuatro instituciones con la mayor cantidad de artículos: la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad Industrial de Santander y la Universidad de Antioquia, con 104, 78, 68 y 67 artículos, respectivamente.

Tabla 1. Instituciones colombianas que participan en artículos de astronomía según la selección hecha en el ADS.

Rango	Universidad	Índice-h	Número de publicaciones	Número de citaciones	Año inicial
1	Universidad de los Andes	26	104	2617	1980
2	Universidad Nacional de Colombia	20	78	1010	1980
3	Universidad Industrial de Santander	19	68	4734	2006
4	Universidad de Antioquia	18	67	1387	2010
5	Universidad de Medellín	13	19	534	2010
6	Universidad del Valle	7	15	117	2012
7	Universidad de Nariño	6	10	137	2015
8	Universidad Tecnológica de Bolívar	5	10	144	2011
9	Fundación Universitaria Konrad Lorenz	5	7	387	2016
10	Universidad Tecnológica de Pereira	4	13	62	1997
11	Universidad ECCI	4	8	50	2017
12	Universidad de los Llanos	4	8	38	2017
13	Centro Internacional de Física	4	7	48	1995
14	Universidad Antonio Nariño	4	5	126	2006
15	Universidad Distrital Francisco José de Caldas	2	5	23	2012
16	Universidad Sergio Arboleda	2	3	46	2010
17	Universidad Militar Nueva Granada	2	3	28	2017
18	Universidad del Atlántico	1	5	6	1997
19	Pontificia Universidad Javeriana	1	3	5	2018
20	Universidad EAN	1	2	2	2023
21	Universidad El Bosque	1	1	152	2023
22	Universidad EAFIT	1	1	8	2019
23	Universidad de Córdoba	1	1	2	2022
24	Corporación Universitaria Autónoma del Cauca	1	1	1	2019
25	Universidad Mariana	0	1	0	2023

En la **tabla 1** es posible ver que para la fecha de la publicación del libro *La astronomía en Colombia* (Arias de Greiff, 1993), ya había dos universidades con publicaciones arbitradas en el área de astronomía. En el 2005, año de la celebración del simposio Astronomy for the developing world (Cepeda-Peña, 2006), eran cinco las instituciones que contaban con publicaciones, en tanto que en el 2016, año que sesionó la XV LARIM con el tema Astronomy in Colombia (Higuera-Garzón, 2017), eran 15 las universidades con participación en actividades de investigación registradas en publicaciones arbitradas.

Según el ADS, los primeros artículos se remontan a 1980. Uno de ellos, publicado en la Revista Colombiana de Física por José Granés, físico colombiano profesor del Departamento de Física de la Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia, aborda una comparación de los conceptos de espacio y tiempo en la física clásica y la relatividad especial. Este texto de carácter expositivo no ha recibido citaciones hasta la fecha (Granés, 1980).

El otro artículo, publicado en agosto de 1980, es de un astrónomo alemán y profesor del Departamento de Física de la Universidad de los Andes en Bogotá. Este artículo, que se encuentra en las *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, presenta un análisis de datos fotométricos de la estrella cefeida AH Velorum y sugiere que se trata en realidad de una binaria que tiene una compañera. Este texto investigativo ha recibido seis citas hasta la fecha (Gieren, 1980). Hasta donde sabemos, es Gieren la primera persona con un título de doctorado en dedicarse a la investigación astronómica en Colombia.

Un análisis de los temas y enfoques metodológicos abordados en estos dos artículos permite situar los inicios de la investigación astronómica contemporánea en Colombia a partir del trabajo precursor llevado a cabo por Gieren en el Departamento de Física de la Universidad de los Andes, en Bogotá.

La **figura 1** muestra el número acumulado de artículos publicados hasta un año determinado entre 1980 y 2023. Las dos líneas continuas representan los resultados del ADS y la WoS y las otras líneas corresponden a los resultados de las cuatro universidades con mayor producción.

Definimos tres fases de las publicaciones totales de Colombia a partir de los cambios reflejados en la gráfica. En la primera fase, que denominamos la fase pionera y abarca aproximadamente una década, desde 1980 hasta 1989, se superó apenas la primera decena de publicaciones a lo largo del periodo.

En la segunda fase, que abarca alrededor de dos décadas, desde 1990 hasta 2009, se publicaron 40 artículos, con una tasa promedio de alrededor de 20 artículos por década, lo que multiplicó por dos la tasa de publicaciones de la fase anterior. Durante estas dos primeras fases se observa una clara hegemonía de dos universidades en Bogotá: la Universidad Nacional en primer lugar y la Universidad de los Andes en segundo lugar. A estas dos décadas las denominamos la fase del desarrollo.

Entre el 2010 y el 2019 entramos en una tercera fase en la que se registraron cerca de 200 artículos nuevos, es decir, se multiplicó por diez la tasa de publicaciones por década en comparación con la fase anterior. Además, la hegemonía de Bogotá ya no lo fue del todo, al agregarse las principales universidades de Medellín y Bucaramanga: la Universidad de Antioquia y la Universidad Industrial de Santander. En esta década, la Universidad de los Andes se convierte en la institución con el mayor número de publicaciones en total. A esta década la denominamos fase de consolidación.

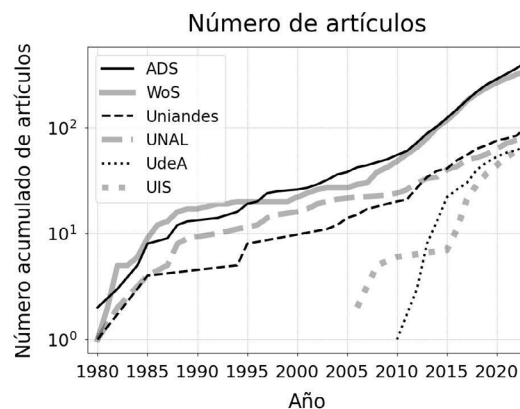


Figura 1. Número acumulado de artículos publicados en astronomía con participación de instituciones colombianas desde la primera publicación en 1980 hasta 2023, según los datos de las bases de datos ADS y WoS. Se observa una tendencia de crecimiento exponencial en las publicaciones a lo largo de estos años. Las instituciones con mayor número de publicaciones son la Universidad de los Andes (Uniandes), la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), la Universidad de Antioquia (UdeA) y la Universidad Industrial de Santander (UIS). Los cambios en la gráfica permiten establecer tres etapas diferentes: la fase pionera, de 1980 a 1989, la fase de desarrollo, de 1990 a 2009, y la fase de consolidación, de 2010 a 2019.

Por último, en el inicio de la nueva década, entre el 2020 y el 2023, se registraron cerca de 170 publicaciones nuevas, lo que permite inferir que hacia el 2029 se habrán publicado alrededor de 400 artículos nuevos, duplicándose la tasa de publicaciones de la década anterior.

Número de citaciones

En la **figura 2** se presenta el número de citaciones por año de los artículos publicados hasta la fecha indicada. Las dos líneas continuas muestran los resultados obtenidos en el ADS y la WoS, mientras que la línea puntuada representa el promedio de ambas fuentes, el cual nos permitió evidenciar una tendencia más robusta, ya que se tienen en cuenta los resultados en ambas bases de datos. Estos reflejan una historia similar a la observada en las diferentes fases separadas por décadas con base en el número de publicaciones.

Durante la primera década, de 1980 a 1989, la tasa de citaciones anuales apenas superó las 10 por año. En las siguientes dos décadas, de 1990 a 2009, se observa un incremento de aproximadamente 100 citaciones por año, aumento que continuó hasta la década de 2010 a 2019, cuando la tasa de citaciones creció casi diez veces, alcanzando cerca de 1.000 citaciones anuales.

Las 422 publicaciones colombianas en el ADS tuvieron en conjunto 10.946 citaciones, lo que corresponde a un promedio de 25 citaciones por artículo. Las citaciones acumuladas por las cuatro universidades líderes alcanzaron las 2.617 de Uniandes, las 1.010 de la UNAL, las 4.734 de la UIS y las 1.387 de la UdeA. Además, el índice-h de las publicaciones colombianas en su conjunto fue de 42, mientras que Uniandes, UNAL, UIS y UdeA tuvieron índices-h de 26, 20, 19 y 18, respectivamente.

Las publicaciones más citadas a nivel nacional

Para ampliar aún más el panorama de las publicaciones e instituciones con mayor impacto, establecimos los artículos con el mayor número de citaciones. Estas se calcularon a partir del promedio entre el ADS y la WoS, por lo que las publicaciones que consideramos en esta sección deben encontrarse en ambas bases de datos.

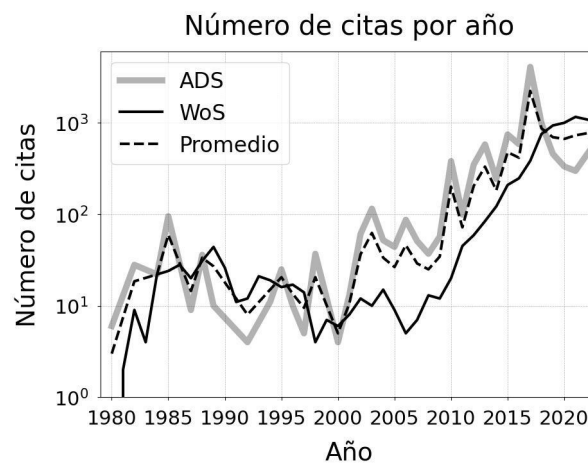


Figura 2. Número de citaciones recibidas por año de las publicaciones astronómicas con participación de instituciones colombianas desde 1980 hasta 2023, según los datos de las bases de datos ADS y WoS, así como su respectivo promedio. Se observa una tendencia creciente en el número de citas a lo largo del tiempo, con fluctuaciones más pronunciadas a partir de 2005, lo que sugiere un mayor impacto de las investigaciones colombianas en astronomía en los últimos años. Las citas anuales apenas superaban las diez citaciones por año en la fase pionera (1980-1989). Durante la fase de desarrollo (1990-2009) se incrementaron a 100 citaciones por año, aproximadamente, y, finalmente, hacia el cierre de la fase de consolidación (2010-2019), se alcanzaron cerca de 1.000 citaciones anuales.

La **tabla 2** resume la información relativa a los diez artículos más citados, que representan aproximadamente el 2% superior de las publicaciones con participación colombiana. Incluimos el título, el año de publicación, el número de citas, el número de autores, las universidades colombianas involucradas y la clasificación UAI.

A partir de esta tabla, podemos extraer varias observaciones interesantes:

- Tres áreas de conocimiento dominan: los fenómenos de altas energías y física fundamental, estrellas y física estelar, galaxias y cosmología.
- Cada una de estas tres áreas corresponde a tres universidades: la UIS para altas energías, la UdeA para física estelar y Uniandes para galaxias y cosmología.
- La UNAL, a pesar de tener un número relativamente alto de publicaciones, no logró posicionar ninguna de sus publicaciones entre las diez con más citas.
- Las publicaciones con participación de la UIS tuvieron muchos más coautores por artículo que las otras, lo cual se explica por su participación en el Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger.
- Los artículos más citados fueron publicados en la década de 2010 a 2019.

Para afinar el grupo de las publicaciones más citadas, listamos las cinco más citadas de cada una de las cuatro universidades líderes. La misma información de la **tabla 2** se proporciona para Uniandes, UNAL, UIS y UdeA en las **tablas 3, 4, 5 y 6**, respectivamente.

Los artículos más influyentes correspondientes a Uniandes se centran todos en el área de galaxias y cosmología y fueron publicados entre 2013 y 2018, durante la fase de consolidación (2010-2019). Estas publicaciones implican colaboraciones pequeñas, con un rango de 7 a 32 autores, y todas superan la centena de citas.

Tabla 2. Los diez artículos con más citas. La segunda columna corresponde al número de citas promedio entre el ADS y la WoS, la tercera al número de autores del artículo, la cuarta a las universidades colombianas con participación en el artículo referenciado y la última presenta la división correspondiente de la UAI.

Título y referencia	Citaciones	Autores	Universidades	División IAU
Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, Abbott et al. , 2017	2.468	3630	UIS	Fenómenos de altas energías y física fundamental
A Library of Theoretical Ultraviolet Spectra of Massive, Hot Stars for Evolutionary Synthesis, Leitherer et al. , 2010	253	8	UdeA	Estrellas y física estelar
Tracing the cosmic web, Libeskind et al. , 2018	171,5	30	Uniandes	Galaxias y cosmología
Binary Neutron Star Mergers: A Jet Engine for Short Gamma-Ray Bursts, Ruiz et al. , 2016	162	4	UIS	Fenómenos de altas energías y física fundamental
An Indication of Anisotropy in Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays through Comparison to the Flux Pattern of Extragalactic Gamma-Ray Sources, Aab et al. , 2018	161,5	392	UIS	Fenómenos de altas energías y física fundamental
The MultiDark Database: Release of the Bolshoi and Multi-Dark cosmological simulations, Riebe et al. , 2013	153,5	11	Uniandes	Galaxias y cosmología
Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory, Albert et al. , 2017	153,5	1941	UIS	Fenómenos de altas energías y física fundamental
(Almost) Dark Galaxies in the ALFALFA Survey: Isolated HI-bearing Ultra-diffuse Galaxies, Leisman et al. , 2017	151,5	12	Uniandes	Galaxias y cosmología
Probing the role of the galactic environment in the formation of stellar clusters, using M83 as a test bench, Adamo et al. , 2015	147	5	UdeA	Estrellas y física estelar
The velocity shear tensor: tracer of halo alignment, Libeskind et al. , 2013	113,5	7	Uniandes	Galaxias y cosmología

Tabla 3. Los cinco artículos con más citaciones (promedio entre ADS y WoS) con participación de la Universidad de los Andes

Título y referencia	Citaciones	Autores	División IAU
Tracing the cosmic web, Libeskind <i>et al.</i> , 2018	171,5	30	Galaxias y cosmología
The MultiDark Database: Release of the Bolshoi and MultiDark cosmological simulations, Riebe <i>et al.</i> , 2013	153,5	11	Galaxias y cosmología
(Almost) Dark Galaxies in the ALFALFA Survey: Isolated HI-bearing Ultra-diffuse Galaxies, Leisman <i>et al.</i> , 2017.	151,5	12	Galaxias y cosmología
The velocity shear tensor: tracer of halo alignment, Libeskind <i>et al.</i> , 2013	113,5	7	Galaxias y cosmología
The Large-scale Structure of the Halo of the Andromeda Galaxy. II. Hierarchical Structure in the Pan-Andromeda Archaeological Survey, McConnachie <i>et al.</i> , 2018.	109	32	Galaxias y cosmología

Tabla 4. Los cinco artículos con más citaciones (promedio entre ADS y WoS) con participación de la Universidad Nacional de Colombia

Título y referencia	Citaciones	Autores	División UAI
Spin Evolution of Accreting Young Stars. II. Effect of Accretion-powered Stellar Winds. Matt <i>et al.</i> , 2012	67	4	Estrellas y física estelar
Spin Evolution of Accreting Young Stars I. Effect of Magnetic Star-Disk Coupling, Matt <i>et al.</i> , 2010	63	4	Estrellas y física estelar
The Near-infrared Coronal Line Spectrum of 54 nearby Active Galactic Nuclei, Rodríguez-Ardila <i>et al.</i> , 2011	49	4	Galaxias y cosmología
Near-Infrared Coronal Lines in Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies, Rodríguez-Ardila <i>et al.</i> , 2002	41,5	4	Galaxias y cosmología
Dwarf spheroidal satellites of the Milky Way from dark matter free tidal dwarf galaxy progenitors: maps of orbits, Casas <i>et al.</i> , 2012	36,5	4	Galaxias y cosmología

En el caso de la UNAL, los artículos más influyentes abarcan dos temáticas: estrellas y física estelar y galaxias y cosmología. Los primeros cuatro artículos implican la participación del OAN, mientras que el último corresponde a participantes del Departamento de Física. Estas publicaciones se distribuyen en un período que abarca desde 2002 hasta 2012, cerca del final de las décadas de desarrollo. Se destaca que todas estas publicaciones corresponden a un grupo pequeño de colaboradores, con cuatro autores en cada caso, y ninguna supera las cien citaciones.

Resalta el hecho de que cuatro de las publicaciones de la UIS tienen un gran número de autores, casi dos órdenes de magnitud por encima de Uniandes y la UNAL. Todas las publicaciones se centran en el área de altas energías y física fundamental y se elaboraron entre el 2016 y el 2019, hacia el final de la década de consolidación. La mayoría de ellas supera la centena de citaciones en promedio, y es notable que la más citada tiene más de 2.000 citaciones y más de 3.500 autores.

Por último, en los artículos de la UdeA se observa que el tema dominante es estrellas y física estelar. Solo tres de estos artículos superan las 100 citaciones, y todos fueron publicados entre el 2010 y el 2015, en el inicio de la fase de consolidación. Se destaca que estas publicaciones corresponden a colaboraciones más pequeñas, con un rango de cuatro a 24 autores.

Tabla 5. Los cinco artículos con más citaciones (promedio entre ADS y WoS) con participación de la Universidad Industrial de Santander

Título y referencia	Citaciones	Autores	División UAI
Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, Abbott et al. , 2017	2468	3630	Fenómenos de altas energías y física fundamental
Binary Neutron Star Mergers A Jet Engine for Short Gamma-Ray Bursts, Ruiz et al. , 2016	162	4	Fenómenos de altas energías y física fundamental
An Indication of Anisotropy in Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays through comparison to the Flux Pattern of Extragalactic Gamma-Ray Sources, Aab et al. , 2018	161,5	392	Fenómenos de altas energías y física fundamental
Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory, Albert et al. , 2017	153,5	1941	Fenómenos de altas energías y física fundamental
Probing the origin of ultra-high-energy cosmic rays with neutrinos in the EeV energy range using the Pierre Auger Observatory, Aab et al. , 2019	87,5	391	Fenómenos de altas energías y física fundamental

Tabla 6. Los cinco artículos con más citaciones (promedio entre ADS y WoS) con participación de la Universidad de Antioquia.

Título y referencia	Citaciones	Autores	División UAI
A Library of Theoretical Ultraviolet Spectra of Massive, Hot Stars for Evolutionary Synthesis, Leitherer et al. , 2010	253	8	Estrellas y física estelar
Probing the role of the galactic environment in the formation of stellar clusters, using M83 as a test bench, Adamo et al. , 2015	147	5	Estrellas y física estelar
Studying the YMC population of M83: how long clusters remain embedded, their interaction with the ISM and implications for GC formation theories, Hollyhead et al. , 2015	108	7	Estrellas y física estelar
Galaxy Cluster Mass Reconstruction Project - II. Quantifying scatter and bias using contrasting mock catalogues, Old et al. , 2015	64,5	24	Galaxias y cosmología
No evidence for significant age spreads in young massive LMC clusters, Niederhofer et al. , 2015	64	4	Estrellas y física estelar

En un próximo trabajo sería de gran interés entender y cuantificar el aporte de los autores vinculados a instituciones colombianas, lo que requeriría un análisis más cuidadoso y detallado, puesto que no siempre el orden de los autores es indicativo de su aporte, ya que, a veces, la lista de autores está en orden alfabético, por ejemplo.

Relación entre el número de citaciones y el número de autores

Los resultados expuestos sugieren que existen dinámicas de trabajo que llevan a artículos firmados por un pequeño número de colaboradores que no supera la decena, en tanto que otros tipos de trabajos implican la colaboración de cientos o miles de personas.

Para cuantificar la influencia de los pequeños grupos y las grandes colaboraciones, revisamos el promedio del número de autores de las publicaciones. En la **figura 3** se muestra el promedio de autores entre 1980 y 2023. Es evidente que hasta el 2015, los artículos colombianos tenían un número promedio de autores cercano a la decena. Sin embargo, a partir del 2016, se observa una transición en la que el número promedio de autores aumenta drásticamente, llegando a la centena. Este cambio se debe, en gran medida, a los artículos del Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger con participación de la UIS y la Universidad de Medellín (UdeM).

En la **figura 4** se observa la influencia del tamaño de las colaboraciones (eje horizontal, histograma de la parte superior) en la tasa anual promedio de citas (eje vertical, histograma del lado derecho). En primer lugar, se ve que la mayoría de los artículos tienen cuatro o cinco autores. Los artículos con más de cinco autores muestran una incidencia

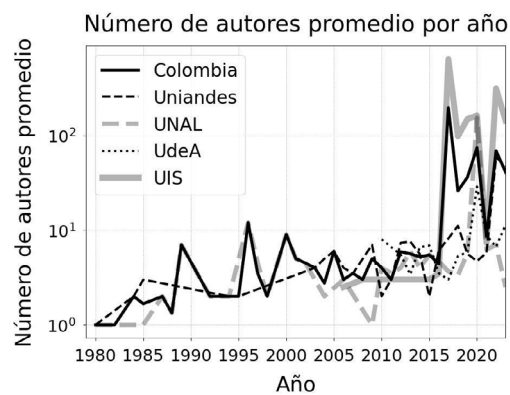


Figura 3. Promedio del número de autores por artículo en cada año. Se observa un aumento drástico de autores a partir del 2016 gracias a los artículos del Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger con participación de la UIS y la UdeM. Antes de eso el promedio de autores no superaba la decena.

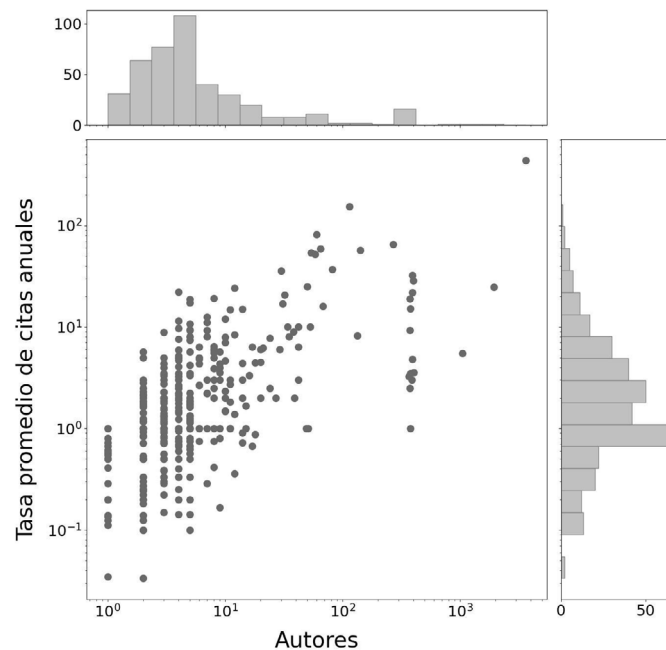


Figura 4. Tasa promedio de citas anuales como función del número total de autores para las publicaciones del ADS con al menos una citación. Estos datos presentan una correlación de Pearson de 0,78.

decreciente, excepto los artículos con entre 40 y 70 autores y, posteriormente, los artículos con entre 300 y 400 autores. Se observa, asimismo, que la moda de la tasa anual de citaciones es de alrededor de una citación anual, con valores mínimos cercanos a una citación cada 10 años y máximos cercanos a 100 citaciones por año.

Por último, confirmamos que existe una correlación de Pearson positiva entre el número de autores y la tasa anual de citaciones de 0,78. Aunque los datos presentan un alto grado de dispersión, nuestros resultados respaldan hallazgos anteriores que indican que los artículos con un mayor número de autores tienden a acumular un mayor número de citaciones en un período determinado (**Tahamtan et al.**, 2016).

Colombia en el contexto mundial

Para ubicar a Colombia en el contexto mundial utilizamos los resultados de la WoS para el periodo de cinco años entre el 2019 y el 2023. Obtuvimos el número total de publicaciones y el número de artículos que se consideran altamente citados.

La lista de países seleccionados corresponde a la unión de dos conjuntos. El primero es la lista de naciones reportadas por la WoS con un número mayor o igual de publicaciones que Colombia. Estas son (en orden decreciente de publicaciones totales): Estados Unidos (USA), Alemania (DEU), Inglaterra (ENG), Italia (ITA), China (CHN), Francia (FRA), España (ESP), Japón (JPN), Australia (AUS), Países Bajos (NLD), Chile (CHL), Canadá (CAN), Rusia (RUS), Suiza (CHE), India (IND), Suecia (SWE), Dinamarca (DNK), Corea del Sur (KOR), Polonia (POL), Escocia (SCT), Sudáfrica (ZAF), Brasil (BRA), Bélgica (BEL), México (MEX), Taiwán (TWN), Israel (ISR), Argentina (ARG), República Checa (CZE), Austria (AUT), Finlandia (FIN), Portugal (PRT), Hungría (HUN), Irlanda (IRL), Grecia (GRC), Irlanda del Norte (NIR), Gales (WLS), Nueva Zelanda (NZL), Emiratos Árabes Unidos (ARE), Ucrania (UKR), Noruega (NOR), Turquía (TUR), Irán (IRN), Tailandia (THA), Serbia (SRB), Eslovaquia (SVK), Croacia (HRV), Eslovenia (SVN), Bulgaria (BGR), Armenia (ARM), Estonia (EST) y Vaticano (VAT). El segundo conjunto de naciones corresponde a las de América Latina y el Caribe que no se encuentran en el conjunto anterior y tienen al menos una publicación. Estas son: Uruguay (URY), Ecuador (ECU), Venezuela (VEN), Costa Rica (CRI), Perú (PER), Guatemala (GTM), Cuba (CUB), Honduras (HND), Bolivia (BOL), Nicaragua (NIC), El Salvador (SLV) y Paraguay (PRY).

La **figura 5** muestra el número total de publicaciones de todas estas naciones. Observamos que estos datos evidencian una relación exponencial, lo que indica que una distribución de ley de potencias no sería un buen ajuste, como se esperaría a partir de la amplia variedad de distribuciones de tamaño y rango descritas por la ley de Zipf (**Clauset et al.**, 2009).

En este ordenamiento por citaciones, los tres primeros lugares los ocupan Estados Unidos, Alemania e Inglaterra. Colombia se encuentra en el lugar 52 a nivel global. A nivel de Latinoamérica, ocupa la quinta posición después de Chile (11), Brasil (22), México (24) y Argentina (27), aquí el número entre paréntesis corresponde a la posición global. En América Latina y el Caribe, las posiciones inferiores del *ranking* las ocupan Uruguay (73), Ecuador (78), Venezuela (82), Costa Rica (84), Perú (85), Guatemala (88), Cuba (89), Honduras (95), Bolivia (102), Nicaragua (103), El Salvador (126) y Paraguay (130).

En la **figura 6** se muestra el número de artículos altamente citados (en el 1 % superior de citaciones a nivel global en su año de publicación) en función del número total de artículos publicados. Es reconfortante ver que Colombia cuenta con tres artículos en esta selección, lo que corresponde aproximadamente al 2 % de los artículos publicados con participación colombiana, una fracción comparable a la de otros países como Brasil, Chile y Estados Unidos.

Los siguientes son los tres artículos colombianos más citados, los cuales se publicaron en el 2023 y corresponden a una colaboración de cosmología observacional llamada Dark Energy Spectroscopic Instrument:

- The Target-selection Pipeline for the Dark Energy Spectroscopic Instrument, (**Myers et al.**, 2023), con participación de Uniandes.

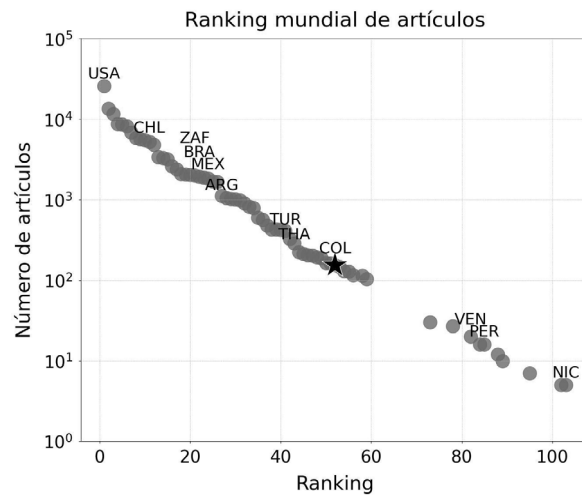


Figura 5. Distribución de tamaño y rango del número total de publicaciones entre 2019 y 2023 en la WoS. Se incluyen las naciones con un número igual o mayor de publicaciones que Colombia (COL), además de otras naciones de América Latina que tienen al menos una publicación. Colombia se encuentra en la posición 52 a nivel mundial.

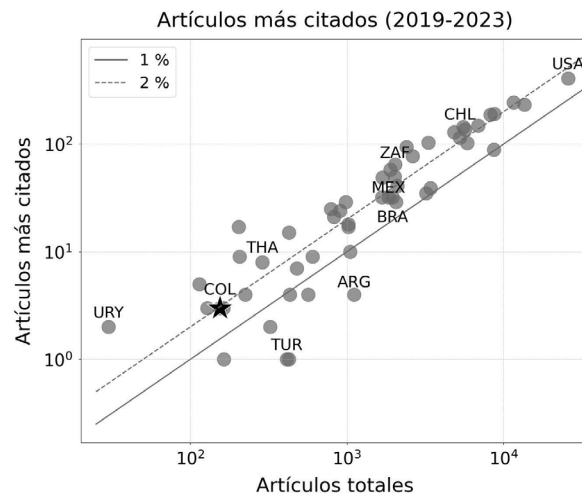


Figura 6. Artículos más citados (1 % superior a nivel mundial) entre el 2019 y el 2023 comparados con el número de artículos del 2019 a 2023, según la WoS. Se muestra, además, el 1 % (línea continua) y el 2 % (línea discontinua) de los artículos totales de cada país. Colombia cuenta con tres artículos en el grupo más citado, lo que representa aproximadamente el 2 % de todos los artículos publicados con participación colombiana.

- The Spectroscopic Data Processing Pipeline for the Dark Energy Spectroscopic Instrument (Guy *et al.*, 2023), con participación de Uniandes.
- The DESI Bright Galaxy Survey: Final Target Selection, Design, and Validation (Hahn *et al.*, 2023), con participación de Uniandes y la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Conclusiones

La investigación astronómica en Colombia está experimentando un periodo de crecimiento y consolidación. Sin embargo, los registros históricos de esta evolución no ofrecen una visión completa a nivel nacional (Cepeda-Peña, 2006; Arias de Greiff,

1993; **Higuera-Garzón**, 2017). En este artículo se buscó llenar ese vacío mediante el análisis de publicaciones arbitradas con participación de instituciones colombianas, dada la importancia de este tipo de producción bibliográfica en la difusión del conocimiento y la reputación internacional de la comunidad astronómica del país.

Los datos y estadísticas presentados se basan en las publicaciones arbitradas encontradas en las bases de datos Astrophysics Data System y Web of Science. Esta aproximación bibliométrica permitió minimizar sesgos, pues no se hizo una selección previa de las instituciones sujetas a estudio. Por el contrario, el análisis de estas publicaciones nos permitió establecer las principales universidades y áreas que han contribuido al crecimiento de la investigación astronómica en Colombia.

Esta perspectiva bibliométrica nos proporciona una serie de conclusiones significativas:

1. **Diversidad.** Encontramos que al menos 25 instituciones diferentes han participado en las publicaciones arbitradas incluidas en el ADS, las cuales se ubican en 11 ciudades diferentes, todas ellas capitales departamentales (en paréntesis indicamos el número de instituciones): Barranquilla (1), Bogotá (11), Bucaramanga (1), Cali (2), Cartagena (1), Medellín (3), Montería (1), Pasto (2), Pereira (1), Popayán (1) y Villavicencio (1). Además, la mayoría de dichas instituciones (14 de 25) son de origen privado, mientras que las otras (11 de 25) son de origen estatal. Encontramos cuatro instituciones que tienen una clara preeminencia: la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad Industrial de Santander y la Universidad de Antioquia, ubicadas en tres ciudades diferentes.
2. **Los inicios.** El año 1980 marca de manera apropiada el surgimiento de la era contemporánea de la investigación astronómica en Colombia, evidenciado por la primera publicación en una revista internacional arbitrada de astronomía hecha por un científico afiliado a una institución colombiana.
3. **Cuatro décadas de evolución.** Durante la primera década (fase pionera), de 1980 a 1989, las publicaciones arbitradas eran esporádicas, con una tasa promedio de una publicación por año. Dichas contribuciones estuvieron dominadas principalmente por dos instituciones en Bogotá: la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de los Andes. En las dos décadas siguientes (fase de desarrollo) la productividad se duplicó, con un promedio de dos publicaciones por año entre 1990 y 2009. Además, dos instituciones más ingresaron en el ámbito de la investigación astronómica: la Universidad de Antioquia y la Universidad Industrial de Santander. En la década de 2010 a 2019 (fase de consolidación) la productividad se multiplicó por un factor de diez con respecto a la década anterior, con cerca de 20 publicaciones por año.
4. **El comienzo de la quinta década.** En los últimos cuatro años, de 2020 a 2023, se ha observado un nuevo crecimiento en la tasa de publicaciones, con cerca de 40 por año. Durante este periodo, el número de publicaciones es comparable al total de las cuatro décadas anteriores (1980-2019), lo que se explica, en parte, por la participación en colaboraciones científicas internacionales.
5. **Alto impacto.** Encontramos que los artículos con mayor número de citas abarcan tres áreas: fenómenos de altas energías y física fundamental, estrellas y física estelar, galaxias y cosmología.

Unianandes muestra una concentración de artículos en el campo de galaxias y cosmología, con colaboraciones entre siete y 32 autores, todos ellos con más de 100 citas. En la UIS, se destaca con artículos en el campo de altas energías y física fundamental, con colaboraciones numerosas (cerca de 400 autores), superando la mayoría de las publicaciones las 100 citas. Los artículos de la UdeA se centran en el campo de estrellas y física estelar, con colaboraciones de una decena de autores, superando algunos artículos las 100 citas. Los artículos de la UNAL abordan temas de estrellas y física estelar, galaxias y cosmología, con un grupo de cuatro autores por publicación y una media de citas menor que la de Unianandes, la UIS y la UdeA.

6. Contexto internacional. Para ubicar al país en el contexto mundial examinamos el total de publicaciones y los artículos altamente citados, enfocándonos en los resultados entre 2019 y 2023. La lista de países incluye aquellos con un número igual o superior de publicaciones que Colombia. En el número total de publicaciones destacan Estados Unidos, Alemania e Inglaterra como líderes en publicaciones. Colombia ocupa el puesto 52 a nivel mundial y el quinto en América Latina. Tres artículos con participación colombiana están entre los más citados, todos de 2023 y relacionados con el Dark Energy Spectroscopic Instrument, una colaboración de cosmología observacional.

Esperamos que este trabajo pueda servir como un estímulo y una base sólida para futuras investigaciones. Sería enriquecedor profundizar en el análisis de la colaboración internacional en proyectos astronómicos y su impacto en la producción científica de Colombia. Además, sería valioso investigar cómo las políticas gubernamentales y las estrategias de financiamiento pueden afectar el crecimiento y la calidad de la investigación astronómica en el país. Una línea de investigación prometedora sería explorar el papel de las instituciones educativas y los centros de investigación en la formación de nuevos talentos en astronomía y su contribución al desarrollo continuo del campo en Colombia. Asimismo, sería interesante explorar el potencial de la divulgación científica y la participación pública en actividades astronómicas para fomentar el interés y la comprensión de la ciencia en el país. Estas áreas ofrecen un terreno fértil para futuros investigadores interesados en impulsar y documentar el avance de la astronomía colombiana.

Nuestros resultados muestran que la investigación astronómica en Colombia, a diferencia de varios lugares en el mundo, se concentra casi exclusivamente en las universidades. Esta situación tiene una ventaja significativa: es posible encontrar múltiples oportunidades de colaboración e intercambio interuniversitario que beneficien a todas las personas involucradas en la investigación astronómica en el país. Un primer paso hacia esta colaboración podría ser la creación de una alianza entre las universidades que realizan investigación en astronomía. De esta manera, se podrían optimizar los limitados recursos humanos y económicos disponibles en nuestras instituciones de educación superior.

Agradecimientos

Los autores expresan un sincero agradecimiento a Santiago Vargas, Nelson Padilla y Mario Armando Higuera, cuyos comentarios y sugerencias contribuyeron significativamente a mejorar la versión original de este escrito.

Contribución de los autores

SGM: recolección e integración de datos, cálculos, análisis de los resultados, redacción del artículo. FOF: recolección e integración de datos, cálculos, análisis de los resultados, redacción del artículo. MPSA: revisión de la literatura, redacción del artículo. PN: conceptualización, recolección de datos, revisión de la literatura. JEFR: conceptualización, recolección de datos, revisión de la literatura, análisis de los resultados, redacción del artículo. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final sometida a publicación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

Referencias

- Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Albuquerque, I. F. M., Albury, J. M., Allekotte, I., Almela, A., Álvarez Castillo, J., Álvarez-Muñoz, J., Anastasi, G. A., Anchor-Doqui, L., Andrada, B., Andringa, S., Aramo, C., Asorey, H., Assis, P., Avila, G., Badescu, A. M., Bakalova, A., . . . Zuccarello, F. (2019). Probing the origin of ultra-high-energy cosmic rays with neutrinos in the EeV energy range using the Pierre Auger Observatory. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2019(10), 022. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/10/022>

- Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Albuquerque, I. F. M., Allekotte, I., Almela, A., Álvarez Castillo, J., Álvarez-Muñiz, J., Anastasi, G. A., Anchordoqui, L., Andrada, B., Andringa, S., Aramo, C., Arsene, N., Asorey, H., Assis, P., Avila, G., Badescu, A. M., Balaceanu, A., . . . Pierre Auger Collaboration.** (2018). An Indication of Anisotropy in Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays through Comparison to the Flux Pattern of Extragalactic Gamma-Ray Sources. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 853 (2), Article L29. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaa66d>
- Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adams, T., Addesso, P., Adhikari, R. X., Adya, V. B., Affeldt, C., Afrough, M., Agar-Wal, B., Agathos, M., Agatsuma, K., Aggarwal, N., Aguiar, O. D., Aiello, L., Ain, A., . . . South Africa/MeerKAT SKA.** (2017). Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *The Astrophysical Journal Letters*, 848(2), Article L12. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9>
- Adamo, A., Kruijssen, J., Bastian, N., Silva-Villa, E., Ryon, J.** (2015). Probing the role of the galactic environment in the formation of stellar clusters, using m83 as a test bench. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(1), 246-260. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv1203>
- Albert, A., André, M., Anghinolfi, M., Ardid, M., Aubert, J., Aublin, J., Avgitas, T., Baret, B., Barrios-Martí, J., Basa, S., Belhorma, B., Bertin, V., Biagi, S., Bormuth, R., Bourret, S., Bouwhuis, M. C., Branzas, H., Bruijn, R., Brunner, J. . . . Virgo Collaboration.** (2017). Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory. *The Astrophysical Journal Letters*, 850(2), Article L35. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9aed>
- Arias de Greiff, J.** (1993). *La astronomía en Colombia*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. <https://repositorio.acefyn.org.co/handle/001/79>
- Belenchia A., Carlesso M., Bayraktar Ö., Dequal D., Derkach I., Gasbarri G., Herr W., Li Y.L., Rademacher M., Sidhu J., Oi D.K.L., Seidel S.T., Kaltenbaek R., Marquardt C., Ulbricht H., Usenko V.C., Wörner L., Xuereb A., Paternostro M., Bassi A.** (2022). Quantum physics in space. *Physics Reports*, 951, 1-70. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2021.11.004>
- Benn, C.R. & Sánchez, S.F.** (2001). Scientific impact of large telescopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 113(781), 385. <https://doi.org/10.1086/319325>
- Borne, K. D.** (2010). Astroinformatics: Data-oriented astronomy research and education. *Earth Science Informatics*, 3, 5-17. <https://doi.org/10.1007/s12145-010-0055-2>
- Cárdenas-Avenidaño, A., Vargas-Domínguez, S., Moreno-Cárdenas, F., Calvo-Mozo, B.** (2019). The Educational and Influential Power of the Sun. *Communicating Astronomy with the Public Journal*, 25, 28.
- Casas, R., Arias, V., Peña-Ramírez, K., Kroupa, P.** (2012). Dwarf spheroidal satellites of the Milky Way from dark matter free tidal dwarf galaxy progenitors: Maps of orbits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424(3), 1941-1951. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21319.x>
- Castillo, C., Donato, D., Gionis, A.** (2007). Estimating number of citations using author reputation. In N. Ziviani R. Baeza-Yates (Eds.). *String processing and information retrieval* (pp. 107-117). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75530-2_10
- Cepeda-Peña, W. E.** (2006). *Astronomy for the developing world*. Cambridge University Press, 2(SPS5), pp. 55-58. <https://doi.org/10.1017/S1743921307006709>
- Chang, H.W. & Huang, M.H.** (2013). Prominent institutions in international collaboration network in astronomy and astrophysics. *Scientometrics*, 97, 443-460. <https://doi.org/10.1007/s11192-013-0976-x>
- Chen T.X., Schmitz M., Mazzarella J.M., Wu X., van Eyken J.C., Accomazzi A., Akeson R.L., Allen M., Beaton R., Berriman G.B., Boyle A.W., Brouty M., Chan B.H.P., Christiansen J.L., Ciardi D.R., Cook D., D'Abrusco R., Ebert R., Frayer C., . . . Shin-Ywan W.** (2022). Best practices for data publication in the astronomical literature. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 260(1), 5. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac6268>
- Clauset, A., Shalizi, C.R., Newman, M.E.J.** (2009). Power-Law Distributions in Empirical Data. *SIAM Review*, 51(4), 661-703. <https://doi.org/10.1137/070710111>
- Cortes, R., Depoortere, D., Malaver, L.** (2018). Astronomy in Chile: Assessment of scientific productivity through a bibliometric analysis. *European Physical Journal Web of Conferences*, 186, Article 05002, 05002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818605002>

- Crabtree, D. R.** (2014). A bibliometric analysis of observatory publications for the period 2008-2012. In A. B. Peck, C. R. Benn, R. L. Seaman (Eds.), *Observatory operations: Strategies, processes, and systems v* (91490A, Vol. 9149). <https://doi.org/10.1117/12.2054058>
- Evans, J.** (1998). *The history and practice of ancient astronomy*. Oxford University Press.
- Fabian, A.** (2010). The impact of astronomy. *Astronomy & Geophysics*, 51(3), 3-25. <https://doi.org/10.1111/j.1468-4004.2010.51325.x>
- Gieren, W.** (1980). AH Vel - another classical cepheid with a blue companion. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 92, 484-488. <https://doi.org/10.1086/130698>
- Granés, S. J.** (1980). The concepts of space and time in classical physics and special relativity. *Revista Colombiana de Física*, 14(1), 115-151.
- Guy, J., Bailey, S., Kremin, A., Alam, S., Alexander, D.M., Allende Prieto, C., BenZvi, S., Bolton, A.S., Brooks, D., Chaussidon, E., Cooper, A.P., Dawson, K., de la Macorra, A., Dey, A., Dey, B., Dhungana, G., Eisenstein, D. J., Font-Ribera, A., Forero-Romero, J.E., ..., Zou, H.** (2023). The Spectroscopic Data Processing Pipeline for the Dark Energy Spectroscopic Instrument. *The Astronomical Journal*, 165(4), Article 144, 144. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/acb212>
- Hahn, C., Wilson, M. J., Ruiz-Macias, O., Cole, S., Weinberg, D.H., Moustakas, J., Kremin, A., Tinker, J.L., Smith, A., Wechsler, R.H., Ahlen, S., Alam, S., Bailey, S., Brooks, D., Cooper, A. P., Davis, T. M., Dawson, K., Dey, A., Dey, B., . . . Zou, H.** (2023). The DESI Bright Galaxy Survey: Final Target Selection, Design, and Validation. *The Astronomical Journal*, 165(6), Article 253, 253. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/acff8>
- Higuera-Garzón, M.A.** (2017). Astronomy in Colombia. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series*, 49, 3-6.
- Hirsch, J. E.** (2005). An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(46), 16569-16572. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507655102>
- Hollyhead, K., Bastian, N., Adamo, A., Silva-Villa, E., Dale, J., Ryon, J., Gazak, Z.** (2015). Studying the ymc population of m83: How long clusters remain embedded, their interaction with the ism and implications for gc formation theories. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449(1), 1106-1117. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv331>
- Iacomino, C.** (2019). Global space exploration landscape: Strategies and programmes. *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*, p. 7-33. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15751-7_2
- Kelly, J., Sadeghieh, T., Adeli, K.** (2014). Peer review in scientific publications: Benefits, critiques, & a survival guide. *The electronic Journal of the International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 25(3), 227. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4975196/>
- Koyre, A.** (1943). Galileo and the scientific revolution of the seventeenth century. *The Philosophical Review*, 52(4), 333-348. <https://doi.org/10.2307/2180668>
- Leisman, L., Haynes, M.P., Janowiecki, S., Hallenbeck, G., Jo'zsa, G., Giovanelli, R., Adams, E.A.K., Bernal Neira, D., Cannon, J.M., Janesh, W. F., Rhode, K.L., Salzer, J.J.** (2017). (Almost) Dark Galaxies in the ALFALFA Survey: Isolated H I-bearing Ultra-diffuse Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 842(2), Article 133. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7575>
- Leitherer, C., Ortiz-Otálvaro, P. A., Bresolin, F., Kudritzki, R.P., Lo Faro, B., Paul-Drach, A.W.A., Pettini, M., Rix, S. A.** (2010). A Library of Theoretical Ultraviolet Spectra of Massive, Hot Stars for Evolutionary Synthesis. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 189(2), 309-335. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/189/2/309>
- Libeskind, N.I., Hoffman, Y., Forero-Romero, J., Gottlober, S., Knebe, A., Steinmetz, M., Klypin, A.** (2013). The velocity shear tensor: Tracer of halo alignment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428(3), 2489-2499. <https://doi.org/10.1093/mnras/sts216>
- Libeskind, N.I., van de Weygaert, R., Cautun, M., Falck, B., Tempel, E., Abel, T., Al-paslan, M., Aragón-Calvo, M.A., Forero-Romero, J.E., González, R., Gottlöber, S., Hahn, O., Hellwing, W. A., Hoffman, Y., Jones, B.J.T., Kitaura, F., Knebe, A., Manti, S., Neyrinck, M., ..., Yepes, G.** (2018). Tracing the cosmic web. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(1), 1195-1217. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx1976>
- Mannheim, P. D.** (2006). Alternatives to dark matter and dark energy. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 56(2), 340-445. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2005.08.001>
- Matt, S.P., Pinzón, G., de la Reza, R., Greene, T.P.** (2010). Spin evolution of accreting young stars. I. Effect of magnetic star-disk coupling. *The Astrophysical Journal*, 714(2), 989. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/714/2/989>

- Matt, S.P., Pinzón, G., Greene, T.P., Pudritz, R.E.** (2012). Spin evolution of accreting young stars. II. Effect of accretion-powered stellar winds. *The Astrophysical Journal*, 745(1), 101. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/745/1/101>
- McConnachie, A. W., Ibata, R., Martin, N., Ferguson, A.M.N., Collins, M., Gwyn, S., Irwin, M., Lewis, G. F., Mackey, A.D., Davidge, T., Arias, V., Conn, A., Co'te', P., Crnojevic, D., Huxor, A., Penarrubia, J., Spengler, C., Tanvir, N., Valls-Gabaud, D., . . . Widrow, L.M.** (2018). The Large-scale Structure of the Halo of the Andromeda Galaxy. II. Hierarchical Structure in the Pan-Andromeda Archaeological Survey. *The Astrophysical Journal*, 868(1), Article 55, 55. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae8e7>
- Mieg, H.A.** (2022). *Science as a profession: And its responsibility*. In *The responsibility of science* (pp. 67–90). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91597-1_4
- Myers, A. D., Moustakas, J., Bailey, S., Weaver, B. A., Cooper, A. P., Forero-Romero, J.E., Abolfathi, B., Alexander, D. M., Brooks, D., Chaussidon, E., Chuang, C.H., Dawson, K., Dey, A., Dey, B., Dhungana, G., Doel, P., Fanning, K., Gaztanaga, E., Gontcho A Gontcho, S., . . . Zou, H.** (2023). The Target-selection Pipeline for the Dark Energy Spectroscopic Instrument. *The Astronomical Journal*, 165(2), Article 50, 50. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aca5f9>
- Niederhofer, F., Hilker, M., Bastian, N., Silva-Villa, E.** (2015). No evidence for significant age spreads in young massive LMC clusters. *Astronomy & Astrophysics*, 575(A62), 18. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424455>
- Old, L., Wojtak, R., Mamon, G. A., Skibba, R. A., Pearce, F. R., Croton, D., Bamford, S., Behroozi, P., de Carvalho, R., Muñoz-Cuartas, J. C., Gifford, D., Gray, M. E., von der Linden, A., Merrifield, M. R., Muldrew, S. I., Muller, V., Pearson, R. J., Ponman, T. J., Rozo, E., . . . Tempel, E.** (2015). Galaxy Cluster Mass Reconstruction Project - II. Quantifying scatter and bias using contrasting mock catalogues. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449(2), 1897-1920. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv421>
- Pearce, F.** (2004). Citation measures and impact within astronomy. *Astronomy & Geophysics*, 45(2), 2-15. <https://doi.org/10.1046/j.1468-4004.2003.45215.x>
- Ribeiro, V., Russo, P., Cardenas-Avenidaño, A.** (2013). A survey of astronomical research: An astronomy for development baseline. *The Astronomical Journal*, 146(6), 138-145. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/146/6/138>
- Riebe, K., Partl, A.M., Enke, H., Forero-Romero, J., Gottlober, S., Klypin, A., Lemson, G., Prada, F., Primack, J. R., Steinmetz, M., Turchaninov, V.** (2013). The MultiDark Database: Release of the Bolshoi and MultiDark cosmological simulations. *Astronomische Nachrichten*, 334(7), 691-708. <https://doi.org/10.1002/asna.201211900>
- Rodríguez-Ardila, A., Viegas, S. M., Pastoriza, M. G., Prato, L.** (2002). Near-infrared coronal lines in narrow-line seyfert 1 galaxies. *The Astrophysical Journal*, 579(1), 214. <https://doi.org/10.1086/342840>
- Rodríguez-Ardila, A., Prieto, M., Portilla, J., Tejeiro, J.** (2011) The near-infrared coronal line spectrum of 54 nearby active galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, 743(2), 100. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/2/100>
- Ruiz, M., Lang, R.N., Paschalidis, V., Shapiro, S.L.** (2016). Binary Neutron Star Mergers: A Jet Engine for Short Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal Letters*, 824(1), Article L6. <https://doi.org/10.3847/2041-8205/824/1/L6>
- Tahamtan, I., Safipour-Afshar, A., Ahamdzadeh, K.** (2016). Factors affecting number of citations: A comprehensive review of the literature. *Scientometrics*, 107, 1195-1225. <https://doi.org/10.1007/s11192-016-1889-2>
- Wang, J., Chen, Y., Liu, G., Cheng, W., Yin, T.** (2020). How has Lunar science developed? A bibliometric analysis and systematic review. *Open Astronomy*, 29(1), 251-264. <https://doi.org/10.1515/astro-2020-0023>
- Zhang, Y. & Zhao, Y.** (2015). Astronomy in the big data era. *Data Science Journal*, 14, 1-9. <https://doi.org/10.5334/dsj-2015-011>

Original article

Quantifying Colombian blue carbon sinks from coastal mangroves

Cuantificación de sumideros de carbono azul en Colombia a partir de manglares costeros

Joel Bernal O.¹, Leidy P. Alfonso A.¹, Valentina I. Burbano A.¹, Santiago Vargas-Domínguez^{2,*}, María Fernanda González^{3,4}, Juan Esteban Agudelo^{2,3,4}, Jose Iván Campos-Rozo^{3,4,5}

¹ Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

² Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

³ Fregata Space, Spain

⁴ Planetai Space, Spain

⁵ Astronomical Institute of the Academy of Sciences of Czech Republic, Ondřejov, Czech Republic

Abstract

Mangroves along the Colombian Caribbean and Pacific coasts are vital ecosystems with numerous environmental, economic, and social benefits. Their dense root systems act as natural buffers, safeguarding coastlines from storms and preserving aquifer integrity. Additionally, mangroves are pivotal in mitigating climate change by efficiently storing carbon, absorbing up to 10 times more than terrestrial ecosystems. Government decision-makers face the challenge of balancing economic development with environmental preservation when approving infrastructure projects. Quantifying the monetary value of mangroves is crucial for assessing potential impacts on these ecosystems. This study used Sentinel-2 composites to train a random forest classifier, identifying and quantifying a total mangrove area of 2756.84 km² in Colombia by 2020. This information was later used to assess the carbon storage in mangroves for the same year. The estimated value was 96,351.66 ± 13,632.63 kt or 353,610.59 ± 50,031.78 kt CO₂. Ultimately, we evaluated two contingents on the mangrove extent: one depicting their disappearance and the other illustrating their growth. These findings underscore the critical importance of mangroves and highlight the need for their conservation and sustainable management to achieve emissions reduction goals by 2030.

Keywords: Mangroves; Climate change; Blue carbon; Remote sensing; Machine learning; Natural capital quantification; Environmental impact; Sustainability; Carbon sinks.

Resumen

Los manglares a lo largo de las costas del Caribe y el Pacífico de Colombia son ecosistemas vitales con numerosos beneficios ambientales, económicos y sociales. Sus densos sistemas de raíces actúan como amortiguadores naturales, protege las costas de las tormentas y preservan la integridad de los acuíferos. Además, los manglares desempeñan un papel fundamental en la mitigación del cambio climático al almacenar carbono de manera eficiente, absorbiendo hasta diez veces más que los ecosistemas terrestres. Los responsables de decisiones gubernamentales enfrentan el desafío de equilibrar el desarrollo económico con la preservación ambiental al aprobar proyectos de infraestructura. Cuantificar el valor económico de los manglares es crucial para evaluar los posibles impactos en estos ecosistemas. En este estudio utilizamos composiciones de Sentinel-2 para entrenar un clasificador de bosques aleatorios, identificando y cuantificando un área total de manglar de 2756,84 km² en Colombia para el año 2020. Esta información se utilizó posteriormente para evaluar el almacenamiento de carbono en los manglares en el mismo año. El valor estimado fue de 96.351,66 ± 13.632,63 kt o 353.610,59 ± 50.031,78 kt de CO₂. Por último, evaluamos dos escenarios dependientes de la extensión del manglar: uno que mostraba su desaparición y otro su crecimiento. Estos hallazgos subrayan la importancia crítica de los manglares y resaltan la necesidad de su conservación y manejo sostenible para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones al 2030.

Palabras clave: Manglares; Cambio climático; Carbono azul; Teledetección; Aprendizaje automático; Cuantificación del capital natural; Impacto ambiental; Sostenibilidad.

Citation: Bernal O. J., *et al.* Quantifying Colombian blue carbon sinks from coastal mangroves. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 48(188):658-670, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.2585>

Editor: Jaime Ricardo Cantera

***Corresponding autor:**
Santiago Vargas Dominguez;
svargasd@unal.edu.co

Received: May 31, 2024

Accepted: July 17, 2024

Published on line: August 5, 2024



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

Introduction

Climate change is undoubtedly one of the greatest (if not the greatest) challenges before humanity. It has rapidly evolved from an uncomfortable truth to a real threat to the lives of millions of people. In response, an international and interdisciplinary movement has emerged to mitigate the damage and losses, to halt the advance of global warming, or to find a solution in the medium to long term.

The United Nations (UN), as the largest international organization in existence, has been actively involved in addressing climate change, convening world leaders, and a diverse range of experts, including scientists, economists, environmentalists, philanthropists, and various institutions to discuss potential solutions. The most recent of these Conferences, the UN Climate Change Conference in Glasgow (COP26: <https://www.un.org/en/climatechange/cop26>), resulted in the Glasgow Climate Pact, where countries reconfirmed their commitment to achieving the goals of the Paris Agreement (<https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>), which, among other provisions, obliges parties to protect and improve, as deemed suitable, greenhouse gas sinks and reservoirs.

While capturing carbon from the air and sequestering it in the soil is a well-documented process in several ecosystems, recent research has unveiled the remarkable efficiency of this carbon sequestration process within coastal and marine ecosystems. Sequestering carbon from the atmosphere into carbon sinks occurs through various physical or biological mechanisms, among which photosynthesis stands out as fundamental. This conversion process not only facilitates the synthesis of essential nutrients for the organism but is also pivotal in mitigating atmospheric carbon dioxide levels, thus contributing to the regulation of Earth's climate. Sequestration rates are usually quantified in grams of carbon per unit area (e.g., square meters or hectares) per year. Estimates range from an average of 5.1 g C/m²/year for temperate forests to 163 g C/m²/year for mangroves (McLeod *et al.*, 2011).

'Blue carbon' is the term often used in the current context, to refer to the carbon stored within coastal and marine ecosystems. Carbon dioxide is removed from the atmosphere by plants through photosynthesis and stored in both their aboveground and belowground biomass, but when blue carbon ecosystems are degraded or lost, they release carbon back into the atmosphere.

Mangroves, along with tidal, salt marshes, and seagrasses, constitute blue carbon (vegetated coastal) ecosystems. A mangrove is a type of vegetation consisting of trees, shrubs, palms, or ground ferns, which typically grow to a height of more than half a meter. They are commonly found in intertidal zones along marine coasts and estuarine margins. Mangroves contribute to enhancing climate adaptation and resilience in coastal regions by providing a range of essential services. These services include protection against storm surges and rising sea levels, water quality regulation, nutrient recycling, and sediment trapping, among others (Howard *et al.*, 2014). It is known that an additional crucial service is provided by capturing and storing blue carbon from the atmosphere and oceans.

As a member of the United Nations, Colombia is fully committed to the Paris Agreement, and consequently, to the fight against climate change, including the pursuit of carbon neutrality by 2050, a 51% reduction in greenhouse gas emissions, and the goal of zero deforestation by 2030. However, the country's vast biodiversity gives it a special role to play. According to the Colombian Ministry of Environment (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2022), mangroves in Colombia cover an area of 285,049 hectares, with 90,160.58 hectares along the Caribbean coast and 194,880 along the Pacific coast. The Minister of Environment emphasized the significance of mangroves in achieving the emissions reduction goal by 2030. The Colombian government has developed both general and specific plans to protect and restore approximately one-third of the total mangrove area.

Still, carbon emissions resulting from mangrove deforestation contribute to approximately 10% of global deforestation-related emissions although mangroves cover only 0.07% of land area (*What is Blue Carbon?* n.d.). Besides, it is estimated that approximately

67% of the historical global mangrove extent has been lost (**Howard *et al.***, 2014). Furthermore, the restoration and conservation of mangrove forests is a significant challenge due to their vast and remote nature, which makes on-site assessments both challenging and time-consuming. Promisingly, the use of remote sensing in conjunction with various digital image classification methods holds the potential to provide more accurate results for mapping and monitoring the mangrove ecosystem. Considering the importance of the mangrove ecosystem in carbon dioxide sequestration and the advancements in remote sensing technology for ecosystem mapping, we have created a code using Google Earth Engine (**Mutanga & Kumar**, 2019) to assess the extent of mangroves in Colombia. Employing this data, we estimate the total carbon sequestered by mangroves along the Colombian coast.

To achieve such an aim, firstly, an artificial intelligence algorithm was developed capable of identifying the distribution of mangroves throughout the national territory. Secondly, the evolution of the amount of carbon stored by mangroves was quantified using experimental values obtained from research conducted in the study areas.

Finally, the high importance of mangroves is revealed through the values of carbon sequestration and the total greenhouse gas emissions in Colombia evaluated through two scenarios based on the increase and decrease of the mangrove extension, highlighting their vital role in meeting the objectives established by the European Union for the year 2030.

Insights into mangrove research in Colombia

Research on mangroves in Colombia has historically been scarce despite their importance (**Castellanos-Galindo *et al.***, 2021). Until the late 1970s, the significance of these ecosystems was not reflected in the number of studies or laws protecting them. Research in this field has been shaped by a combination of factors, including the way the country has developed and specific efforts by researchers and initiatives. For instance, the Scor/UNESCO working group on mangrove ecosystems played a significant role in promoting research initiatives in Colombia and the wider Latin American region (**Snedaker *et al.***, 1984). Similarly, the Mangroves of Colombia Project (MCP), carried out by the International Tropical Timber Organization, was a significant initiative that took place in two phases from 1991 to 2001 (**Sánchez-Páez *et al.***, 2000). The large datasets generated by the MCP can be useful for a variety of purposes related to mangrove science and management (**Blanco-Libreros & Álvarez-León**, 2019). These early research programs conducted by different organizations were vital in updating the extent of mangroves in the country, fostering the implementation of management policies, and starting pilot restoration projects.

Recent studies have highlighted the importance of quantifying carbon stocks in mangrove ecosystems, particularly in the Colombian Pacific and Caribbean regions. **Mejía-Rentería *et al.*** (2018) conducted a comprehensive comparison of mangrove extent estimations in the Colombian Pacific, emphasizing the critical role of precise mapping for effective conservation. **Blanco-Libreros *et al.*** (2015) provided detailed measurements of above-ground biomass and carbon reservoirs in the mangroves of the Gulf of Urabá, offering essential data, while **Perdomo-Trujillo *et al.*** (2021) investigated the impact of restoration actions in the Ciénaga Grande de Santa Marta, demonstrating the significant potential of restoration efforts to enhance carbon sequestration. Additionally, **Palacios-Peñaranda *et al.*** (2019) quantified carbon stocks in mangrove forests of the Colombian Pacific, underscoring the substantial carbon storage capabilities of these ecosystems. Lastly, **Moreno-Muñoz** (2022) evaluated the total carbon stored in the mangrove ecosystem in the Pacific region of Nariño by using allometric equations and biomass-to-carbon conversion factors to measure carbon stored in both aboveground and belowground biomass.

In recent years, Colombian mangrove research has gained increasing visibility in the international scientific community, with a growing number of publications appearing in international peer-reviewed journals. This has contributed to a further understanding of the socioeconomic and biological importance of these ecosystems (**Pérez & Giraldo**, 2009) and their role in climate change mitigation and adaptation, among other areas of study.

However, accessing these ecosystems can pose challenges for researchers and practitioners. Compared to other forest environments, some aspects of mangroves remain poorly characterized (**Pham et al.**, 2019) partly due to their unique and complex nature, which leads to practical difficulties in mapping, measuring, and monitoring their biomass and carbon stocks. To conserve mangroves, it is crucial to establish policies and actions that rely on the effective monitoring of their biophysical parameters and mapping of their extent.

Over the past few years, remote sensing approaches have become increasingly important in collecting data from distant areas without direct contact (**Pham et al.**, 2023). In 2007, several environmental institutes in Colombia collaborated to create mangrove cover maps using remote sensing techniques (**IGAC et al.**, 2007). Similarly, machine learning and artificial intelligence have further improved the analysis and interpretation of remotely sensed data, enabling more precise insights into mangrove ecosystems. A recent study combined optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) data with machine learning algorithms to accurately measure changes in mangrove cover from 2009 to 2019 (**Selvaraj & Pérez**, 2023). With the advancements in satellite imagery and diverse classification methods, there is significant potential for the mapping, monitoring, and extraction of parameters for these types of ecosystems.

Theoretical framework

Indexes

A spectral index is an equation that merges pixel values from different spectral bands within a multispectral or hyperspectral image. It employs diverse algorithms, typically emphasizing band ratio or feature scaling approaches, such as normalized or standardized algorithms (**Tran et al.**, 2022). These indexes are valuable tools for extracting and enhancing significant information from remote sensing data, especially in the domains of environmental monitoring, agriculture, and land management. For our project, we calculated the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for quantifying vegetation (**Rouse et al.**, 1974) and the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) for water information (**Xu**, 2006). To enhance the separability between mangrove forests and terrestrial vegetation, we utilized the Normalized Difference Mangrove Index (NDMI) (**Shi et al.**, 2016), and the Combined Mangrove Recognition Index (CMRI) (**Gupta et al.**, 2018).

Carbon stocks

Assessing the carbon stored in mangroves is crucial for recognizing their role in addressing climate change and promoting human welfare. This evaluation, known as a “carbon inventory”, can be conducted at various levels. According to UNESCO (**Howard et al.**, 2014), there are three levels of detail, representing varying degrees of certainty or accuracy in assessing carbon stock. These levels are:

- Tier 1 assessments are marked by reduced accuracy and certainty. These evaluations rely on simplified assumptions and utilize default values, especially concerning activity data (information about land coverage and use) and emission factors (changes in carbon due to modifications in land use). While Tier 1 provides a general perspective, it lacks the precision associated with more intricate and comprehensive approaches. If it is not feasible to make Tier 2 or 3 estimates, Tier 1 estimates can be conducted.
- Tier 2 assessments are more accurate and detailed than Tier 1 because they use specific data from a country or site, enhancing precision.
- Tier 3 assessments concentrate on acquiring precise details about carbon dynamics through careful and continuous monitoring. These evaluations require detailed data on the carbon stored in each particular ecosystem or land use area. Additionally, they entail taking repeated measurements over time to understand how carbon levels change in the area of interest.

The concept of carbon inventories, coupled with their tiered assessment approach, presents a systematic framework essential for comprehending and managing carbon dynamics within ecosystems. By quantifying carbon stocks and fluxes, these assessments provide valuable insights into the impact of human activities on ecosystem processes and functions. This structured approach not only facilitates the monitoring of carbon storage and emissions but also enhances our ability to implement effective management strategies aimed at mitigating climate change and preserving ecosystem health and resilience.

Data

Here, we leverage two remarkable sources of geospatial data to support our remote sensing and classification tasks. First, we have the Sentinel-2 satellites, which are part of the European Space Agency's impressive endeavor. Launched in 2015 with Sentinel-2A and followed by Sentinel-2B in 2017, these satellites have the MultiSpectral Instrument (MSI). They capture a diverse range of data bands, including red, green, blue, and near-infrared, all with a remarkable 10-meter spatial resolution. Additionally, they record other spectral bands at 20 and 30 meters, allowing us to analyze Earth's features in detail. This ongoing mission is a vital component of the Copernicus program and pivotal in various essential services and applications, including land management, agriculture, forestry, disaster monitoring, humanitarian relief efforts, and risk assessment, besides addressing security-related concerns.

Second, we complement our dataset with the Global Mangrove Watch (GMW) established in 2011 by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). GMW is a robust online platform dedicated to providing open-access geospatial information about mangroves (**Bunting *et al.*, 2022**) and stands out as the most extensive mangrove monitoring tool globally, offering universal access to near real-time data on mangrove status and changes worldwide. It relies on remote sensing information and cutting-edge tools to empower initiatives focused on safeguarding and restoring mangroves, underlining the pivotal role of these ecosystems in various contexts.

Delving into Random Forest

Random Forest (RF) stands as a powerful pillar within the realm of supervised machine learning algorithms, leveraging the innovative concept of ensemble learning to achieve remarkable results. At its core, RF operates by amalgamating a multitude of decision trees, each serving as a discerning arbiter in the classification process. These decision trees intricately divide the input space into increasingly refined partitions, guided by the nuanced values of the input features. While decision trees offer a straightforward interpretation of predictive rules, they are susceptible to the pitfall of overfitting, wherein the model excessively tailors itself to the training data, thereby compromising its generalizability.

To circumvent this challenge, the RF model implements a strategic approach: it subjects each decision tree to a random subset of both the training data and the features, thus instilling a sense of diversity among the constituent trees. This deliberate randomness serves a dual purpose: it curtails the correlation between individual trees while fostering a robust, collective decision-making process. By synthesizing the majority output gleaned from each decision tree, the RF model arrives at its final classification outcome with confidence and precision.

The RF algorithm has been widely used in previous studies with highly accurate results ranging from Land Use Cover Classification (LULC) to Mangrove Species Discrimination (**Maurya *et al.*, 2021**).

Methodology

To achieve our goal, a custom code was developed from scratch using the Google Earth Engine platform (<https://earthengine.google.com/platform>) in the JavaScript language. We used the dataset "Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A" containing satellite data from March 28, 2017, to November 18, 2023. A cloud removal process was applied to

the satellite images, addressing the high cloud cover in the Colombian Pacific through the QA60 band values. Atmospheric correction was not performed, as it involves addressing factors such as Rayleigh scattering, atmospheric gasses (ozone, oxygen, water vapor), and correction of absorption and scattering caused by aerosol particles in Sentinel-2 level-2A products. Subsequently, a composite image spanning a two-year timeframe was created for classification purposes. **Figure 1** presents a visual contrast of the study area, juxtaposing the original satellite image containing visible clouds with the enhanced composite image obtained after undergoing cloud removal procedures.

The NDVI, MNDWI, NDMI, and CMRI indices were added to this composite image. Furthermore, given that mangroves are not found at elevations exceeding 100 meters in Colombia, a mask was applied to determine the corresponding altitude for each pixel, and binary classification was conducted based on this condition. The altitude data was derived from the NASA SRTM Digital Elevation 30 m dataset, which provides digital elevation models on a near-global scale. However, it is crucial to acknowledge that determining the precise altitude at which mangrove forests are most likely to be found can be subject to variation and requires adjustments that consider geographical, hydrological, and soil differences. This is especially pertinent in regions like the Colombian Pacific, where at certain altitudes, tropical humid forests may prevail over mangrove ecosystems. Adjusting the altitude range based on regional characteristics can significantly improve the model's accuracy and produce better results.

Since we understand that new mangrove growth or the decline of existing mangroves tends to occur near established areas, a buffer was created around the known mangrove region. This buffer, set at a distance of 1000 meters, was then refined by excluding non-land areas. Subsequently, this refined area was applied to the composite image, specifically tailoring it for classification within the mangrove buffer.

Considering the use of a supervised model, labels for each pixel (indicating whether it was mangrove or not) were obtained from the dataset provided by GMW. During the classification process, training data was generated using existing information to distinguish between mangrove and non-mangrove classes. A kernel was defined to identify core mangrove and non-mangrove areas through a dilation process. These core regions represent areas of particular significance or concentration. To carry out the classification, a Random Forest model with $n=100$ trees was employed. It is important

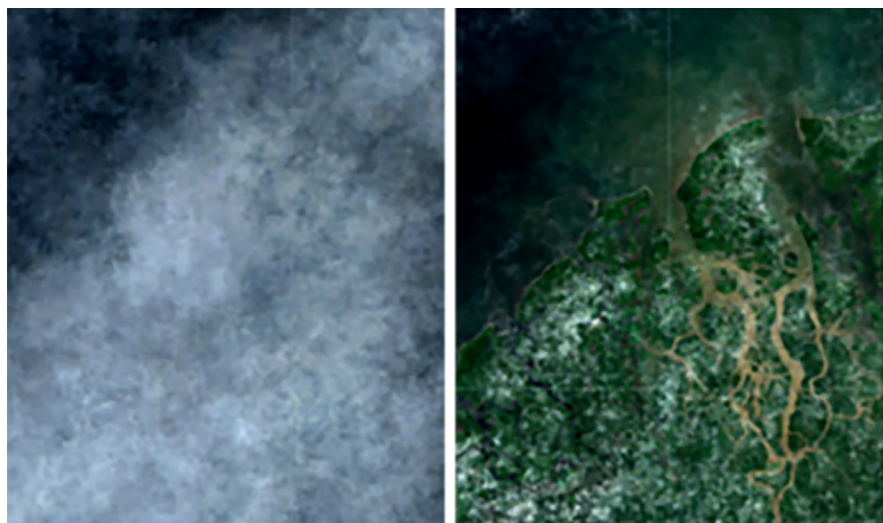


Figure 1. Comparison of a specific region within the study area. Original satellite image with visible clouds (left image) and enhanced composite image after cloud removal, offering a clearer view of the landscape in the selected area (right image)

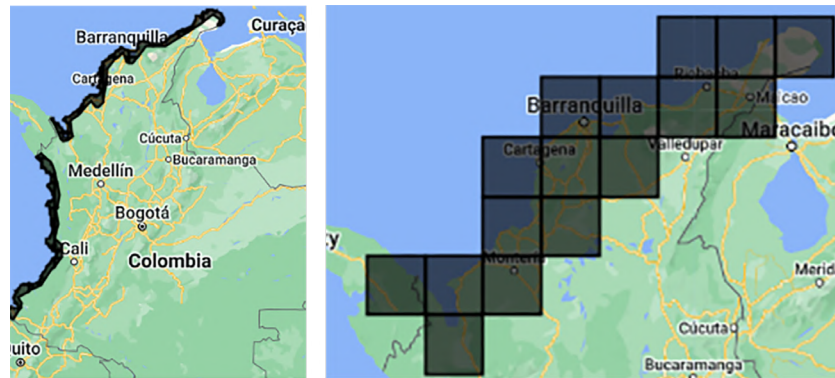


Figure 2. Map of Colombia highlighting the region of interest (in black) at 41 km from the coastline (left image) and an example of extracted sectors along the Colombian Caribbean coast (right image)

to mention in this study that the classification process was performed over pixels, rather than different images. Finally, we removed small patches of pixels to avoid isolated and solitary clusters.

The study area encompassed the Colombian coast, including both the Caribbean and Pacific regions, as shown in the left image in **figure 2**. To address potential memory issues on the platform, the region of interest was divided into small, regular sectors, as illustrated in the right image in **figure 2**. Subsequently, the intersection between both was computed to classify each pixel within these smaller images as shown in the same figure. The count of pixels identified as mangroves was then tallied to determine the total area by summing the results from each of the smaller sections.

Analysis and results

Mangrove area and carbon sequestration

In **figure 3**, we illustrate the mangrove area situated in a portion of the northern region of Nariño on the Pacific coast, renowned for hosting the largest expanse of mangroves in the vicinity according to GMW (upper left image). The upper right image in **figure 3** presents the classification result obtained through the Random Forest algorithm we employed. The bottom panel illustrates the overlay of both images, providing a comprehensive view of the mangrove distribution as observed globally and classified by the algorithm allowing us to notice differences in the classification. The training and test accuracy over 4000 pixels in both cases was equal to 0.99.

The comparison of the Pacific and Caribbean areas based on INVEMAR data taken from **Mejía-Rentería et al.** (2018) showed that in the Pacific, the areas measured by GMW, our model for 2020, and the **INVEMAR** (2014) study are 1965.59 km², 1904.84 km², and 2302.39 km², respectively. In the Caribbean, the corresponding areas are 818.225 km², 852.00 km², and 698.94 km². The percentage differences between the Pacific and Caribbean areas are 3.1%, 4.13%, and 17.3%, respectively. Notably, we successfully achieved perceptual differences below 5%, contributing to a total mangrove area of 2756.84 km². The difference with INVEMAR (17.3%) can be attributed to the temporal gap between our study's estimates for 2020 and the INVEMAR data from 2014, likely reflecting changes in mangrove coverage over the six years.

To assess carbon sequestration, we opted for a hybrid approach, combining Tier 1 and Tier 2 methodologies. The total value was derived by multiplying the area with the experimental mangrove sequestration rate specific to each zone. This method ensures the utilization of more accurate data sourced from studies conducted in Colombia's primary mangrove zones. Additionally, it considers all forms of mangrove reserves, providing a more comprehensive assessment compared to using a generic value.

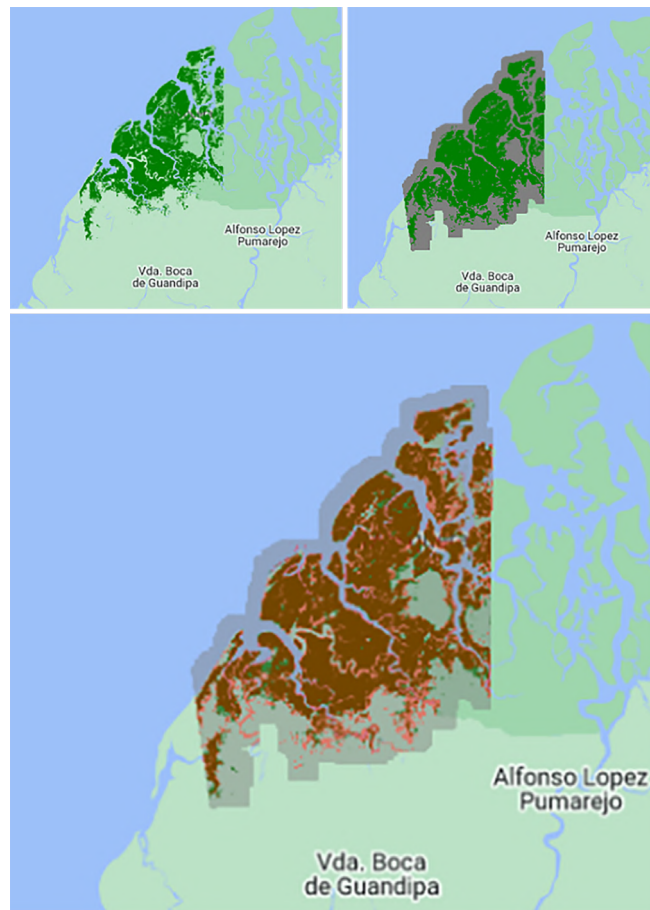


Figure 3. Comparison of different results: Global Mangrove Watch (GMW) assessment (upper left image) and our model's output (upper right image) for the mangrove area situated in a portion of the northern region of Nariño on the Pacific Coast. The bottom image illustrates the overlapping results of GMW (in green) and our model (in red), along with areas identified by both methods (in brown)

The Ciénaga Grande de Santa Marta stands as one of the largest mangrove habitats along the Colombian Caribbean coast. According to **Moreno-Muñoz (2022)** and **Perdomo-Trujillo et al. (2021)**, the mean value of total carbon stored in this mangrove forest is estimated at 328.15 ± 14.1 t/ha. In contrast, findings from a study conducted in the Pacific region of Nariño (**Moreno-Muñoz, 2022**) indicate a mean total carbon sequestration value of 359.05 ± 71.29 t/ha. It is important to note that these values used to calculate the total carbon storage on the Colombian coasts are estimates and can vary depending on the study methods, species, conservation status, and specific locations of the mangroves.

For example, our results for the Rionegro Cove region, an essential carbon reservoir and sink in the Gulf of Urabá on the Colombian Caribbean Coast, showed a mangrove area extension of 5.62 km² compared to the 3.54 km² reported by **Blanco-Libreros et al. (2015)** and the 5.17 km² according to GMW. In terms of carbon storage, our model estimated 184,420 tons, while **Blanco-Libreros et al.** reported 20,461 tons, with no data provided by GMW.

The most significant difference is in the carbon storage, which is attributed to the discrepancy in the carbon sequestration values per hectare. Specifically, while we used an estimate of 328.15 t C/ha from **Perdomo-Trujillo et al. (2021)**, **Blanco-Libreros et al. (2015)** calculated 57.8 t C/ha, resulting in a substantial difference in the final carbon stock. The primary reason for this discrepancy is that **Blanco-Libreros et al. (2015)** estimated the

value by calculating only the aboveground biomass from measurements of tree diameters at breast height and their total heights. In contrast, the value we used from **Perdomo-Trujillo *et al.* (2021)** not only includes tree measurements but also incorporates direct field measurements of soil, pneumatophores, and belowground roots.

Similarly, it is important to mention that the carbon stocks reported by **Palacios-Peñaranda *et al.* (2019)** for the Pacific region in Málaga Bay (450.26 t C/ha in belowground biomass) and the Buenaventura Bay (258.3 t C/ha in belowground biomass) closely align with the value we used from **Moreno-Muñoz (2022)**. However, when considering total carbon storage, their values ranged between 496.03 t C/ha and 728.48 t C/ha, which are higher than those considered in the present investigation. Therefore, we emphasize the significance of establishing interdisciplinary collaborations, such as collecting experimental data on-site, using satellite data classification, and leveraging artificial intelligence to enable more precise calibration of modeling approaches and a better evaluation of mangrove extent and carbon reserves. Given this information, we estimated that the total carbon storage on the Colombian coast in 2020 was $96.351,66 \pm 13.632,63$ kt.

The calculated value corresponds to $353.610,59 \pm 50.031,78$ kilotons of carbon dioxide equivalent ($353,610.59$ kt CO₂ e). For comparison, it is noteworthy that according to the World Development Indicators from the World Bank (***Total greenhouse gas emissions, kt of CO₂ equivalent, - Colombia***, n.d.), Colombia emitted 186.999 kilotons of carbon dioxide equivalent (186.999 kt CO₂ e) in 2020. It means that Colombia's mangroves can store 189 percent more CO₂ than the total CO₂ emitted by the country.

Unfortunately, as of the date of this study, we have not found suitable in-situ data to conduct a comparative study. This limitation is attributed to the recentness of the study year, the inclusion of carbon storage pools, and the specific region under examination.

It is important to clarify that mangroves store carbon in various forms, including carbon dioxide, methane, and nitrous oxide. Each of these gasses has a different global warming potential, meaning they contribute to climate change to varying degrees over a specified time frame. To compare and aggregate the climate impact of these gasses, they are often converted to a common unit, which is CO₂e. This unit expresses the amount of each gas in terms of the equivalent amount of CO₂ that would have the same global warming impact over a specific period.

Based on this information, when converted to carbon dioxide equivalent (CO₂e), the total carbon sequestered by the mangrove forest exceeds the reported carbon emissions of Colombia for 2020. The significant carbon sequestration capacity of mangrove forests underscores their crucial role in mitigating carbon emissions and climate change effects. This stark contrast highlights the imperative of preserving and protecting mangrove ecosystems due to their substantial positive environmental impact.

To assess the importance of mangroves in relation to climate change, we evaluated two scenarios of interest that are strongly dependent on the extent of mangroves in Colombian territory:

The first scenario involves considering the disappearance of mangroves in Colombia following the global rate until 2030. Based on the area reduction and the value of carbon sequestration in the territory using an average value, we estimated the amount of carbon released into the environment due to the partial disappearance of this ecosystem and its percentage contribution to the country's emissions.

The second scenario assumed that mangroves in Colombia grow in area at a constant rate equal to the global disappearance rate. Using available data, we estimated the total amount of carbon that mangroves will have sequestered between 2020 and 2030, assuming that the total carbon sequestration rate remains constant during this period.

According to The Global Mangrove Alliance (**Leal & Spalding, 2022**), between 1996 and 2010, the average loss rate was estimated at 327 km² (0.21%) per year, and it decreased to 66 km² (0.04%) per year between 2010 and 2020.

In the first scenario, considering that the mangrove area in Colombia will decrease by 0.4% by 2030, the mangrove area will have diminished by 7.62 km² for the Pacific region and 3.41 km² for the Caribbean region, resulting in a total decrease of 11.03 km² over 10 years. Consequently, considering the reduction of mangroves and assuming the same total carbon value released in each region, the total carbon released due to the reduction would be 385.41 ± 54.53 kt, whose equivalent in kilotons of carbon dioxide equivalent is 1414,44 ± 200.12 kt CO₂e.

However, in the second scenario, the total amount of carbon stored due to the growth of mangroves would be exactly the previously calculated amount of 385.41 ± 54.53 kt, reducing the emissions by 1.414,44 ± 200.12 kt CO₂e.

Our estimation indicated that mangroves play a crucial role in Colombia's efforts to mitigate greenhouse gas emissions. In 2030, mangroves are estimated to account for approximately 1.7% of the country's total carbon dioxide emissions in 2020 (*Colombia: CO₂ Country Profile*, n.d.). This calculation was based on assessing the total additional carbon sequestered by mangrove forests converted into carbon dioxide equivalent. Importantly, the total amount of carbon sequestered by mangroves exceeded the reported carbon emissions of the country for the same period. This underscores the significance of mangroves as valuable contributors to Colombia's initiatives in offsetting and reducing overall greenhouse gas emissions.

Quantification of blue carbon sinks monetary value

The blue carbon stored in mangrove ecosystems holds immense ecological and economic value, as previously mentioned. Quantifying this value provides insights into the ecosystem services provided by mangroves and can inform policy decisions and conservation efforts. In this sense, we estimated the monetary value corresponding to the blue carbon stored (blue carbon sinks).

To calculate the monetary value of blue carbon, we used the reference Carbon Pricing (CP) in the Carbon Stock Market. Carbon pricing is a climate policy approach that governments use to regulate carbon emissions and form carbon markets. But it's a pricing tool that's also available in the private sector for voluntary carbon reductions (<https://carboncredits.com>).

Assuming a value of 51 USD per ton of CO₂, we calculated the corresponding CP for 35.3610,59 ± 50.031,78 kt CO₂ emissions as follows:

Lower bound: 303.578.810 tons CO₂ × 51 USD / ton CO₂ = 15.482.519.310 USD
Upper bound: 403.642.370 tons CO₂ × 51 USD / ton CO₂ = 20.585.760.870 USD

Therefore, the CP of the 35.3610,59 ± 50.031,78 kt CO₂ would represent an average value of 18 billion USD. As a comparison, in 2023, Colombia's Gross Domestic Product (GDP) amounted to 335 billion USD according to the Departamento Administrativo Nacional de Estadística), and the nation's general budget reached 97 billion USD (Law No. 2276, November 29, 2022).

It's important to note that this is just an estimate based on the assumed CP. The actual monetary value could be higher or lower depending on various factors, such as the specific location of the emissions, the impact on different sectors of the economy, and the chosen discount rate for future costs.

Conclusions

Building upon the insights gleaned from the comprehensive analysis conducted in earlier sections, we drew the following conclusions:

Mangrove forests play a crucial role in mitigating climate change by sequestering carbon, making their conservation and sustainable management critical for environmental benefits. The comprehensive assessment of mangrove areas and their substantial carbon sequestration capacity highlights the significance of these ecosystems as valuable contributors to Colombia's initiatives to reduce overall greenhouse gas emissions by 2030.

The application of a Random Forest algorithm along the Colombian coast yielded a classification model that estimated a total mangrove area of 2.756,84 km², achieving a perceptual difference below 5% compared to the mangrove habitat extent dataset from GMW. This highlights the effectiveness of integrating remote sensing technologies with machine learning algorithms for identifying the geographical distribution of mangrove ecosystems.

Our estimation revealed that the carbon storage within mangrove forests, quantified in kilotons of carbon dioxide equivalent ($353,610.59 \pm 50,031.78$ kt CO₂e), exceeds the recorded greenhouse gas emissions of Colombia in 2020. This underscores the substantial potential of these ecosystems to sequester a significant amount of carbon and their crucial role in combating climate change.

It is important to note that various species in mangroves have different capacities for storing and capturing carbon. The sequestration values we used (t C/ha) with our mangrove extension data are estimates that helped us draw some results. However, they can vary significantly based on the specific location and conservation status of the ecosystems. It is crucial to recognize these potential discrepancies for refining our model and combining different techniques, such as collecting experimental data on-site, using satellite data classification, and leveraging artificial intelligence. Therefore, we emphasize the significance of establishing interdisciplinary collaborations to help obtain and verify data in the field. This will enable a more precise calibration of our model and a better evaluation of mangrove extent and carbon reserves.

A 0.4% reduction in mangrove area by the year 2030 could result in a substantial release of carbon into the atmosphere, estimated at $1.414,44 \pm 200,12$ kt CO₂e, potentially leading to negative environmental consequences. Conversely, directing efforts towards the conservation and growth of mangroves provides an opportunity to actively reduce an equivalent amount of carbon rather than releasing it.

The estimated Carbon Pricing of blue carbon stores in Colombia, amounting to tens of billions of dollars, underscores the immense economic significance of these natural resources, especially when considering that it is of the same order of magnitude as the general budget and the country's GDP for the year 2023.

Our study highlights the crucial role of mangroves in carbon sequestration and their potential to mitigate climate change. We successfully quantified carbon stocks across the territory, contrasting with most studies that only provide estimations for specific and smaller areas. The use of remote sensing technologies and machine learning algorithms allowed us to efficiently assess their extent and spatial distribution, and their carbon sequestration potential. Consequently, conservation and sustainable management of mangrove ecosystems are critical strides towards achieving the emissions reduction goal by 2030.

The quantification of blue carbon value underscores the multifaceted benefits of mangrove ecosystems. Beyond their ecological significance, mangroves contribute significantly to climate change mitigation efforts through carbon sequestration. By assigning a monetary value to the ecosystem services provided by mangroves, policymakers and stakeholders can better understand the trade-offs involved in mangrove conservation and land-use decisions. The estimated monetary value of blue carbon highlights the potential for financial incentives to support mangrove conservation and restoration efforts. Carbon finance mechanisms, such as carbon offset projects and payments for ecosystem services (PES) schemes, can provide funding for mangrove conservation projects while mitigating climate change.

Acknowledgments

This project predominantly evolved within the framework of the Beyond Research Program at the Faculty of Science, Universidad Nacional de Colombia.

Authors' contributions

JBO, LPAL, and VIBA oversaw the data processing and analysis and participated in text writing. SVD, MFG, JEA, and JIC established the theoretical framework, and research tasks, and contributed to the discussion and text editing. All authors reviewed and approved the final manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest associated with the research process leading to the creation of this manuscript.

References

- Blanco-Libreros, J.F., Ortiz-Acevedo, L.F., Urrego, L.E.** (2015). Reservorios de biomasa aérea y de carbono en los manglares del golfo de Urabá (Caribe colombiano). *Actualidades Biológicas*, 37(103), 131-141.
- Blanco-Libreros, J.F. & Álvarez-León, R.** (2019). Mangroves of Colombia revisited in an era of open data, global changes, and socio-political transition: Homage to Heliodoro Sánchez-Páez. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(166), 84-97.
- Bunting, P., Rosenqvist, A., Hilarides, L., Lucas, R. M., Thomas, N., Tadono, T., Worthington, T. A., Spalding, M., Murray, N. J., Rebelo, L.-M.** (2022). Global mangrove extent change 1996-2020: Global mangrove watch version 3.0. *Remote Sensing*, 14(15), 3657. <https://doi.org/10.3390/rs14153657>
- Castellanos-Galindo, G. A., Kluger, L. C., Camargo, M. A., Cantera, J., Pineda, J. E. M., Blanco-Libreros, J. F., Wolff, M.** (2021). Mangrove research in Colombia: Temporal trends, geographical coverage and research gaps. *Estuarine and Shelf Science*, 248, 106799.
- Colombia: CO2 country profile.** (n.d.). <https://ourworldindata.org/co2/country/colombia> (Accessed: November 29, 2023).
- Gupta, K., Mukhopadhyay, A., Giri, S., Chanda, A., Majumdar, S. D., Samanta, S., Mitra, D., Samal, R. N., Pattnaik, A. K., Hazra, S.** (2018). An index for discrimination of mangroves from non-mangroves using landsat 8 oli imagery. *Methods X*, 5, 1129-1139.
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., Pidgeon, E.** (2014). *Coastal blue carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses*. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature.
- IGAC, Instituto de Hidrología, von Humboldt, I. A., Invemar, Instituto de Investigaciones Científicas-Sinchi, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico.** (2007). *Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia*. Imprenta Nacional de Colombia.
- Maurya, K., Mahajan, S., Chaube, N.** (2021). Remote sensing techniques: mapping and monitoring of mangrove ecosystem—a review. *Complex & Intelligent Systems*, 7, 2797-2818.
- Leal, M. & Spalding, M. D.** (Eds.). (2022). *El estado de los manglares del mundo 2022*. Global Mangrove Alliance.
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, E. C., Schlesinger, W. H., Silliman, B. R.** (2011). A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering co 2. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552-560.
- Mejía-Rentería, J. C., Castellanos-Galindo, G. A., Cantera-Kintz, J. R., Hamilton, S. E.** (2018). A comparison of Colombian Pacific mangrove extent estimations: Implications for the conservation of a unique Neotropical tidal forest. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 212, 233-240.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.** (2022). *Bosques, biodiversidad y servicios ecosistémicos, ecosistemas estratégicos, manglares*. <https://lc.cx/rBKjLL> (Accedido el 28 de octubre de 2023)
- Moreno-Muñoz, A.S.** (2022). *Evaluación de almacenamiento de carbono azul en el ecosistema de manglar del pacífico nariñense* (Tesis de Maestría). Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
- Mutanga, O. & Kumar, L.** (2019). Google earth engine applications. *Remote Sensing*, 11(5), 591. <https://doi.org/10.3390/rs11050591>
- Palacios-Peñaranda, M. L., Cantera-Kintz, J. R., Peña-Salamanca, E. J.** (2019). Carbon stocks in mangrove forests of the Colombian Pacific. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 227, 106299.

- Perdomo-Trujillo, L. V., Mancera-Pineda, J. E., Medina-Calderón, J. H., Sánchez-Núñez, D. A., Schnetter, M. L.** (2021). Effect of restoration actions on organic carbon pools in the lagoon—Delta Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombian Caribbean. *Water*, 13 (9), 1297.
- Pérez, J. U. & Giraldo, L. E. U.** (2009). Gestión ambiental de los ecosistemas de manglar. Aproximación al caso colombiano. *Gestión y Ambiente*, 12(2), 57-71.
- Pham, T. D., Ha, N. T., Saintilan, N., Skidmore, A., Phan, D. C., Le, N. N., Viet, H. L., Takeuchi, W., Friess, D. A.** (2023). Advances in earth observation and machine learning for quantifying blue carbon. *Earth-Science Reviews*, 243, 104501.
- Pham, T. D., Yokoya, N., Bui, D. T., Yoshino, K., Friess, D. A.** (2019). Remote sensing approaches for monitoring mangrove species, structure, and biomass: Opportunities and challenges. *Remote Sensing*, 11(3), 230.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W.** (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. *NASA Special Publications*, 351(1), 309.
- Sánchez-Páez, H., Álvarez-León, R., Guevara-Mancera, O. A., Ulloa-Delgado, G.** (2000). Lineamientos estratégicos para la conservación y uso sostenible de los manglares de Colombia. *Proyecto. PD*, 171, 91.
- Selvaraj, J.J. & Pérez, B.E.G.** (2023). An enhanced approach to mangrove forest analysis in the Colombian Pacific Coast using optical and sar data in google earth engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30, 100938.
- Shi, T., Liu, J., Hu, Z., Liu, H., Wang, J., Wu, G.** (2016). New spectral metrics for mangrove forest identification. *Remote Sensing Letters*, 7(9), 885-894.
- Snedaker, S. C. & Snedaker, J. G.** (1984). *The mangrove ecosystem: research methods*. Unesco.
- Total greenhouse gas emissions, kt of co2 equivalent, - Colombia.** (n.d.). https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.GHGT.KT.CE?end=2020&locations=COnames_esc = true&start = 1990&view = chart
- Tran, T.V., Reef, R., Zhu, X.** (2022). A review of spectral indices for mangrove remote sensing. *Remote Sensing*, 14(19), 4868.
- What is blue carbon?** (n.d.). <https://www.thebluecarboninitiative.org/about>
- Xu, H.** (2006). Modification of normalized difference water index (ndwi) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033.

Artículo original

Reconstrucción de campos multivectoriales a partir del análisis de Clifford

Reconstruction of multivectorial fields in Clifford analysis

 Ricardo Abreu-Blaya^{1,4},  Juan Bory-Reyes²,  Tania Moreno-García³,
 Daniel Alfonso-Santiesteban^{1,*}

¹ Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Guerrero, México

² SEPI, ESIME-Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México

³ Departamento de Matemática, Universidad de Holguín, Cuba

⁴ Investigador Invitado, Universidad UTE, Quito, Ecuador

Resumen

El análisis de Clifford tiene muchas aplicaciones inesperadas en geometría diferencial y análisis global. Es el caso del tratamiento efectivo de las rotaciones en espacios euclidianos de alta dimensión mediante los grupos espinoriales, uno de los cuales es el grupo de Lorentz de la relatividad especial. En el presente estudio se aborda la reconstrucción de campos multivectoriales a partir del salto que estos experimentan sobre una superficie de geometría suficientemente irregular en espacios euclidianos. Además, se presentan algunos problemas de frontera para ecuaciones de Dirac de segundo orden que no quedan bien planteados si se consideran bases ortonormales diferentes a la base estándar.

Palabras clave: Análisis de Clifford; Campos multivectoriales; Operadores de Dirac; Problemas de frontera.

Abstract

The Clifford analysis has many applications in differential geometry and global analysis, such as the effective treatment of rotations in high-dimensional Euclidean spaces employing spinorial groups, where a particular example is the Lorentz group of special relativity. Here we approach the reconstruction of multivectorial fields from the jump occurring when they go through a surface of sufficiently irregular geometry in Euclidean spaces. Additionally, we show some boundary value problems for second-order Dirac equations that are not well posed if orthonormal bases different from the standard base are considered.

Keywords: Clifford analysis; Multivectorial fields; Dirac operators; Boundary value problems.

Citación: Ricardo Abreu-Blaya, *et al.* Reconstrucción de campos multivectoriales a partir del análisis de Clifford. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(188):671-686, julio-septiembre de 2024. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2644>

Editor: Carolina Benedetti Velásquez

***Correspondencia:**

Daniel Alfonso-Santiesteban;
danielalfonso950105@gmail.com

Recibido: 25 de junio de 2024

Aceptado: 26 de junio de 2024

Publicado en línea: 5 de agosto de 2024



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

Introducción

El matemático y filósofo inglés William Kingdon Clifford (1845-1879) introdujo las álgebras que llevan su nombre, las cuales pueden ser entendidas como una generalización multidimensional de los números complejos y los cuaternios de Hamilton (Clifford, 1878). Estas constituyen un tipo de álgebras asociativas que se caracterizan por sus importantes aplicaciones en una gran variedad de campos que incluyen la geometría y la física teórica. Las álgebras de Clifford constituyen un caso especial de las álgebras geométricas, que permiten la manipulación algebraica de nociones geométricas usadas actualmente en la física-matemática.

El estudio de las propiedades locales de las funciones pertenecientes al núcleo del operador de Dirac sobre un fibrado espinorial ha conducido a una teoría de funciones, comúnmente conocida como análisis de Clifford. Dichas funciones que anulan a este operador son llamadas: funciones monogénicas. El análisis de Clifford ha probado ser un medio eficaz para abordar problemas de contorno en espacios euclidianos de altas dimensiones.

Algunos de los resultados pioneros sobre análisis de Clifford fueron reportados por Moisil y Théodoresco (**Moisil & Theodoresco**, 1931), Fueter (**Fueter**, 1935), Iftimie (**Iftimie**, 1965), Hestenes (**Hestenes**, 1968) y Delanghe (**Delanghe**, 1970).

Las bases del análisis de Clifford fueron desarrolladas por Richard Delanghe, académico de la Universidad de Gante, Bélgica, quien es autor (junto con sus discípulos Fred Brackx y Frank Sommen) del primer libro publicado sobre el tema en 1982 (**Brackx, Delanghe, & Sommen**, 1982). Para el lector interesado en profundizar sobre los fundamentos y las aplicaciones de esta teoría de funciones recomendamos las referencias (**Delanghe, Sommen, & Souček**, 1992; **Gilbert & Murray**, 1991; **Gilbert & Buchanan**, 1983; **Gürlebeck, Habetha, & Sprössig**, 2007; **Gürlebeck & Sprössig**, 1990, 1997; **Kravchenko & Shapiro**, 1996; **Mitrea**, 1994; **Obolashvili**, 2002; **Rocha-Chávez, Shapiro, & Sommen**, 2001; **Wen, Sha, & Yu-Ying**, 2005).

El desarrollo alcanzado por el análisis de Clifford es evidenciado por los cientos de artículos publicados cada año en diversas revistas científicas de alta calidad e indexadas en las principales base de datos de consulta mundial. Algunos artículos introductorios a los rudimentos básicos del análisis de Clifford, los cuales incluyen notas históricas, son (**Cnops & Malonek**, 1997; **Delanghe**, 2001; **Delanghe & Reyes**, 2003; **Reséndis & Shapiro**, 2002; **Ryan**, 2000, 2004; **Sommen & Sprössig**, 2002; **Sprössig**, 2002; **Sudbery**, 1979).

La reconstrucción de una función monogénica a partir del salto que esta experimenta en una superficie (Problema del Salto), es un problema estrechamente ligado a la geometría de dicha superficie y clásicamente ha sido resuelto con ayuda de la transformada de Cauchy. La presencia del vector normal a la superficie en esta integral ha obligado a considerar, a priori, un conjunto de suposiciones de suavidad.

Estas restricciones pueden ser eliminadas, si el vector normal usual es reemplazado por el llamado vector normal de Federer (**Federer**, 1969), lo cual permite resolver varios problemas de reconstrucción de soluciones de sistemas diferenciales parciales a partir de sus singularidades, sin hacer suposiciones de suavidad. Esta posibilidad abre el camino hacia la investigación de las restricciones mínimas sobre la superficie y las clases de funciones permitidas para dar solución a dichos problemas de reconstrucción.

En este sentido, se han logrado extender satisfactoriamente el formalismo de la transformada de Cauchy a ciertas clases de superficies no rectificables e incluso fractales. El caso de superficies fractales ha sido obviado por muchos autores (debido a su complejidad) y la propuesta de solución emplea la transformada de Théodoresco en lugar de la de Cauchy, lo cual constituye una extensión del método propuesto por Boris Kats en el caso del plano complejo (**Kats**, 1983) al ámbito multidimensional.

El presente trabajo tiene como propósito presentar un recorrido por algunos de los principales resultados que en el tema han sido obtenidos por los autores. La lista de referencias contiene adicionalmente algunos de los trabajos relacionados y no pretende de ningún modo estar completa. Los métodos de investigación utilizados en el desarrollo de este trabajo estuvieron determinados por los objetivos y las tareas de investigación. A nivel teórico se emplearon los métodos: histórico-lógico, análisis y síntesis, inducción y deducción, y a nivel empírico: el experimental y la modelación; todos de gran utilidad en el estudio de fuentes de información y en el procesamiento de los fundamentos científicos. Se hace necesario el uso de un cuerpo teórico enfocado a la resolución de este tipo de problemas. Debido a su extensión se explicarán a grandes rasgos algunos conceptos pertinentes.

1 Álgebras de Clifford, de Pauli y de Dirac

Denotemos por $\mathbb{R}^{p,q}$ al espacio \mathbb{R}^m junto con la forma cuadrática

$$Q(x) = x_1^2 + \dots + x_p^2 - x_{p+1}^2 - \dots - x_{p+q}^2, \quad p + q = m.$$

A los espacios $\mathbb{R}^{m,0}$ se les llama espacios euclidianos, y a los $\mathbb{R}^{0,m}$ anti euclidianos. En particular, $\mathbb{R}^{1,3}$ es el espacio-tiempo de Minkowski, el cual está muy presente en la teoría especial de la relatividad de Einstein.

El álgebra de Clifford universal $\mathbb{R}_{p,q}$ es el álgebra asociativa con identidad $e_0 = 1$ tal que:

- (1) $\mathbb{R}_{p,q}$ contiene copias de \mathbb{R} y \mathbb{R}^m como subespacios.
- (2) Para todo $x \in \mathbb{R}^m$, $x^2 = Q(x)$.
- (3) $\mathbb{R}_{p,q}$ es generada como álgebra real por las copias de \mathbb{R} y \mathbb{R}^m .
- (4) La dimensión de $\mathbb{R}_{p,q}$ es 2^m .

Algunos ejemplos elementales son:

- \mathbb{R} es el álgebra de Clifford $\mathbb{R}_{0,0}$ y $\mathbb{R}_{1,0}$,
- \mathbb{C} es el álgebra de Clifford $\mathbb{R}_{0,1}$,
- \mathbb{H} es el álgebra de Clifford $\mathbb{R}_{0,2}$.

En particular, si $\{e_1, \dots, e_p, e_{p+1}, \dots, e_m\}$ es la base ortonormal para $\mathbb{R}^{p,q}$, entonces

$$e_i^2 = \begin{cases} 1 & i = 1, \dots, p \\ -1 & i = p + 1, \dots, m \end{cases}$$

y

$$e_i e_j + e_j e_i = 0, \quad i \neq j.$$

Una base para $\mathbb{R}_{p,q}$ se obtiene a través del sistema

$$\{e_A = e_{\alpha_1} \cdots e_{\alpha_h} : A = \{\alpha_1, \dots, \alpha_h\}, 1 \leq \alpha_1 < \dots < \alpha_h \leq m\}.$$

Sea $\mathbb{R}_{p,q}^k = \text{Span}_{\mathbb{R}}(e_A : |A| = k)$. Entonces $\mathbb{R}_{p,q}^k$ es un subespacio de $\mathbb{R}_{p,q}$ - el espacio de los k -vectores- y

$$\mathbb{R}_{p,q} = \sum_{k=0}^m \oplus \mathbb{R}_{p,q}^k.$$

Note que cualquier $a \in \mathbb{R}_{p,q}$ puede escribirse de forma única como

$$a = [a]_0 + [a]_1 + \dots + [a]_m, \tag{1}$$

donde $[\cdot]_k$ denota la proyección de $\mathbb{R}_{p,q}$ en $\mathbb{R}_{p,q}^k$. Algunas observaciones necesarias son las siguientes:

- (1) $\mathbb{R}_{p,q}^0$ es el subespacio 1-dimensional de 0-vectores, se identifica con \mathbb{R} y sus elementos son por eso llamados escalares.
- (2) $\mathbb{R}_{p,q}^1$ es el subespacio m -dimensional de 1-vectores. Puede identificarse con $\mathbb{R}^{p,q}$ y sus elementos son llamados vectores.
- (3) $\mathbb{R}_{p,q}^2$ es el subespacio $\binom{m}{2}$ -dimensional de 2-vectores, los cuales son también llamados bivectores.
- (4) $\mathbb{R}_{p,q}^m$ es el subespacio 1-dimensional de m -vectores, también llamados pseudoescalares.

Así mismo podemos descomponer $\mathbb{R}_{p,q}$ en la suma directa

$$\mathbb{R}_{p,q} = \mathbb{R}_{p,q}^+ \oplus \mathbb{R}_{p,q}^-$$

con

$$\mathbb{R}_{p,q}^+ = \sum_{k \text{ par}} \oplus \mathbb{R}_{p,q}^k$$

y

$$\mathbb{R}_{p,q}^- = \sum_{k \text{ impar}} \oplus \mathbb{R}_{p,q}^k.$$

El subespacio $\mathbb{R}_{p,q}^+$ es también un álgebra conocida como la subálgebra par de $\mathbb{R}_{p,q}$ y es isomorfa al álgebra de Clifford universal $\mathbb{R}_{p-1,q} \circ \mathbb{R}_{p,q-1}$.

Un hecho que pone de manifiesto la importancia del formalismo de las álgebras de Clifford es que muchas álgebras que aparecieron por diferentes razones geométricas y físicas son casos particulares de estas y, lo que es aún más significativo, este formalismo permite esclarecer las relaciones entre estas álgebras. Por ejemplo, el álgebra de Dirac es precisamente el álgebra de Clifford universal $\mathbb{R}_{1,3}$ construida sobre el espacio-tiempo de Minkowski $\mathbb{R}^{1,3}$. Así mismo, el álgebra de Pauli es el álgebra de Clifford universal $\mathbb{R}_{3,0}$ sobre el espacio euclidiano 3-dimensional $\mathbb{R}^{3,0}$. Es conocido que estas álgebras surgieron inspiradas en la mecánica cuántica.

El álgebra de Pauli es realmente la subálgebra par del álgebra de Dirac. Los cuaternios de Hamilton son el álgebra par del álgebra de Pauli, mientras que los números complejos son la subálgebra par de los cuaternios.

En lo que resta de este material nosotros prestaremos especial atención a las álgebras de Clifford $\mathbb{R}_{0,m}$.

2 Nociones básicas de análisis de Clifford

El análisis de Clifford estudia las funciones $u : \mathbb{R}^m \mapsto \mathbb{R}_{0,m}$ que pertenecen al núcleo del operador de Dirac

$$\mathcal{D} := \sum_{i=1}^m e_i \frac{\partial}{\partial x_i}.$$

Este operador es una extensión natural al espacio \mathbb{R}^m del operador complejo de Cauchy-Riemann $\frac{\partial}{\partial \bar{z}}$. Las funciones $u : \mathbb{R}^m \mapsto \mathbb{R}_{0,m}$ que en algún abierto $\Omega \subset \mathbb{R}^m$ satisfacen la ecuación

$$\mathcal{D}u = 0 \tag{2}$$

se dicen monogénicas a la izquierda en Ω . Debido a la no conmutatividad, la ecuación

$$u\mathcal{D} = 0 \tag{3}$$

es esencialmente diferente a la ecuación (2) y sus soluciones son llamadas: monogénicas a la derecha. Es fácil ver que el operador \mathcal{D} factoriza al operador de Laplace Δ en \mathbb{R}^m ($\mathcal{D}^2 = -\Delta$). Esto significa que las funciones monogénicas son también armónicas, es decir soluciones de la ecuación de Laplace. Por este hecho se concibe al análisis de Clifford como un refinamiento del clásico análisis armónico.

Una diferencia notable entre el análisis complejo y el análisis de Clifford radica en que, a diferencia del caso complejo, el producto de funciones monogénicas no es necesariamente una función monogénica. Esto es una consecuencia analítica de la no conmutatividad del producto cliffordiano.

Un ejemplo importante de función monogénica es el conocido núcleo de Cauchy hipercomplejo:

$$E(x) := \frac{1}{A_m} \frac{-x}{|x|^m}, \quad x \in \mathbb{R}^m \setminus \{0\},$$

donde A_m denota el área superficial de la esfera unitaria en \mathbb{R}^m . Esta función juega un papel análogo al núcleo de Cauchy complejo

$$\frac{1}{2\pi} \frac{1}{z}.$$

Por otro lado, $E(x)$ permite definir las transformadas de Cauchy y de Hilbert cliffordianas que resultan ser herramientas imprescindibles en el estudio de los valores de frontera de las funciones monogénicas.

Precisamente

$$(\mathcal{C}_\Gamma u)(x) := \int_\Gamma E(y-x) \vec{n}(y) u(y) dy, \quad x \notin \Gamma,$$

$$(\mathcal{S}_\Gamma u)(x) := 2 \int_\Gamma E(y-x) \vec{n}(y) (u(y) - u(x)) dy + u(x), \quad x \in \Gamma,$$

siendo $\vec{n}(y)$ el vector normal exterior a Γ en y .

La ecuación (2) contiene una serie de casos particulares de gran importancia en las ciencias físicas.

Las funciones u definidas en \mathbb{R}^3 con valores en $\mathbb{R}_{0,2}$ son de la forma

$$u = u_0 + \vec{u}.$$

Para estas funciones, la ecuación (2) toma la forma

$$\mathcal{D}(u_0) + \mathcal{D}(\vec{u}) = 0.$$

Separando las partes escalares y vectoriales, es fácil verificar que la ecuación anterior equivale al sistema

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{u} = 0, \\ \nabla u_0 + \nabla \times \vec{u} = 0. \end{cases}$$

En el caso de que u sea un campo vectorial, es decir $u_0 = 0$, entonces el sistema anterior describe un fluido irrotacional sin fuentes ni sumideros, el cual es de importancia vital en la dinámica de fluidos (**Kravchenko**, 2003; **Kravchenko & Shapiro**, 1996).

Pasemos ahora a considerar los campos vectoriales $u = F$ en \mathbb{R}^m . En este caso, la ecuación (2) se escribe como

$$\mathcal{D}F = \mathcal{D} \bullet F + \mathcal{D} \wedge F = 0,$$

donde

$$\mathcal{D} \bullet F := \frac{1}{2} (\mathcal{D}F + F\mathcal{D})$$

y

$$\mathcal{D} \wedge F := \frac{1}{2} (\mathcal{D}F - F\mathcal{D}).$$

En virtud de las propiedades del producto interior “ \bullet ” y exterior “ \wedge ” se obtiene el sistema equivalente

$$\begin{cases} \mathcal{D} \bullet F = 0, \\ \mathcal{D} \wedge F = 0, \end{cases}$$

conocido como sistema de Riesz.

Para los campos k -vectoriales F_k se obtiene análogamente el sistema

$$\begin{cases} \mathcal{D} \bullet F_k = 0, \\ \mathcal{D} \wedge F_k = 0, \end{cases} \tag{4}$$

y en este caso

$$\mathcal{D} \bullet F_k := \frac{1}{2}(\mathcal{D}F_k - (-1)^k F_k \mathcal{D})$$

y

$$\mathcal{D} \wedge F_k := \frac{1}{2}(\mathcal{D}F_k + (-1)^k F_k \mathcal{D}).$$

Las soluciones del sistema (4) se denominan campos armónicos o de Stein-Weyl. Es interesante señalar que, identificando el campo k -vectorial

$$F_k = \sum_{|A|=k} F_{k,A} e_A$$

con la forma diferencial

$$\omega_k = \sum_{|A|=k} F_{k,A} dx_A,$$

entonces el sistema (4) es equivalente al conocido sistema de Hodge-de Rham

$$\begin{cases} d\omega_k = 0, \\ d^* \omega_k = 0, \end{cases}$$

de gran importancia en la teoría de homología.

El campo electromagnético puede ser escrito como un bivector simple F_2 en el álgebra de Dirac. De esta forma las ecuaciones de Maxwell libre de fuentes admiten la forma simple

$$\mathcal{D}F = 0.$$

Esta ecuación de ondas electromagnéticas es la misma que la ecuación de Dirac para el neutrino.

3 Problema de reconstrucción desde condiciones de salto

En esta sección nos proponemos estudiar los valores de frontera de campos multivectoriales armónicos y funciones monogénicas para el caso en que la frontera sea fractal. En términos físicos, los problemas abordados responden a la siguiente problemática:

Dado el campo electromagnético sobre una superficie cerrada en una región del espacio libre de fuentes, ¿es posible reconstruir dicho campo en la región encerrada por dicha superficie?

Pasemos a la formulación matemática de estos problemas:

Sea Ω un dominio de Jordan de \mathbb{R}^m con frontera fractal Γ y sea u una función Hölder continua con exponente $\alpha \in (0, 1]$, definida en Γ y con valores en $\mathbb{R}_{0,m}$, por brevedad escribiremos $u \in C^{0,\alpha}(\Gamma)$.

También la notación temporal $\Omega^+ = \Omega$, $\Omega^- = \mathbb{R}^m \setminus \overline{\Omega^+}$ será necesaria. Asumiremos la monogenicidad por el lado izquierdo. Resultados análogos se obtienen para cuando se tiene monogenicidad a la derecha.

I) (Problema del Salto) ¿Bajo qué condiciones u admite la descomposición

$$u = U^+ + U^-, \tag{5}$$

donde las funciones U^+ y U^- son monogénicas en Ω^+ y Ω^- respectivamente?

II) ¿Bajo qué condiciones u es la traza sobre Γ de una función monogénica en Ω^+ ? El mismo problema para Ω^- .

Sea $F_k \in C^{0,\alpha}(\Gamma)$ un campo multivectorial con valores en $\mathbb{R}_{0,m}^{(k)}$.

III) (Problema de Dynkin) ¿Bajo qué condiciones F_k admite la descomposición

$$F_k = F_k^+ + F_k^-, \tag{6}$$

donde F_k^+ y F_k^- son campos k -vectoriales armónicos en Ω^+ y Ω^- respectivamente?

IV) ¿Bajo qué condiciones F_k es la traza sobre Γ de un campo k -vectorial armónico en Ω^+ ? El mismo problema para Ω^- .

En (Kats, 1983) se presenta un método para resolver el problema del salto en el plano complejo, el cual no usa la integración sobre la frontera y puede ser utilizado sobre curvas no rectificables y fractales. Un análogo multidimensional de este método apareció poco después en el contexto del análisis cuaterniónico (Blaya, 1999; Blaya & Reyes, 1999). Siguiendo esta línea, también es posible una generalización del método para $m > 2$.

El problema del salto (5) en tales condiciones fue considerado en (Blaya, Reyes, & Peña, 2007), donde se prueba que para $u \in C^{0,\alpha}(\Gamma)$, cuando el exponente de Hölder α y la dimensión de Minkowski $\mathbf{m} := \dim_M(\Gamma)$ de la superficie Γ satisfacen la relación

$$\alpha > \frac{\mathbf{m}}{m}, \tag{7}$$

entonces una solución de (5) está dada por las fórmulas

$$U^+(x) = u^w(x) + \mathcal{T}_\Omega \mathcal{D}_x u^w(x),$$

$$U^-(x) = \mathcal{T}_\Omega \mathcal{D}_x u^w(x),$$

donde \mathcal{T}_Ω es la transformada de Théodoresco

$$\mathcal{T}_\Omega v(x) = \int_\Omega E(y-x)v(y)dy. \tag{8}$$

En caso de que la condición (7) se viole, entonces se puede construir un ejemplo de superficie Γ con $\dim_M(\Gamma) = \mathbf{m}$ y una función $u \in C^{0,\alpha}(\Gamma)$ tal que el problema del salto no tenga solución. Por tanto, la condición (7) es inmejorable. Remitimos al lector a consultar: (Blaya, Reyes, & García, 2006, Sección 5) y (Blaya, García, & Reyes, 2012), donde se construye el ejemplo antes mencionado. En lo que sigue asumiremos siempre que α y \mathbf{m} están vinculados por la relación (7).

Si Γ es una frontera suficientemente “regular”, entonces la condición clásica $\mathcal{S}_\Gamma u = u$ ($\mathcal{S}_\Gamma u = -u$) es necesaria y suficiente para que u sea la traza de una función monogénica en Ω^+ (respectivamente Ω^-). Pero si Γ es fractal, entonces el operador \mathcal{S}_Γ pierde su significado usual y sin embargo el problema II sigue teniendo sentido. Denotaremos por $\mathcal{M}(\Omega)$ al espacio de funciones monogénicas a la izquierda en Ω .

El siguiente teorema da una alternativa de solución para el problema II utilizando la herramienta de la transformada de Théodoresco (8) (Blaya, Reyes, & García, 2006).

Teorema 3.1 Si $u \in C^{0,\alpha}(\Gamma)$ es la traza de $U \in C^{0,\alpha}(\Omega_+ \cup \Gamma) \cap \mathcal{M}(\Omega^+)$, entonces

$$\mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x u^w(x)|_{\Gamma} = 0. \tag{9}$$

Recíprocamente, si (9) se cumple, entonces u es la traza de una función $U \in C^{0,\mu}(\Omega_+ \cup \Gamma) \cap \mathcal{M}(\Omega^+)$, para algún $\mu < \alpha$.

Demostración: Sea U^w una extensión de Whitney de $U \in C^{0,\alpha}(\Omega \cup \Gamma)$. Es un simple ejercicio comprobar que U^w será también una extensión de Whitney para $u = U|_{\Gamma}$.

Entonces

$$\mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x u^w(x) = \mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x U^w(x), \quad x \in \Omega^-. \tag{10}$$

Teniendo en cuenta que $U = U^w|_{\Omega^+}$ es monogénica, se obtiene que

$$\mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x u^w(x) = 0 \text{ en } \Omega^-,$$

lo que a su vez implica ahora (9).

La afirmación recíproca se deduce tomando

$$U(x) = u^w(x) + \mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x u^w(x).$$

□

Para Ω^- se obtiene el siguiente resultado análogo.

Teorema 3.2 Si $u \in C^{0,\alpha}(\Gamma)$ es la traza de $U \in C^{0,\alpha}(\Omega^- \cup \Gamma) \cap \mathcal{M}(\Omega^-)$, y $U(\infty) = 0$, entonces

$$\mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x u^w(x)|_{\Gamma} = -u(x). \tag{11}$$

Recíprocamente, si (11) se cumple, entonces u es la traza de una función $U \in C^{0,\mu}(\Omega^- \cup \Gamma) \cap \mathcal{M}(\Omega^-)$ y $U(\infty) = 0$, para algún $\mu < \alpha$.

Observación 3.1 Bajo la condición (9) ((11)) $u^w + \mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x u^w$ (respectivamente $\mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x u^w$) es una extensión monogénica de u a Ω^+ (respectivamente a Ω^-) que pertenece a $C^{0,\mu}(\Omega^+ \cup \Gamma)$ (respectivamente a $C^{0,\mu}(\Omega^- \cup \Gamma)$) para todo

$$\mu < \frac{m\alpha - \mathbf{m}}{m - \mathbf{m}}.$$

Es posible obtener resultados para el caso de funciones monogénicas a la derecha (i.e., $uD=0$). Para ello basta remplazar $\mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x u^w|_{\Gamma}$ por $u^w \mathcal{D}_x \mathcal{T}_{\Omega^+}|_{\Gamma}$ en (9) y (11) donde para una función v con valores en $\mathbb{R}_{0,m}$ se define

$$v \mathcal{T}_{\Omega}(x) := - \int_{\Omega} v(y) E(y-x) dy.$$

Teorema 3.3 Si $U \in C^{0,\alpha}(\Omega^+ \cup \Gamma) \cap \mathcal{M}(\Omega^+)$ tiene la traza $u := U|_{\Gamma}$, entonces las siguientes afirmaciones son equivalentes:

- (i) U es monogénica a ambos lados en Ω^+ .
- (ii) $\mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x u^w|_{\Gamma} = u^w \mathcal{D}_x \mathcal{T}_{\Omega^+}|_{\Gamma}$.

Demostración: La demostración de que (i) implica (ii) se deduce directamente del teorema 3.1 y de su versión para la monogenicidad a la derecha.

Supongamos que (ii) se cumple. Como U es monogénica a la izquierda en Ω^+ , entonces por teorema 3.1 tenemos

$$\mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x u^w|_{\Gamma} = u^w \mathcal{D}_x \mathcal{T}_{\Omega^+}|_{\Gamma} = 0.$$

La segunda igualdad implica la existencia de una función U^* monogénica a la derecha en Ω^+ y tal que $U^*|_{\Gamma} = u$. Pongamos $w = U - U^*$, entonces $\Delta w = 0$ en Ω^+ y $w|_{\Gamma} = 0$. Por la solución del problema clásico de Dirichlet concluimos que $U = U^*$ en Ω^+ , lo cual significa que U es monogénica a ambos lados en Ω^+ . \square

Estamos en condiciones de considerar los problemas (III) y (IV).

Teorema 3.4 *Sea $F_k \in C^{0,\alpha}(\Gamma)$ un campo k -vectorial. Si $\mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x F_k^w|_{\Gamma}$ es k -vectorial, es decir, si*

$$[\mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x F_k^w|_{\Gamma}]_{k\pm 2} = 0, \tag{12}$$

entonces el problema (III) es soluble.

Demostración: A partir de la solución del problema del salto tenemos que las funciones $F^+ := F_k^w + \mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x F_k^w$ y $F^- := \mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x F_k^w$ son monogénicas en Ω^+ y Ω^- respectivamente, y tales que sobre Γ

$$F^+ - F^- = F_k.$$

Además, de las condiciones (12) se deduce que

$$\begin{cases} \Delta[F^{\pm}]_{k\pm 2} = 0, & \text{en } \Omega_{\pm}, \\ [F^{\pm}]_{k\pm 2}|_{\Gamma} = 0. \end{cases}$$

Entonces, por la solución del problema clásico de Dirichlet tenemos

$$[F^{\pm}]_{k\pm 2} \equiv 0, \text{ en } \Omega_{\pm},$$

es decir, las funciones F^{\pm} son campos k -vectoriales armónicos en Ω_{\pm} . \square

Los teoremas 3.1 y 3.4 conducen a una respuesta para el problema (IV):

Teorema 3.5 *Sea $F_k \in C^{0,\alpha}(\Gamma)$. Si F_k es la traza de un campo k -vectorial en $C^{0,\alpha}(\Omega^+ \cup \Gamma)$ y armónico en Ω^+ , entonces*

$$\mathcal{T}_{\Omega^+} \mathcal{D}_x F_k^w|_{\Gamma} = 0. \tag{13}$$

Recíprocamente, si (13) se cumple, entonces F_k es la traza de un campo k -vectorial en $C^{0,\mu}(\Omega^+ \cup \Gamma)$, $\mu < \alpha$, y armónico en Ω^+ .

En la siguiente sección se abordarán algunos problemas de frontera que involucran operadores de Dirac iterados para campos k -vectoriales.

4 Problemas de frontera para ecuaciones de Dirac de segundo orden

Las funciones inframonogénicas surgen específicamente en las álgebras de Clifford como soluciones a la siguiente versión no conmutativa de la ecuación de Laplace:

$$\mathcal{D}u\mathcal{D} = 0. \tag{14}$$

Tales funciones fueron originalmente definidas en (Malonek, Peña, & Sommen, 2010), donde se encontró una descomposición de Fischer mediante polinomios inframonogénicos. Varios matemáticos se han interesado en su estudio por su estrecha conexión con temas afines de la Elasticidad Lineal, como es el caso del sistema de Lamé-Navier. Remitimos al lector a consultar los trabajos: (Dinh, 2021; García, Santiesteban, & Blaya, 2023; García et al., 2018; Láviccka, 2011; Wang et al., 2022).

En el contexto del cálculo vectorial, cuando nos restringimos a considerar soluciones vectoriales $u = \vec{u}$ en \mathbb{R}^3 , la ecuación (14) puede ser reescrita en la forma

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{u}) + \nabla \times (\nabla \times \vec{u}) = 0. \tag{15}$$

Por otro lado, note que la ecuación de Laplace también puede ser reescrita como

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{u}) - \nabla \times (\nabla \times \vec{u}) = 0. \quad (16)$$

Ese pequeño cambio de signo en (15) y (16) provoca que las ecuaciones sean bien diferentes en muchos aspectos que nos interesan. El laplaciano es un operador fuertemente elíptico, mientras que el operador vectorial $\nabla(\nabla \cdot) + \nabla \times (\nabla \times)$ y su análogo cliffordiano $\mathcal{D}(\cdot)\mathcal{D}$ no lo son. Esta sutileza implica que no podemos, en general, asegurar la unicidad de la solución del problema de Dirichlet asociado a estos operadores.

En 1992 Dzhuraev estudió dos problemas de frontera para la ecuación

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{u}) + \nabla \times (\nabla \times \vec{u}) = \vec{f}(x) \quad (17)$$

en un dominio acotado $G \subset \mathbb{R}^3$, donde \vec{f} denota una función vectorial suave fija. Dichos problemas, a diferencia del problema de Dirichlet, sí se comportaban bien planteados en el sentido de Hadamard (Dzhuraev, 1992). Las condiciones sobre la frontera para el primero de estos problemas eran las siguientes:

$$(\vec{u} \times \vec{n})|_{\Gamma} = 0, \quad (\nabla \cdot \vec{u})|_{\Gamma} = 0, \quad (18)$$

mientras que para el segundo se exigía que

$$(\vec{u} \cdot \vec{n})|_{\Gamma} = 0, \quad (\nabla \times \vec{u})|_{\Gamma} = 0. \quad (19)$$

Aquí \vec{n} denota el vector normal unitario y exterior sobre Γ , siendo Γ la frontera del dominio G . Dzhuraev obtuvo que las soluciones a ambos problemas estaban dadas mediante operadores integrales compactos sobre el espacio $L^p(G)$, con $p > 1$.

En (Santiesteban, Blaya, & Reyes, 2023) estos problemas fueron generalizados a espacios euclidianos de mayor dimensión usando el lenguaje del análisis de Clifford. Por lo que se ha constatado entonces, una generalización de la ecuación (17) para campos k -vectoriales es de la siguiente forma:

$$\mathcal{D}F_k\mathcal{D} = f_k. \quad (20)$$

Los problemas estudiados en (Santiesteban, Blaya, & Reyes, 2023) fueron:

- (Problema A) Encontrar todas las soluciones de (20) en $C^2(\Omega) \cap C^1(\overline{\Omega})$ satisfaciendo las condiciones de frontera

$$(\vec{n} \wedge F_k)|_{\partial\Omega} = 0, \quad (\mathcal{D} \bullet F_k)|_{\partial\Omega} = 0. \quad (21)$$

- (Problema B) Encontrar todas las soluciones de (20) en $C^2(\Omega) \cap C^1(\overline{\Omega})$ satisfaciendo las condiciones de frontera

$$(\vec{n} \bullet F_k)|_{\partial\Omega} = 0, \quad (\mathcal{D} \wedge F_k)|_{\partial\Omega} = 0. \quad (22)$$

Una observación importante es que el operador $\mathcal{D}(\cdot)\mathcal{D}$ se comporta como el laplaciano sobre campos escalares y pseudoescalares, y como consecuencia los problemas A y B se convierten en problemas para la ecuación de Poisson con una condición de tipo Dirichlet o Neumann. Es por ello que en (Santiesteban, Blaya, & Reyes, 2023) solo se trataron los casos cuando $1 \leq k \leq m - 1$.

Para la obtención de un resultado como el logrado por Dzhuraev (Dzhuraev, 1992), los autores en (Santiesteban, Blaya, & Reyes, 2023) tuvieron que probar ciertos resultados auxiliares como una fórmula de Borel-Pompeiu y una descomposición de tipo Helmholtz-Hodge. Ellos generalizaron el clásico resultado de que un campo vectorial suave es únicamente determinado cuando se conocen su divergencia y rotacional sobre el dominio, así como la

componente normal o tangencial sobre la frontera. Sugerimos al lector que consulte (**Santiesteban, Blaya, & Reyes, 2023**, Teorema 4, pág. 15790), el cual plantea que un campo k -vectorial suave $F_k \in C^1(\Omega)$ es únicamente determinado cuando $\mathcal{D} \bullet F_k$ y $\mathcal{D} \wedge F_k$ son dados en Ω , como también $\vec{n} \bullet F_k$ o $\vec{n} \wedge F_k$ sobre la frontera.

Una de las tantas bondades del análisis de Clifford es que permite reescribir y factorizar muchas ecuaciones diferenciales a formas realmente bellas. Haciendo uso de los productos interior y exterior del operador de Dirac con el campo k -vectorial, la ecuación (20) toma la siguiente forma:

$$(-1)^k (\mathcal{D} \bullet \mathcal{D} \wedge F_k - \mathcal{D} \wedge \mathcal{D} \bullet F_k) = f_k. \tag{23}$$

Gracias a esta reescritura podemos resolver los problemas anteriores analizando problemas de frontera para sistemas de primer orden. Los siguientes lemas son fundamentales.

Lema 4.1 Si $F_k(x)$ es la solución del Problema A, entonces las funciones $\varphi(x) = \mathcal{D} \wedge F_k(x)$ y $\psi(x) = \mathcal{D} \bullet F_k(x)$ serán la solución en Ω del sistema

$$\mathcal{D} \wedge \psi(x) - \mathcal{D} \bullet \varphi(x) = (-1)^{k+1} f_k(x), \quad \mathcal{D} \bullet \psi(x) = 0, \quad \mathcal{D} \wedge \varphi(x) = 0, \tag{24}$$

satisfaciendo las condiciones de frontera

$$\psi|_{\partial\Omega} = 0, \quad (\vec{n} \wedge \varphi)|_{\partial\Omega} = 0 \tag{25}$$

y la condición integral

$$\int_{\Omega} \varphi(x) dx = 0. \tag{26}$$

Inversamente, si φ y ψ son las soluciones en $C^1(\Omega) \cap C(\overline{\Omega})$ del sistema (24), satisfaciendo (25) o (25)-(26) cuando $k = m - 1$, entonces el campo k -vectorial $F_k \in C^1(\Omega) \cap C(\overline{\Omega})$, satisfaciendo en Ω el sistema

$$\mathcal{D} \bullet F_k(x) = \psi(x), \quad \mathcal{D} \wedge F_k(x) = \varphi(x), \tag{27}$$

con

$$(\vec{n} \wedge F_k)|_{\partial\Omega} = 0, \tag{28}$$

será la solución del Problema A.

Lema 4.2 Si $F_k(x)$ es la solución del Problema B, entonces las funciones $\varphi(x) = \mathcal{D} \wedge F_k(x)$ y $\psi(x) = \mathcal{D} \bullet F_k(x)$ serán la solución en Ω del sistema (24) satisfaciendo las condiciones de frontera

$$\varphi|_{\partial\Omega} = 0, \quad (\vec{n} \bullet \psi)|_{\partial\Omega} = 0 \tag{29}$$

y la condición integral

$$\int_{\Omega} \psi(x) dx = 0. \tag{30}$$

Inversamente, si φ y ψ son las soluciones en $C^1(\Omega) \cap C(\overline{\Omega})$ del sistema (24), satisfaciendo (29) o (29)-(30) cuando $k = 1$, entonces el campo k -vectorial $F_k \in C^1(\Omega) \cap C(\overline{\Omega})$, satisfaciendo en Ω el sistema (27) con

$$(\vec{n} \bullet F_k)|_{\partial\Omega} = 0, \tag{31}$$

será la solución del Problema B.

Las demostraciones de los anteriores lemas se encuentran publicadas en (**Santiesteban, Blaya, & Reyes, 2023**, Sección 4).

La soluciones de ambos problemas admiten la representación

$$F_k(x) = \int_{\Omega} K(x, y) f_k(y) dy, \tag{32}$$

con un núcleo escalar y débilmente singular $K(x, y)$. También se obtuvo que dichos operadores integrales lineales, mediante los cuales se obtenían las soluciones, se comportaban como operadores compactos sobre $L^p(\Omega)$, $p > 1$. Cabe mencionar que debido a que

$$-\Delta F_k = \mathcal{D} \wedge \mathcal{D} \bullet F_k + \mathcal{D} \bullet \mathcal{D} \wedge F_k, \quad (33)$$

entonces todos los métodos se pueden adecuar para arribar también al buen planteamiento de los problemas para la ecuación de Poisson.

Mediante un cálculo sencillo podemos obtener que si se tienen los campos k -vectoriales F_k y G_k , ambos en $C^2(\Omega) \cap C^1(\bar{\Omega})$ y satisfaciendo las condiciones (21) o (22), entonces

$$\langle \mathcal{D}F_k \mathcal{D}, G_k \rangle = \langle F_k, \mathcal{D}G_k \mathcal{D} \rangle, \quad (34)$$

donde $\langle \cdot, \cdot \rangle$ denota el siguiente producto interior en el espacio de Hilbert $L^2(\Omega)$:

$$\langle f, g \rangle = \left[\int_{\Omega} \overline{f(x)} g(x) dx \right]_0.$$

La relación (34) nos muestra que el operador sándwich se comporta autoadjunto, sujeto a las condiciones de frontera de los problemas. Las funciones propias de los problemas espectrales correspondientes serán entonces soluciones de una ecuación simétrica de Fredholm

$$F_k(x) - \lambda \int_{\Omega} K(x, y) F_k(y) dy = 0,$$

y debido a los teoremas de alternativa de Fredholm se justifica la existencia de los valores propios y el sistema completo de funciones propias asociado.

En las últimas décadas han ganado cierta relevancia los llamados conjuntos estructurales, los cuales son bases ortonormales del espacio euclidiano que permiten definir generalizaciones del operador de Dirac. La noción de conjunto estructural se remonta a (Nôno & Inenaga, 1987; Shapiro, 1997).

La flexibilidad introducida por estos conjuntos posibilita el descubrimiento de nuevas perspectivas en líneas de investigación concernientes a elasticidad, ∂ -problemas, propiedades de mapeo de transformadas de Ahlfors-Beurling, fórmulas alternativas de Kolosov-Muskhishvili, descomposiciones aditivas de polinomios contragénicos y transformaciones conformes geométricas (Blaya *et al.*, 2016; Gürlebeck & Nguyen, 2014, 2015; Krausshar & Malonek, 2001; Santiesteban, 2024; Santiesteban, Blaya, & Alejandro, 2022b; Santiesteban, Blaya, & Reyes, 2023).

Si en lugar de la base canónica $\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ consideramos una base ortonormal arbitraria $\{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_m\}$, entonces el nuevo operador de Dirac construido con esta base tendrá la forma

$$\mathcal{D}^\vartheta = \vartheta_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + \vartheta_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + \dots + \vartheta_m \frac{\partial}{\partial x_m}.$$

La consideración de conjuntos estructurales arbitrarios provoca que surjan las ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden: $\mathcal{D}^\vartheta f \mathcal{D}^\chi = 0$ y $\mathcal{D}^\vartheta \mathcal{D}^\chi f = 0$, cuyas soluciones han sido nombradas como (ϑ, χ) -inframonogénicas y (ϑ, χ) -armónicas, respectivamente (Ricardo, Reyes, & Blaya, 2021; Santiesteban, Blaya, & Alejandro, 2022a). En este contexto, tomando en cuenta que

$$\begin{aligned} \mathcal{D}^\vartheta \bullet F_k &= \frac{1}{2} (\mathcal{D}^\vartheta F_k - (-1)^k F_k \mathcal{D}^\vartheta), \\ \mathcal{D}^\vartheta \wedge F_k &= \frac{1}{2} (\mathcal{D}^\vartheta F_k + (-1)^k F_k \mathcal{D}^\vartheta), \end{aligned}$$

se obtiene que

$$\begin{aligned}\mathcal{D}^\vartheta F_k \mathcal{D}^\chi &= (-1)^k (\mathcal{D}^\vartheta \bullet \mathcal{D}^\chi \wedge F_k - \mathcal{D}^\vartheta \wedge \mathcal{D}^\chi \bullet F_k - \mathcal{D}^\vartheta \bullet \mathcal{D}^\chi \bullet F_k + \mathcal{D}^\vartheta \wedge \mathcal{D}^\chi \wedge F_k), \\ \mathcal{D}^\vartheta \mathcal{D}^\chi F_k &= \mathcal{D}^\vartheta \bullet \mathcal{D}^\chi \wedge F_k + \mathcal{D}^\vartheta \wedge \mathcal{D}^\chi \bullet F_k + \mathcal{D}^\vartheta \bullet \mathcal{D}^\chi \bullet F_k + \mathcal{D}^\vartheta \wedge \mathcal{D}^\chi \wedge F_k.\end{aligned}$$

Las fórmulas anteriores nos permiten considerar problemas análogos A y B para estos sistemas más generales. Sin embargo, por lo regular, estos problemas son mal planteados porque el sistema de primer orden

$$(\mathcal{D}^\vartheta \wedge \Psi)|_\Omega = 0, \quad (35)$$

$$(\mathcal{D}^\chi \bullet \Psi)|_\Omega = 0, \quad (36)$$

$$\Psi|_{\partial\Omega} = 0, \quad (37)$$

lo es para conjuntos estructurales no equivalentes.

Existen fundamentos para conjeturar que cuando la dimensión m es impar y si consideramos dominios particulares como la bola, el anterior sistema sí se comporta bien planteado; pero esta conjetura continúa sin ser resuelta y constituye un problema de interés aún abierto.

Discusión

El alcance de los resultados se enmarca en la resolución de problemas de frontera que tienen una gran importancia en temas de la Física-Matemática, como son las ecuaciones de Maxwell y el clásico sistema de Lamé-Navier. Los temas y resultados obtenidos abren el camino para el estudio de una amplia gama de sistemas de ecuaciones en derivadas parciales que podrían tener no solo un interés matemático, sino también físico. El estudio de la reconstrucción de campos monogénicos y el reciente descubrimiento de nuevas propiedades para las funciones inframonogénicas son de vital utilidad en áreas tan distantes como el cálculo fraccionario, teoría de las supersimetrías y descomposiciones de Almansi.

Conclusiones

El presente artículo ofrece un resumen de la contribución realizada por los autores en el estudio de la reconstrucción de campos multivectoriales a partir del salto que estos experimentan sobre una superficie de geometría suficientemente irregular. También es abordado el tratamiento a ciertos problemas de frontera para sistemas elípticos de segundo orden. Este trabajo está dirigido a facilitar, a los lectores interesados, una rápida comprensión del alcance y belleza de las herramientas del análisis de Clifford para la solución de los mismos. Los artículos (**Blaya**, 1999; **Blaya & Reyes**, 1999; **Blaya, Reyes, & García**, 2006, 2007, 2008; **Blaya, Reyes, & Peña**, 2007; **Blaya et al.**, 2008, 2016; **Santiesteban**, 2024; **Santiesteban, Blaya, & Alejandro**, 2022a, 2022b; **Santiesteban, Blaya, & Reyes**, 2023) junto con sus referencias bibliográficas han servido de base para su redacción. Los conceptos y propiedades necesarias para la total comprensión del material pueden encontrarse en las restantes referencias consideradas.

Agradecimientos

Daniel Alfonso Santiesteban agradece la Beca Nacional para Estudios de Posgrado del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) (CVU: 1043969). Juan Bory Reyes estuvo soportado parcialmente por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional a través del proyecto individual SIP20241237.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron por igual al estudio, leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito enviado.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia con respecto a la publicación de este artículo.

Disponibilidad de datos y material suplementario

No aplicable.

Disponibilidad de códigos

No aplicable.

Referencias

- Blaya, R. A.** (1999). *Generalizaciones del Problema de Contorno de Riemann en espacios de Hölder* [Tesis Doctoral en Matemáticas, Universidad de Oriente].
- Blaya, R. A., García, T. M., Reyes, J. B.** (2012). The sharpness of condition for solving the jump problem. *Communications in Mathematical Analysis*, 12(2), 26-33.
- Blaya, R. A., Reyes, J. B.** (1999). Boundary value problems for quaternionic monogenic functions on non-smooth surfaces. *Advances in Applied Clifford Algebras*, 9(1), 1-22.
- Blaya, R. A., Reyes, J. B., Adán, A. G., Kähler, U.** (2016). On the Π -operator in Clifford analysis. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 434, 1138-1159.
- Blaya, R. A., Reyes, J. B., García, T. M.** (2006). Teodorescu transform decomposition of multivector fields on fractal hypersurfaces. En: Alpay, D., Luger, A., Woracek, H. (eds) *Wavelets, Multiscale Systems and Hypercomplex Analysis. Operator Theory: Advances and Applications 167*, 1-16.
- Blaya, R. A., Reyes, J. B., García, T. M.** (2007). Minkowski dimension and Cauchy transform in Clifford analysis. *Complex Analysis and Operator Theory*, 1(3), 301-315.
- Blaya, R. A., Reyes, J. B., García, T. M.** (2008). Cauchy Transform on non-rectifiable surfaces in Clifford analysis. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 339, 31-44.
- Blaya, R. A., Reyes, J. B., García, T. M., Peña, D. P.** (2008). Laplacian decomposition of vector fields on fractal surfaces. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 31(7), 849-857.
- Blaya, R. A., Reyes, J. B., Peña, D. P.** (2007). Jump problem and removable singularities for monogenic functions. *Journal of Geometric Analysis*, 17(1), 1-14.
- Brackx, F., Delanghe, R., Sommen, F.** (1982). *Clifford analysis*. Pitman (Advanced Publishing Program), Boston, MA.
- Clifford, W. K.** (1878). Applications of Grassmann's extensive algebra. *American Journal of Mathematics*, 1, 350-358.
- Cnops, J., Malonek, H.** (1997). An introduction to Clifford analysis. *Textos de Matemática, Serie B., Universidade de Coimbra. Portugal*, 7.
- Delanghe, R.** (1970). On regular-analytic functions with values in a Clifford algebra. *Mathematische Annalen*, 185, 91-111.
- Delanghe, R.** (2001). Clifford Analysis: History and Perspective. *Computational Methods and Function Theory*, 1(1), 107-153.
- Delanghe, R., Reyes, J. B.** (2003). An invitation to Clifford Analysis. *Ciencias Matemáticas*, 21(2), 109-137.

- Delanghe, R., Sommen, F., Souček, V.** (1992). *Clifford algebra and spinor-valued functions. a function theory for the Dirac operator*. Springer Dordrecht. XVII, 485 p. ISBN 978-94-011-2922-0.
- Dinh, D.** (2021). On structure of inframonogenic functions. *Advances in Applied Clifford Algebras*, 31(50), 1-9.
- Dzhuraev, A.** (1992). *Methods of singular integral equation*. Pitman monographs and surveys in pure and applied mathematics 60. Longman Scientific & Technical, 311 p. ISBN 0-582-08373-7.
- Federer, H.** (1969). *Geometric measure theory*. Die Grundlehren der mathematischen Wissenschaften, Band, 694 p. ISBN 978-3-540-60656-7.
- Fueter, R.** (1934). Die funktionentheorie der differentialgleichungen $\Delta u = 0$ und $\Delta \Delta u = 0$ mit vier variablen. *Commentarii Mathematici Helvetici*, 7, 307-330.
- García, A. M., García, T. M., Blaya, R. A., Reyes, J. B.** (2018). Inframonogenic functions and their applications in three-dimensional elasticity theory. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 41(10), 3622-3631.
- García, A. M., Santiesteban, D. A., Blaya, R. A.** (2023). On the Dirichlet problem for second order elliptic systems in the ball. *Journal of Differential Equations*, 364, 498-520.
- Gilbert, J., Murray, M.** (1991). *Clifford algebras and Dirac operator in Harmonic Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, 334 p. ISBN 978-051-161-158-2.
- Gilbert, R. P., Buchanan, J.** (1983). *First Order Elliptic Systems: A Function Theoretic Approach*. Academic Press, New York. ISBN 978-012-283-280-2.
- Gürlebeck, K., Habetha, K., Sprössig, W.** (2008). *Holomorphic functions in the plane and n-dimensional space*. Birkhäuser Verlag, Basel, 406 p. ISBN 978-3-7643-8271-1.
- Gürlebeck, K., Nguyen, H.** (2014). On ψ -hyperholomorphic functions and a decomposition of harmonics. En: Bernstein, S., Kähler, U., Sabadini, I., Sommen, F. (eds) *Hypercomplex Analysis: New Perspectives and Applications. Trends in Mathematics*. Birkhäuser, Cham. ISBN 978-3-319-08771-9. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08771-9_12.
- Gürlebeck, K., Nguyen, H.** (2015). ψ -hyperholomorphic functions and an application to elasticity problems. *AIP Conference Proceedings*, 1648(1), 440005.
- Gürlebeck, K., Sprössig, W.** (1990). *Quaternionic analysis and elliptic boundary value problems*. Birkhäuser, Boston, 254 p. ISBN 978-3-0348-7295-9. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7295-9>.
- Gürlebeck, K., Sprössig, W.** (1997). *Quaternionic and Clifford Calculus for Physicists and Engineers*. Wiley and Sons Publications, 375 p. ISBN 0-471-96200-7.
- Hestenes, D.** (1968). Multivector functions. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 24, 467-473.
- Iftimie, V.** (1965). Fonctions hypercomplexes. *Bulletin mathématique de la Société des Sciences Mathématiques de la République Socialiste de Roumanie*, 9, 279-332.
- Kats, B. A.** (1983). The Riemann problem on a closed Jordan curve. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Matematika. Kazanskii Gosudarstvennyi Universitet*, 251(4), 68-80.
- Krausshar, R., Malonek, H.** (2001). A characterization of conformal mappings in \mathbb{R}^4 by a formal differentiability condition. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 70(1), 35-49.
- Kravchenko, V. V.** (2003). *Applied quaternionic analysis*. Research and Exposition in Mathematics 28, 136 p. ISBN 3-88538-228-8.
- Kravchenko, V., Shapiro, M.** (1996). *Integral representations for spatial models of mathematical physics*. Pitman Research Notes in Mathematics Series 351, 256 p. ISBN 978-058-229-741-8.
- Lávicka, R.** (2011). The Fischer decomposition for the H-action and its applications. En: Sabadini, I., Sommen, F. (eds). *Hypercomplex analysis and applications. Trends in mathematics*. Springer, Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0246-4_10.
- Malonek, H., Peña, D. P., Sommen, F.** (2010). Fischer decomposition by inframonogenic functions. *CUBO A Mathematical Journal*, 12(2), 189-197.
- Mitrea, M.** (1994). *Clifford wavelets, singular integrals, and Hardy spaces*. Lecture Notes in Mathematics, 1575, 120 p. ISBN 978-3-540-48379-3. <https://doi.org/10.1007/BFb0073556>.
- Moisil, G. C., Theodoresco, N.** (1931). Fonctions holomorphes dans l'espace, *Mathematica. Cluj*, 5, 142-159.
- Nôno, K., Inenaga, Y.** (1987). On the Clifford linearization of Laplacian. *Journal of the Indian Institute of Sciences*, 67(5-6), 203-208.
- Obolashvili, E.** (2002). *Higher order partial differential equations in Clifford analysis: Effective solutions to problems*. Boston, Birkhäuser; Berlin. Basel, 192 p. ISBN 978-0817642860.

- Reséndis, F., Shapiro, M.** (2002). Recent advances in hypercomplex analysis. *Carta Informativa, Sociedad Matemática Mexicana*, 11-14.
- Ricardo, J. S., Reyes, J. B., Blaya, R. A.** (2021). Singular integral operators and a ∂ -problem for (ϕ, ψ) -harmonic functions. *Analysis and Mathematical Physics*, 11(155), 1-26.
- Rocha-Chávez, R., Shapiro, M., Sommen, F.** (2001). *Integral theorems for functions and differential forms in C^m* . Chapman and Hall, 214 p. ISBN 978-158-488-246-6.
- Ryan, J.** (2000). Basic Clifford analysis. *Cubo Matemática Educacional*, 2, 226-256.
- Ryan, J.** (2004). Introductory Clifford analysis. En: Ablamowicz, Rafal and Sobczyk, Garret (Eds.) *Lectures on Clifford (geometric) algebras and applications*. Boston, MA: Birkhäuser.
- Santiesteban, D. A.** (2024). ∂ -problem for a second order elliptic system in Clifford analysis. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 47(12), 9718-9728. <https://doi.org/10.1002/mma.10090>.
- Santiesteban, D. A., Blaya, R. A., Alejandre, M. Á.** (2022a). On (ϕ, ψ) -inframongenic functions in Clifford analysis. *Bulletin of the Brazilian Mathematical Society, New Series*, 53, 605-621.
- Santiesteban, D. A., Blaya, R. A., Alejandre, M. Á.** (2022b). On a generalized Lamé-Navier system in \mathbb{R}^3 . *Mathematica Slovaca*, 72(6), 1527-1540.
- Santiesteban, D. A., Blaya, R. A., Reyes, J. B.** (2023). Boundary value problems for a second-order elliptic partial differential equation system in Euclidean space. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 46, 15784-15798.
- Shapiro, M.** (1997). On the conjugate harmonic functions of M. Riesz-E. Stein-G. Weiss. En: Dimiev, S. et al. (Eds.), *Topics in Complex Analysis, Differential Geometry and Mathematical Physics, Third International Workshop on Complex Structures and Vector Fields*. St. Konstantin, Bulgaria, August 23-29.
- Sommen, F., Sprössig, W.** (2002). Introduction to Clifford analysis. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 25(6), 1337-1342.
- Sprössig, W.** (2002). Clifford analysis and its applications in Mathematical Physics. *Cubo Matemática Educacional*, 4, 253-314.
- Sudbery, A.** (1979). Quaternionic analysis. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 85, 199-225.
- Wang, L., Jia, S., Luo, L., Qiu, F.** (2022). Plemelj formula of inframongenic functions and their boundary value problems. *Complex Variables and Elliptic Equations*, 68(7), 1158-1181. <https://doi.org/10.1080/17476933.2022.2040019>.
- Wen, G., Sha, H., Yu-Ying, Q.** (2005). *Real and complex Clifford analysis*. Springer-Verlag, Berlin, 251 p. ISBN 978-0-387-24536-2.

Club de revistas/Journal Club

Reseña sobre el artículo

Waddle, A. W., Clulow, S., Aquilina, A., Sauer, E. L., Kaiser, S. W., Miller, C., Flegg, J. A., Campbell, P. T., Gallagher, H., Dimovski, I., Lambreghts, Y., Berger, L., Skerratt, L. F., & Shine, R. (2024). Hotspot shelters stimulate frog resistance to chytridiomycosis. *Nature*, 631, 344-349. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07582-y>

Aprovechando las debilidades de un hongo patógeno

En los años 80 miembros de la comunidad herpetológica empezaron a reportar, a manera de anécdota, que sus poblaciones de estudio disminuían extrañamente y que, en algunos casos extremos, no volvían a encontrar a sus preciados sujetos de estudio, otrora considerados comunes y abundantes. Los bosques dejaron de ser esas mágicas cajas de croares diversos para convertirse en lugares donde las noches se cubrían de silencios prolongados. En un principio se sugirió que se trataba de fluctuaciones normales de las poblaciones y que muy seguramente en la siguiente visita iban a aparecer, tan abundantes como antes, muchos machos cantando sin parar y hembras listas para reproducirse. Pero no fue así, las ranas y los sapos se desvanecieron y nadie sabía la razón exacta, no había nada evidente que la comunidad amante de los anfibios pudiera señalar como la causa de tales desapariciones. Lo más grave es que los reportes empezaron a ser cada vez más frecuentes, ya no eran casos aislados. Además, no estaban restringidos a una única región del planeta, ahora aparecían reportes en Australia, Panamá, Costa Rica, España. Cada día el panorama era más extraño. ¿Qué podía estar causando esta tragedia tan sincronizada en el tiempo y en el espacio?

La comunidad científica estaba dispuesta a hacer lo que fuera para entender quién o qué estaba detrás de esta devastación. En los años 90 el misterio empezó a resolverse y, en 1999, Joyce Longcore, Allan Pessier y Donald Nichols publicaron un fascinante descubrimiento (Longcore *et al.*, 1999). Habían encontrado al responsable de la crisis de los anfibios: era un hongo microscópico, al que nombraron *Batrachochytrium dendrobatidis* (*Bd*), el



Hembra adulta de *Litoria aurea*. Foto de Anthony Waddle

que, sin lugar a dudas, estaba asociado con la mortalidad masiva de ranas y sapos en diversas partes del mundo. A la enfermedad causada por este patógeno se la conoce como quitridiomycosis y hoy se sabe que es la responsable de la desaparición de por lo menos 90 especies de anfibios y de la disminución acelerada y drástica de otras 500 especies en todo el planeta (**Scheele et al.**, 2019).

La quitridiomycosis afecta la capacidad de los individuos para mantener el equilibrio osmótico, por lo que el intercambio de iones y agua a través de la piel permeable que caracteriza a los anfibios, se hace cada vez más difícil, produciendo una muerte rápida en los individuos susceptibles (**Voyles et al.**, 2009). En otros estudios se ha reportado que los animales enfermos no son capaces de dar una respuesta inmunitaria, así que el patógeno puede hacer de las suyas y las ranas no tienen cómo defenderse (**Fites et al.**, 2013). Sin embargo, es importante tener presente que no todos los individuos responden de la misma manera: hay algunas especies que actúan como vectores del patógeno y, aunque los individuos estén infectados, no desarrollan la enfermedad, lo que les permite dispersar las zoosporas del hongo a otras especies que sí son susceptibles y que, en cuestión de semanas, pueden sucumbir al patógeno.

Los esfuerzos por encontrar una solución a este problema son muchos, y aunque varios grupos de investigación en el mundo trabajan en diferentes frentes para entender las dinámicas de la infección y desarrollar estrategias y herramientas que ayuden a salvar a este grupo tan diverso, la solución aún es esquiva. Los estudios, que no son pocos, representan esfuerzos diversos y multidisciplinarios para entender y combatir la quitridiomycosis desde el punto de vista del hospedero, utilizando tratamientos directos, probióticos, manipulaciones del hábitat, y enfoques genéticos de mitigación de los efectos letales de *Bd*. Sin embargo, hay que recordar que en esta interacción hay dos protagonistas, las ranas y el hongo, y es importante aprovechar las debilidades del patógeno para actuar contundentemente contra él.

Como todo ser vivo, *Bd* tiene restricciones fisiológicas asociadas con la temperatura. Entre los 17 y los 25 °C el hongo crece mejor y puede producir una mayor cantidad de zoosporas, lo que implica una infección más fuerte en el huésped y una mayor concentración de hongo en el ambiente (**Piotrowski et al.**, 2004). Varios estudios han reportado que los refugios térmicos donde las temperaturas son más cálidas podrían ser claves para que las ranas persistan y se logre una eventual adaptación (**Heard et al.**, 2015; **Puschendorf et al.**, 2011). Cuando las temperaturas no son óptimas, la producción de zoosporas es limitada y los individuos pueden persistir con cargas bajas de infección.

Sin embargo, estos refugios ‘cálidos’ no siempre están disponibles en el ambiente, ante lo cual la creación de refugios ‘artificiales’ que ofrezcan condiciones favorables para los anfibios, pero limiten el desarrollo del hongo, parece una opción viable y fácil de implementar. Dichos refugios ayudarían a controlar la infección por *Bd* y, eventualmente, permitirían que se desarrolle una resistencia al patógeno. Así, los animales que ya han estado expuestos y han sobrevivido podrían tener una mayor capacidad de resistir una reinfección. En un estudio publicado recientemente en la revista *Nature*, **Waddle et al.** (2024) usaron como modelo de estudio a la rana australiana *Litoria aurea*, una especie muy amenazada que ha desaparecido en más del 90 % de su rango de distribución desde la llegada del hongo a la zona. Esta especie representa un buen modelo para evaluar los beneficios de los refugios térmicos en especies vulnerables.

Los autores encontraron que los animales infectados con *Bd*, pero tratados para limpiar la infección mediante la exposición a una temperatura de 32 °C durante 14 días, tenían una mayor probabilidad de sobrevivir a una segunda exposición al patógeno, a diferencia de aquellos que no habían tenido contacto previo con *Bd*; además, la intensidad de la infección parecía reducirse con el tiempo en los individuos tratados. Era claro, entonces, que la exposición al patógeno permite a estas ranas desarrollar algún tipo de resistencia, aumentando sus posibilidades de sobrevivir. Lo más interesante sería probar esto en un ambiente seminatural y, así, determinar si los refugios ‘artificiales’ en donde los animales



Individuos de *Litoria aurea* haciendo uso de los refugios ofrecidos. Foto de Anthony Waddle



Mesocosmos en los que se instalaron los refugios y se llevaron a cabo los experimentos. Foto de Anthony Waddle

tengan acceso a espacios con temperaturas más altas (adecuadas para ellos, pero subóptimas para el patógeno), podrían reducir los efectos de la quitridiomycosis. Waddle y su equipo crearon unas pequeñas cámaras o invernaderos en donde, además, ponían ladrillos huecos que las ranas podían usar como refugios. Algunos invernaderos estaban al sol y otros en la sombra. En el experimento encontraron que las ranas preferían quedarse en zonas más calientes, y cuando evaluaron qué tantas zoosporas cargaba cada animal, evidenciaron que los que estaban en los invernaderos expuestos al sol tenían infecciones más leves, es decir, un menor número de zoosporas. En conclusión, los ambientes heterogéneos, que permitan a los animales modificar su temperatura corporal, contribuirían a su lucha contra el patógeno y aumentarían sus posibilidades de sobrevivir.

Este estudio abre nuevas alternativas de investigación y plantea retos para la comunidad herpetológica y conservacionista. Es una aproximación sencilla, prometedora y, sin duda, representa una gran oportunidad para salvar a una especie de la extinción. Sin embargo, no podemos olvidar que la diversidad de los anfibios en el mundo es enorme, pues hay más de 8.750 especies, cada una con una manera única de responder ante la infección y los tratamientos. Lo que funciona para algunas y parece ser la solución, en otras no tiene ningún efecto. Cada hallazgo representa una esperanza para los anfibios y debemos seguir probando, refinando los procesos y pensando de manera creativa, por fuera de nuestra zona de confort. Tal vez así, las intervenciones serán más exitosas y podremos incidir en un grupo más grande de especies, pues tal como está el panorama actualmente, la enfermedad no parece dar tregua.

 **Sandra V. Flechas**

BichoS.TEAM, Bogotá, Colombia

Referencias

- Fites, J.S., Ramsey, J.P., Holden, W.M., Collier, S.P., Sutherland, D.M., Reinert, L.K., Gayek, A.S., Dermody, T.S., Aune, T.M., Oswald-Richter, K., Rollins-Smith L.A.** (2013). The invasive chytrid fungus of amphibians paralyzes lymphocyte responses. *Science*, 342(6156), 366-369. <https://doi.org/10.1126/science.1243316>
- Heard, G.W., Thomas, C.D., Hodgson, J.A., Scroggie, M.P., Ramsey, D.S.L., Clemann, N.** (2015). Refugia and connectivity sustain amphibian metapopulations afflicted by disease. *Ecology Letters*, 18(8), 853-863. <https://doi.org/10.1111/ele.12463>
- Longcore, J.E., Pessier, A.P., Nichols, D.K.** (1999). *Batrachochytrium dendrobatidis* gen. et sp. nov., a chytrid pathogenic to amphibians. *Mycologia*, 91(2), 219-27. <https://doi.org/10.2307/3761366>
- Piotrowski, J.S., Annis, S.L., Longcore, J.E.** (2004). Physiology of *Batrachochytrium dendrobatidis*, a chytrid pathogen of amphibians. *Mycologia*, 96(1), 9-15. <https://doi.org/10.2307/3761981>
- Puschendorf, R., Hoskin, C.J., Cashins, S.D., McDonald, K., Skerratt, L.F., Vanderwal, J., Alford R.A.** (2011). Environmental refuge from disease-driven amphibian extinction. *Conservation Biology* 25(5), 956-964. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2011.01728.x
- Scheele, B.C., Pasman, F., Skerratt, L.F., Berger, L., Martel, A., Beukema, W., Acevedo, A.A., Burrows, P.A., Carvalho, T., Catenazzi, A., De la Riva, I., Fisher, M.C., Flechas, S.V., Foster, C.N., Frías-Álvarez, P., Garner, T.W.J., Gratwicke, B., Guayasamin, J.M., Hirschfeld, M., Kolby, J.K.,... Canessa, S.** (2019). Amphibian fungal panzootic causes catastrophic and ongoing loss of biodiversity. *Science*, 363(6434), 1459-1463. DOI: 10.1126/science.aav0379
- Voyles, J., Young, S., Berger, L., Campbell, C., Voyles, W.F., Dinudom, A., Cook, D., Webb, R., Alford, R.A., Skerratt, L.F., Speare, R.** (2009). Pathogenesis of chytridiomycosis, a cause of catastrophic amphibian declines. *Science*. 326(5952), 582-585. DOI: 10.1126/science.1176765
- Waddle, A.W., Clulow, S., Aquilina, A., Sauer, E.L., Kaiser, S.W., Miller, C., Flegg, J.A., Campbell, P.T., Gallagher, H., Dimovski, L., Yorick Lambreghts, Y., L., 6, Lee F Skerratt, L.F., Richard Shine, R.** (2004). Hotspot shelters stimulate frog resistance to chytridiomycosis. *Nature*, 631, 344-349. DOI: 10.1038/s41586-024-07582-y

(Figura 2). El análisis filogenético les permitió ubicar las cepas estudiadas en el genotipo 3I de la rama 3 del árbol filogenético de *M. leprae* tanto en las muestras humanas (Figura 3), como en la de la ardilla roja (Figura 4). La rama 3 es la más prominente de los genomas medioevales de *M. leprae*.



Figura 2. Localización del leprosiario de St. Mary Magdalen y Staple Gardens en el Winchester medioeval (Urban *et al.*, 2024)

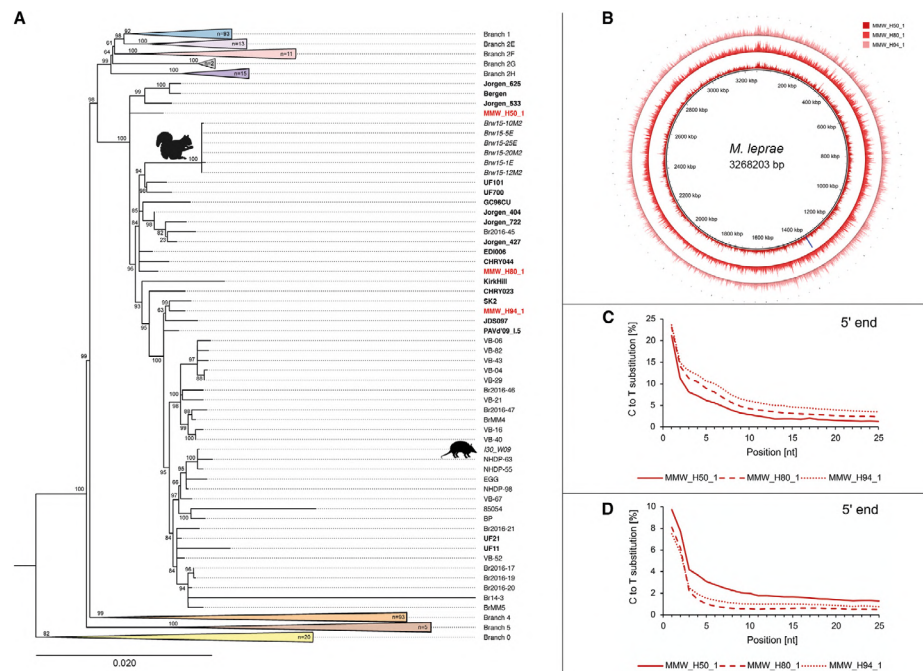


Figura 3. Análisis genético de los tres esqueletos humanos del leprosiario de St. Mary Magdalen en Winchester, Reino Unido (Urban *et al.*, 2024)

- One Health High-Level Expert Panel (OHHLEP), Adisasmito, W.B., Almuhairi, S., Barton-Behravesh, C., Bilivogui, P., Bukachi, S.A., Casas, N., Cediél-Becerra, N., Charron, D.F., Chaudhary, A., Ciacci-Zanella, J.R., Cunningham, A.A., Dar, O., Debnath, N., Dungu, B., Farag, E., Gao, G.F., Hayman, D.T.S., Khaita, M., Koopmans, M.P.G., ..., Lei Zhou. (2022).** One Health: A new definition for a sustainable and healthy future. *PLoS Pathogens*, 18(6), e1010537. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1010537>
- Urban, C., Blom A A., Avanzi C., Walker-Meikle, K., Warren A K., White-Iribhogbe, K., Turle R., Marter P., Dawson-Hobbis, H., Roffey S, Inskip S., Schuenemann, V.J. (2024).** Ancient *Mycobacterium leprae* genome reveals medieval English red squirrels as animal leprosy host. *Current Biology*, 34(10), 2221-2230.e2228. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.04.006>
- Walsh, G. P., Meyers, W P., Binford C H. (1986).** Naturally acquired leprosy in the nine-banded armadillo: a decade of experience 1975-1985. *Journal of Leukocyte Biology*, 40(5), 645-656. <https://doi.org/10.1002/jlb.40.5.645>

Vida de la Academia

Palabras de Clemente Forero Pineda en el homenaje de ACCE-ACCEFYN a Enrique Forero González - Agosto 12 de 2024

Es un inmenso honor para mí que la Academia Colombiana de Ciencias Económicas y la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales me permitan dar hoy un testimonio sobre los momentos que compartí con Enrique Forero González. Considero que Enrique fue el líder científico que ha dejado la más honda huella en la Colombia del último cuarto de siglo.

Cuando Enrique falleció, un número de la Revista de la Academia de Ciencias se dedicó a recordar su vida (<https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/issue/view/223>). La presidenta Helena Groot destacó el compromiso de su antecesor con la ciencia como un ideal de vida y nueve académicos más escribieron semblanzas de él en ese número. Alberto Gómez describió la entrega y la identificación de Enrique con la Academia, reconociendo que durante su presidencia, y después, Enrique vivió para la Academia y por la Academia; Ángela Camacho resaltó sus esfuerzos por visibilizar el aporte femenino a la ciencia colombiana, y Carlos Jaramillo, su batalla por un mayor presupuesto para la ciencia. Darío Valencia, por su parte, explicó las grandes realizaciones de la Academia durante la presidencia de Enrique: el programa STEM-Academia, la internacionalización de la institución y el liderazgo en distintos foros multilaterales, la impronta que dejó en las políticas públicas, la gestación, conformación y masiva participación de la Academia en la Misión Internacional de Sabios, y la presencia de la institución en muchos rincones del país; Elizabeth Hodson destacó su capacidad de gestión para la promoción de la ciencia y para llevar a los territorios la idea de la sociedad del conocimiento, así como su liderazgo internacional y el equipo de trabajo que construyó; Gonzalo Andrade relató su trayectoria como botánico y sus aprendizajes al lado de Enrique, así como lo hizo José Luis Fernández, del Real Jardín Botánico de Madrid, señalando principalmente su participación en el proyecto Calliandra (*Leguminosae*) en el piedemonte llanero. Luis Fernando García compartió con los lectores cómo se habría cumplido su sueño de trabajar al lado del investigador en sus expediciones y narró la actitud del hombre frente a una enfermedad terminal. Por último, Moisés Wasserman se detuvo en algunos rasgos de la personalidad de Enrique: su insensibilidad a los halagos, su incapacidad de entrar en conflicto, su obsesión por cumplir compromisos.

Hoy comparto con ustedes mi admiración por Enrique y mi visión sobre su liderazgo científico. Conocí de la existencia de Enrique Forero por allá en los años noventa; supe que durante cinco años había sido el director de investigaciones del Missouri Botanical Garden y presidente de la Organización Flora Neotrópica entre 1981 y 1988, y que en aquel momento era el director de Botánica sistemática del Jardín Botánico de Nueva York. Yo estaba en Colombia, pero ya las bases de datos científicas habían sido digitalizadas y comenzaron a popularizarse. Los autores figuraban en estas bases solo con la inicial del nombre y el primer apellido. Comencé a recibir correos del Institute of Scientific Information, el célebre ISI, preguntándome si C. Forero era el mismo E. Forero que había escrito este o aquel artículo sobre plantas. No somos parientes cercanos, aunque él sostenía que todos los Forero veníamos de la misma rama. Las validaciones de autoría del ISI se repetían cada vez que Enrique publicaba. Siempre les respondía que yo no era el autor, pero por curiosidad que ustedes sabrán comprender, leí algunos de esos artículos, de forma que terminé aprendiendo que en la Amazonia colombiana habitaba una especie nueva de la familia Dipterocarpaceae y otras cosas por el estilo.

Enrique Forero era un botánico de reconocimiento mundial y a lo largo de su carrera publicó más de un centenar de trabajos. Por ello, pero sobre todo porque fue un maestro a cabalidad toda su vida, no les sorprenda si les digo que hoy hay 28 especies de plantas y líquenes que llevan su nombre; el que una especie lleve el nombre de un botánico es el máximo reconocimiento que éste puede recibir. Enrique Forero recibió ese homenaje en 28 ocasiones.

¿Cuándo le agregó Enrique a su vida de botánico de renombre la de líder científico? Recientemente me encontré con un artículo visionario que me permite aventurar una respuesta. En 1998, Enrique escribió para una revista mexicana de ciencias los siguientes párrafos, que marcarían el derrotero de la segunda parte de su vida. Decía:

Varios países de América Latina enfrentan en la actualidad una nueva crisis económica. En algunos de ellos esa crisis económica está acompañada de una aguda crisis política y de una igualmente profunda crisis de valores. En tiempos de crisis, el medio ambiente se convierte en la cenicienta de los gobiernos. ¿Por qué habría de ser importante apoyar las investigaciones sobre diversidad biológica en los países tropicales del hemisferio si hay otros problemas más urgentes por resolver? ¿Por qué habría de ser prioridad para un gobierno preocuparse por la desaparición de las especies cuando el precio del petróleo o del café está declinando en los mercados mundiales?.

Nuestro conocimiento de la riqueza biológica del continente americano no comenzó a generarse hace cinco o diez años. Al contrario, tiene una larga y fructífera historia. Sólo que no se hablaba de 'biodiversidad'.

No veo que la brecha entre nuestros países y los países llamados desarrollados o del primer mundo se haya reducido.

Los problemas del medio ambiente en América Latina no se reducen solamente a las políticas gubernamentales, o a la ausencia de ellas, o a los demás elementos que he mencionado hasta ahora. Los problemas de la biodiversidad y la conservación en la región también tienen que ver mucho con nosotros mismos, con la actitud de la comunidad científica y académica al respecto, con nuestra pasividad, con el deseo de diagnosticar todas las situaciones ad infinitum sin llegar jamás a respuestas concretas.”

Este no era solo un reclamo. En este escrito está plasmado el objetivo y el derrotero de lo que sería la segunda parte de la vida de Enrique. En sus palabras interpretaba a toda una generación de colombianas y colombianos, de latinoamericanos, que hemos vivido convencidos de que el conocimiento es indispensable para forjar un mejor destino para nuestros pueblos.

Desde aquella época, Enrique se fue transformando en el líder de la comunidad científica que conocimos. Y tenía tan claro su objetivo - darle un vuelco a las condiciones en que se hace la ciencia en Colombia - que tomaba decisiones y las ejecutaba a una velocidad impresionante.

A la vuelta del siglo, vine a conocerlo personalmente, porque ambos aceptamos ser candidatos a la rectoría de la Universidad Nacional. En nuestras giras por las seccionales, tuvimos mucho tiempo para compartir. Enrique era decano de la Facultad de Ciencias entonces. Su prestigio científico, su calidad humana y su convicción le permitían influir sobre todos los que se encontraban con él. La batalla de Enrique por la ciencia había comenzado y ya nunca más se detendría. A lo largo de dos décadas y media fuimos muchos - académicos y no académicos - los que tuvimos el privilegio de acompañarlo en su gesta.

En el 2013 Enrique fue elegido presidente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (Accefyn). Fue reelegido para ese cargo hasta cuando el reglamento lo permitió; al término de esos nueve años, continuó sirviéndole a la Academia en otras funciones transcendentales. Conozco de cerca la labor de la Academia de Ciencias desde hace más de 35 años. Durante todo ese tiempo, la ACCEFYN tuvo presidentes brillantes, científicos ilustres, líderes destacados. Pero Enrique logró abrir ese amplio espacio que hoy tiene la Academia en la sociedad colombiana. El panorama que hoy puede apreciar la doctora Helena Groot desde la presidencia de la Academia es inmenso, y lo es especialmente a partir de la presidencia de Enrique Forero.

Enrique tenía una inmensa capacidad para unir a mucha gente alrededor de grandes objetivos. Algunas veces lo acompañé a reuniones con empresarios, con ministros, con congresistas. En todos ellos infundía respeto por su persona y por la ciencia. Acompañado de su equipo, también iba a colegios y escuelas, e interactuaba con las comunidades en ferias de ciencia regionales. Para los niños Enrique era la figura mitológica del científico. Con las universidades de las regiones, firmaba convenios para el largo plazo. Nos comprometía a todos con proyectos en territorios lejanos como el Guaviare. Era hombre de alianzas; era lo que el biólogo evolutivo Martin Nowak llama un supercooperador; fue un constructor de redes a partir de acuerdos, de planes, de compromisos y - sobre todo - de ejecuciones.

Para Enrique no había distancia entre la teoría y la práctica; ni entre el discurso y la ejecución; todo eso se movía articuladamente, como en una gran orquesta sinfónica. Su capacidad de comprometer a los gobernantes era sorprendente.

El presidente Iván Duque adquirió tres compromisos con Enrique Forero, que eran compromisos con la Academia, con la comunidad científica, con el país: convocar una misión de sabios; crear un Ministerio de CTI, y llevar la inversión del país en investigación y desarrollo (I+D) al 2 %. Al presidente Gustavo Petro lo comprometió a llevar la inversión en I+D del país al 1,5 %.

La Misión Internacional de Sabios se convocó y le hizo una gran propuesta al país de productividad, equidad y sostenibilidad - objetivos en los que todos los discursos están de acuerdo - sí, pero con la conciencia de que eso sólo se logra a través del conocimiento y de la educación de muy amplias capas de la población. El Ministerio de Ciencias se creó, aunque en condiciones muy distintas de las que se esperaban, porque las instituciones formales que no corresponden a realidades de poder no suelen funcionar. Por el contrario, en lo presupuestal y en la inversión en investigación y desarrollo, ambos presidentes le incumplieron a Enrique Forero, y al hacerlo le incumplieron a la comunidad científica, a los empresarios innovadores, a la sociedad y al país.

Las relaciones de Enrique con los gobernantes no siempre fueron fáciles. En los momentos difíciles sacaba a relucir su apego a los principios de la ciencia, aún cuando ello significara enfrentarse a los poderosos. Todos admirábamos su capacidad para no romper relaciones, inclusive después de una reunión en que hubiera tenido que defender esos principios con su carácter y con la fuerza de sus palabras.

Enrique impulsó, gestó y armó la Misión Internacional de Sabios que se inició en el 2019. Hizo valer el compromiso presidencial de convocarla; aseguró la llegada de más de una docena de académicos y académicas, no solo colombianos sino extranjeros, a la Misión. La acompañó en su diario trajinar y en sus batallas. Y aseguró que su mensaje fuera entendido y acogido por la comunidad científica. Con Enrique y la Academia como aliados incondicionales, la Misión de Sabios dio batallas cívicas frente a decretos del gobierno que apuntaban a reducir la ciencia a la búsqueda exclusiva de una competitividad esquiva; para que los objetivos de la investigación abarcaran la salud de la población y la sostenibilidad del medio ambiente; para que el propósito último de la ciencia se viera en su compromiso por el avance del conocimiento y el destino de la Humanidad; en fin, para que el sistema de ciencia, tecnología e innovación no fuera un simple apéndice del sistema de competitividad. La alianza Academia-Misión fue fundamental para frenar la intención de someter la ciencia a la máxima unidimensional de la competitividad.

La Academia y la Misión también lucharon juntas para tener un sistema coherente de ciencia, tecnología e innovación, y para que la ciencia fuera respetada en su diálogo con los saberes ancestrales, importante conversación que Enrique ya anunciaba en su artículo de 1998. Unidas lucharon para que la estructura del Ministerio de Ciencias fuera lo más racional posible y, aunque no se logró que fuera un ente coordinador de las actividades de rueda suelta de los seis sistemas sectoriales de investigación, la propuesta de un auténtico sistema de ciencia, tecnología e innovación que propusieron sigue en pie.

La generosidad de la Academia con la Misión fue inmensa. Además de contribuir a su gestación, a su conformación, a su visión y a su organización, hizo viable la realización de varias iniciativas, entre ellas dos grandes eventos de neuroeducación, importante eje de las propuestas de la Misión y del programa STEM de la Academia, con la participación de los líderes mundiales del campo y de miembros de la Misión y de la Academia, así como los talleres con centenares de investigadores colombianos y maestros de zonas deprimidas de pequeños municipios comprometidos con la batalla por la calidad.

Las realizaciones de la Academia durante los nueve años de su presidencia tienen mucho que ver con la forma en que Enrique ejercía su liderazgo. Sus estudiantes, la multitud de discípulos que no fueron sus estudiantes pero cuyas vidas fueron transformadas por Enrique, sus colegas académicos y su equipo, corroboran una hipótesis que alguna vez compartí con él acerca de su liderazgo: él nunca le decía que no a nadie (lo que algunas veces lo ponía en problemas), y nunca nadie le decía que no a él. Estimulaba cualquier iniciativa, y a quienes lo rodeábamos nos parecía que todas las suyas nos abrían puertas. Enrique le daba alas a la gente. Hizo crecer la Academia de Ciencias. Aumentó en 70 % el número total de académicos para darle espacio a los más jóvenes, a las mujeres, a gestores y amigos comprometidos con la ciencia. Y revivió el Colegio Máximo de las Academias de Colombia.

Enrique se ocupó especialmente de incorporar a las mujeres científicas y a las juventudes a la Academia de Ciencias. Como lo resalta Ángela Camacho, “al comienzo de su gestión, solamente el 9 % eran mujeres; Enrique Forero logró doblar ese porcentaje a un 18 % de mujeres académicas y entregó la presidencia de la Academia a una científica, Helena Groot”.

Es ejemplar la forma en que involucró a la naciente Academia Joven en la discusión crítica y la divulgación de los planteamientos de la Misión de Sabios. Con ello nos enseñó que una academia joven se construye asignándole tareas mayúsculas. Enrique era un maestro auténtico, un formador de investigadores, un compañero de sus discípulos. Su apoyo a las ideas de sus estudiantes y sus discípulos fue fundamental en forjar carreras científicas muy exitosas. “Creyó en mí y eso me hizo creer en mí misma”, dice Bibiana Moncada, quien hoy es curadora de líquenes y briofitas en el Herbario de Berlín. Las 28 especies que llevan el nombre de Enrique Forero reflejan la calidad humana y la sabiduría del maestro, el cariño de sus discípulos por la persona y el agradecimiento al guía. Es particularmente significativo que, ya después de su muerte, dos discípulos y un colega hayan registrado tres nuevas especies de líquenes con el nombre de Enrique Forero González: *Lobariella foreroana*, *Sticta henrici* y *Yoshimuriella enfogoa* (doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1978>). Enrique alcanzó a leer el borrador del artículo, discutirlo, controvertirlo y, finalmente, aprobar su metodología antes de dejarnos.

En otro ámbito de su incansable labor, Enrique iba a los colegios y escuelas personalmente a llevar el mensaje de la ciencia, a acompañar exposiciones científicas, a iniciar procesos de transformación de las mentes hacia la ciencia. En Boyacá y en barrios deprimidos de Bogotá se recuerdan sus visitas. Creía firmemente que transformar los cerebros de los niños y adolescentes era la forma de hacer realidad los sueños de un nuevo país. Con el apoyo de su equipo, convirtió los estantes de la Academia en una biblioteca itinerante que iba por las ferias de libros y escolares de las regiones, comunicando la noticia de la ciencia.

Su equipo lo recuerda con especial devoción. “Nos permitió vivir y ser Academia”, para él, “todo el mundo merecía una respuesta”, son algunos de sus testimonios. Él les llamaba su “junta directiva alterna” y les escuchaba. “En la Academia se hace lo que Enrique obedece”, respondía. En su incansable entrega a la Academia de Ciencias, Enrique no puso ningún límite. El equipo se convirtió en parte de su familia, ellos y ellas lo acompañaban en todo. Hoy evocan especialmente su infinita generosidad, particularmente en momentos de dificultades, las narraciones de sus aventuras en campo, que compartía con ellos, el trato amable, y el interés sincero en sus vidas y en sus familias.

Es esta apenas una rendija que se abre sobre la huella que dejó Enrique Forero González entre nosotros, un año después de su pérdida (porque para muchos de nosotros lo fue), una mirada sobre la vida de un constructor de redes de conocimiento y de humanidad;

un agente activo de la política científica desde la sociedad civil; el transformador de la Academia de Ciencias; el científico que por primera vez logró comprometer a presidentes de la República con la ciencia; el gestor, creador, defensor y divulgador principal de la Misión Internacional de Sabios; el maestro que nos dejó un legado de bonhomía y de compromiso con el conocimiento.

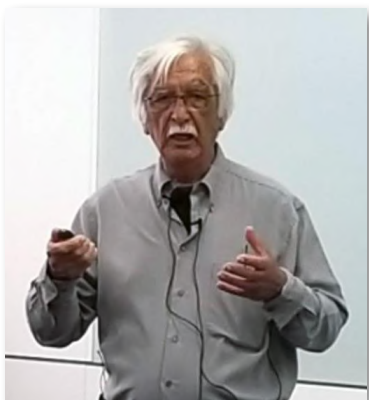
Enrique es el modelo de los líderes que necesita la ciencia en nuestro país: científicos reconocidos y realizados con gran capacidad de orientar políticas, de dialogar con gobernantes y convencerlos, de limar asperezas y de tender puentes con todos los sectores de la sociedad; de hacer crecer la audiencia, involucrando a las mujeres a la ciencia y a los jóvenes al mundo de las academias.

En nuestras vidas a veces nos encontramos con personas que encarnan una época histórica. Creo que, en la historia de la ciencia de Colombia, el recuento de los episodios de la vida de Enrique Forero González es el de la ciencia colombiana en los tiempos que hemos tenido que vivir.

Clemente Forero Pineda

Miembro honorario Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

In Memoriam



Fabio Antonio Cediél Melo 1935-2024

Fabio Cediél estudió ingeniería y química en Fort Belvoir, Virginia, la Universidad de Maryland (EE. UU.), la Escuela Politécnica (París, Francia) y la Technische Hochschule Karlsruhe, (Karlsruhe, Alemania) de 1953 a 1957. En 1959, obtuvo una beca del DAAD (Servicio Alemán de Intercambio Académico) y, entre 1960 y 1967, realizó investigaciones en la Universität Stuttgart, Institut für Geologie (Alemania), donde obtuvo el Dipl.-Geol. y el Doctor rerum natura (Dr. rer. nat.) por los estudios realizados sobre la estratigrafía jurásica de la provincia de Murcia (España) y la Cordillera Oriental (Colombia). Fue miembro de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, se posesionó como Miembro Correspondiente de la Academia el 13 de noviembre de 1974 (<https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/issue/view/97>), de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, Presidente de la Sociedad Colombiana de Geología (1968), delegado ante el Comité Oceanográfico Internacional, París (1969), editor de *Geological Field Trips*, Colombia (1959-1978), presidente del Consejo de Geólogos profesionales de Colombia (CPG, 1984-1986) y Asesor Científico de INGEOMINAS (2002-2003) y ECOPETROL (2004). De 1968 a 1979, fue Profesor Asistente y Asociado de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). En 1969, como cofundador de la consultoría geológica GEOTEC, publicó la primera edición del Mapa Geológico de Colombia de GEOTEC, e inició una larga relación técnica con numerosas empresas de los sectores del petróleo y los recursos minerales. Durante su vida profesional, Cediél realizó estudios regionales de estratigrafía paleozoica y mesozoica, siendo pionero en la aplicación del análisis paleogeográfico y tectónico en la comprensión de la evolución geológica de los Andes colombianos.

El gran compilador. Fabio Cediél fue sin duda uno de los grandes compiladores de la geología del norte de los Andes. El mapa tectono-estratigráfico de Colombia publicado en 1988 por GEOTEC —su empresa— es sin duda una obra seminal de la geología colombiana. La visión moderna de la geología es en esta obra plasmada en un mapa que permite al lector entender, de una ojeada, las relaciones estratigráficas y estructurales del norte de los Andes. Los mapas geológicos son instrumentos cuantitativos que sobreviven las teorías y los cambios en paradigmas. Este es prueba de ello. El manejo impecable del color, el estricto orden gráfico, además de la diligente atención al detalle, hacen de este mapa una obra muy difícil de superar.

Muchos de nosotros aprendimos a estudiar con ojo crítico los mapas geológicos de la mano de Fabio en la fotocopidora de GEOTEC. Allí, en la casa de la 170, varias generaciones de geólogos pasamos muchas horas compilando mapas y columnas a escalas uniformes para después armonizarlos en documentos que después pasarían a su revisión. Revisión que sabíamos sería implacable. El espíritu crítico de Fabio siempre ha estado presente con nuestra generación de geólogos; unos años más tarde durante una acalorada discusión en un simposio acerca de la geología del Caribe, exclamó que la Sierra Nevada “no se puede mover impunemente”, al discutir los datos paleomagnéticos del norte de los Andes. Sea como fuere, la

mirada inquisitiva de Fabio siempre exigía un mayor escrutinio a los datos que se presentasen en cualquier medio. Al igual, Fabio reconoció que su interpretación de los análisis geológicos realizados en sus estudios de doctorado en Alemania requiere una revisión más actualizada; esto muy pocos científicos lo reconocen.

Fabio siempre fue un científico de grandes empresas, no sólo con obras como el mapa tectono-estratigráfico de Colombia, sino también su rol como editor de ambiciosas compilaciones regionales, como fueron la interpretación de líneas sísmicas regionales en las diferentes cuencas de Colombia (Atlas Sísmico de Colombia: Expresión Sísmica de Estilos Estructurales en las Cuencas de Colombia (GEOTEC, 1998)), el análisis riguroso de las cuencas petrolíferas de Colombia (labor realizada como docente de EAFIT), el Mapa Geológico de Colombia (GEOTEC, 2000), el Ensamblaje Tectónico del Bloque Andino Septentrional (AAPG Memoir 79, 2003), y su última gran obra, un libro publicado por Springer de más de mil páginas titulado “Geology and Tectonics of Northwestern South America”, entre otros.

La obra, y el pensamiento geológico de Fabio Cediél, dirigió y sigue dirigiendo los esfuerzos exploratorios en todas las cuencas del país y además ha moldeado el entendimiento geológico del norte de los Andes, sin nunca esquivar una controversia, ni una buena discusión. En estas compilaciones, Fabio siempre enfatizó la actividad más fundamental en exploración y en investigación: la cartografía geológica de campo como base para los análisis tectónicos y de cuencas, así esta tarea dure años y no meses o días como requieren actualmente las empresas.

Camilo Montes, Ph. D. Departamento de Física y Geociencias, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

Germán Bayona, Ph. D. Corporación Geológica ARES - Geocuencias SAS, Bogotá

Carlos Jaramillo, Ph. D. Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá

Miembros Correspondientes de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales

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, psicología, 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 como 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 título 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.

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.racefyn.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.racefyn.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.acefyn.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>., accessed 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.
- Declaration 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. Abbreviations

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.

